

06
254

ISSN 1993-9175

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ



ВІСНИК

**Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Випуск 32

**Дніпропетровськ
2010**

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

В І С Н И К

**Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

За загальною редакцією проф. О. М. ПШІНЬКА

Засновано в 2003 році

Випуск 32

Дніпропетровськ
2010

УДК 625.1+626.2

ББК 39.2

В 53

ЗАСНОВНИК ТА ВИДАВЕЦЬ:
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна від 06.05.2010 р., протокол № 9

Редакційна колегія:

головний редактор – доктор технічних наук *О. М. Пшінько*;
заступник головного редактора – доктор технічних наук *С. В. Мямлін*;
відповідальний секретар – кандидат технічних наук *І. П. Корженевич*

Члени редакційної колегії:

доктор біологічних наук *А. С. Дворецький*; доктори технічних наук *Є. П. Блохін*,
В. І. Бобровський, *Б. Є. Боднар*, *А. А. Босов*, *В. О. Браташ*, *І. О. Вакуленко*, *Г. К. Гетьман*,
Л. В. Дубинець, *І. В. Жуковицький*, *В. О. Заблудовський*, *Г. І. Загарій*, *М. І. Казакевич*,
С. М. Колесов, *М. Л. Коротенко*, *М. О. Костін*, *М. Б. Курган*, *В. Д. Петренко*, *В. М. Пунагін*,
А. В. Радкевич, *А. П. Разгонов*, *В. В. Рибкін*, *В. В. Скалозуб*, *В. С. Хандецький*, *Є. М. Шафіт*;
доктори фізико-математичних наук *В. І. Гаврилюк*, *В. В. Кравець*; доктори хімічних наук
М. М. Біляєв, *С. І. Нейковський*, *О. В. Федін*; доктори економічних наук *Ю. С. Бараш*,
С. В. Каламбет, *В. І. Копитко*, *В. Д. Крамаренко*, *А. А. Покотілов*

Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 32. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 274 с.
ISSN 1993-9175

У статтях висвітлені наукові дослідження, виконані авторами в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та інших організаціях. Статті присвячені вирішенню актуальних питань залізничного транспорту за такими напрямками: автоматизовані системи керування на транспорті, економіка транспорту, електричний транспорт, залізнична колія, моделювання задач транспорту та економіки, ремонт та експлуатація засобів транспорту, рухомий склад і тяга поїздів, транспортне будівництво.

Вісник становить інтерес для працівників науково-дослідних організацій, викладачів вищих навчальних закладів, докторантів, аспірантів, магістрантів та інженерно-технічних працівників.

УДК 625.1+626.2
ББК 39.2

В статьях отражены научные исследования, выполненные авторами в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна и других организациях. Статьи посвящены решению актуальных вопросов железнодорожного транспорта по следующим направлениям: автоматизированные системы управления на транспорте, экономика транспорта, электрический транспорт, железнодорожный путь, моделирование задач транспорта и экономики, ремонт и эксплуатация транспортных средств, подвижной состав и тяга поездов, транспортное строительство.

Вестник представляет интерес для работников научно-исследовательских организаций, преподавателей высших учебных заведений, докторантов, аспирантов, магистрантов и инженерно-технических работников.

ISSN 1993-9175

© Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн.
трансп. ім. акад. В. Лазаряна, оригінал-макет, 2010

ЗМІСТ

ГАЛУЗЬ ТЕХНІЧНИХ НАУК

РОЗДІЛ «ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО»

| | |
|--|----|
| В. Д. ПЕТРЕНКО (ДИИТ) ПАМ'ЯТИ ПРОФЕСОРА МИХАИЛА НАУМОВИЧА ГОЛЬДШТЕЙНА (К 100-ЛЕТІЮ СО ДНЯ РОЖДЕННЯ) | 7 |
| Г. А. АЖЕРМАЧЕВ, С. Г. АЖЕРМАЧЕВ, В. В. МОЛОШНИЙ (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь) ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЗЛОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ КОЛОНН СТАЛЬНЫХ РАМНЫХ КАРКАСОВ В БЕТОННЫХ ОСНОВАНИЯХ | 10 |
| Ф. В. БАБИЧ, В. Л. СЕДИН, В. Г. ШАПОВАЛ (ПГАСА, Днепропетровск) ПРОГНОЗ КРЕНОВ ФУНДАМЕНТОВ СООРУЖЕНИЙ НА ВОДОНАСЫЩЕННОМ ОСНОВАНИИ ПРИ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЕ СЛОЯ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ | 13 |
| О. В. БАНДУРИНА (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка) МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОСІДАНЬ ФУНДАМЕНТІВ ВІД ДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ | 18 |
| А. Г. ВАГОНОВА, Т. А. ЕРОХОНДИНА, О. О. ШАШЕНКО (НГУ, Днепропетровск) ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК | 21 |
| Ю. Л. ВИННИКОВ, М. О. ХАРЧЕНКО (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка) ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЩІЛЬНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ ҐРУНТОВИХ ПОДУШОК ЯК ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН | 26 |
| В. Ф. ГРЕЧКО, О. В. ГРЕЧКО (Запорожское отделение ГП «Государственный НИИ строительных конструкций») ОПЫТ УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ АВАРИЙНОГО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА | 31 |
| А. О. ГУРЖІЙ (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка) РОБОТА ЗБІРНИХ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА (ПУЛЬПОВОДІВ) НА НАМИВНИХ ҐРУНТАХ ХВОСТОСХОВИЩА ГЗК | 34 |
| Е. Б. ДРУЖКО (ДонНАСА, Донецк), В. Ф. ОГЛОБЛИН, В. В. САМОЙЛОВ (ДонИЖТ, Донецк) ПОДАТЛИВЫЕ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ | 39 |
| М. Л. ЗОЦЕНКО, О. І. НАЛИВАЙКО, І. І. ЛАРЦЕВА (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка), О. М. ПАНЬКО (Державне управління справами Президента України, Київ) ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОНЕПРОНИКНОСТІ ҐРУНТОЦЕМЕНТУ | 43 |
| М. Л. ЗОЦЕНКО, Д. О. ТРОЦЕНКО (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка), В. А. ТИТАРЕНКО (Державний НДІ будівельних конструкцій, Київ) ЗАКОНОМІРНІСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ЛЕСОВИХ ҐРУНТІВ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ АНКЕРІВ | 49 |
| Л. Л. КАУФМАН (США), Б. А. ЛЫСИКОВ, К. И. ЗАПОЛОВА (Донецкий национальный технический университет), И. Ж. СИРАЧЕВ (ОАО «Трест Донецкшахтопроходка», Донецк) ОПЫТ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА | 55 |
| В. И. ЛЕЩЕНКО, Л. Г. ПОЛИТИКОВА, М. С. ХОРОЛЬСКИЙ (ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ», Днепропетровск) СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗИНОВЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ | 61 |
| С. С. НАСОНОВА (УГХТУ, Днепропетровск) МОДЕЛЬ «СЛАБЕЙШЕГО ЗВЕНА» И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ | 64 |

| | |
|--|-----|
| М. И. НИКИТЕНКО, В. А. СЕРНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь), И. Л. БОЙКО (ЧПП «Моноракурс Проект», БНТУ, Беларусь), Н. В. ЧЕРНОШЕЙ (ОАО «Буровая компания «Дельта», Беларусь) ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ..... | 69 |
| Н. А. НІКІФОРОВА, А. Ф. МАСЛЯЄВ (ДІТ) ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ, СТРУКТУРИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОННОЇ СУМІШІ ТА КОНСТРУКЦІЙНОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНУ | 81 |
| Я. М. ПАСТЕРНАК (Луцький національний технічний університет), Г. Т. СУЛИМ (Львівський національний університет ім. І. Франка), Й. Й. ЛУЧКО (Львівська філія ДІТу) МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДАМИ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ТОНКИХ АРМУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД ТА ТУНЕЛІВ..... | 85 |
| В. Г. ПАСТУШКОВ, Г. П. ПАСТУШКОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь) НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНОГО ОБЩЕСТВЕННО-ТОРГОВОГО ЦЕНТРА С ПАРКИНГОМ В г. МИНСКЕ..... | 91 |
| В. И. ПЕТРЕНКО (Киевметрострой) НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОАО «КИЕВМЕТРОСТРОЙ» СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ..... | 96 |
| В. Д. ПЕТРЕНКО, В. Т. ГУЗЧЕНКО, А. М. М. АЛХДУР (ДІТ) ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРУ ПІДСИЛЕННЯ НА НДС ЗАЛІЗНИЧНОГО НАСИПУ ПРИ ПІД'ЇЗДІ ДО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ | 101 |
| В. П. ПУСТОВОЙТЕНКО, О. Р. ГАВРИШ (НГУ, Днепропетровск) ОРГАНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА МЕГАПОЛИСОВ..... | 106 |
| А. С. РАСПОПОВ (ДИИТ) ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ К ДИНАМИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ СЕТОК И МЕМБРАН | 111 |
| Н. В. САВИЦКИЙ, О. Г. ЗИНКЕВИЧ (ПГАСА, Днепропетровск), А. Н. ЗИНКЕВИЧ (ДИИТ) ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ОБШИВКИ НА РАСЧЕТНУЮ ДЛИНУ СЖАТОЙ СТОЙКИ КАРКАСА ИЗ ЛСТК МЕЖДУ УЗЛАМИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ..... | 115 |
| С. Н. СВИРИДОВИЧ, Д. В. ЖИХАРЕВ, А. Е. ЧЕРЕШКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь) РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОНОЛИТНОЙ СТЕНКИ ВОДОПРИЕМНОЙ КАМЕРЫ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ЗАГЛУБЛЕНИЯ В ГРУНТ..... | 118 |
| В. И. СОКОЛОВСКИЙ, С. В. БОРЩЕВСКИЙ, В. В. ГОНЧАРЕНКО (Донецкий национальный технический университет) К ВОПРОСУ О ГЕОМЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ И УКРЕПЛЕНИЯ ПОРОД ВОКРУГ НАКЛОННЫХ СТВолоВ | 120 |
| О. Л. ТЮТЬКІН (ДІТ) МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ ІЗ ВРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПРИЄДНАНИХ МАС ОТОЧУЮЧОГО МАСИВУ..... | 122 |
| А. Л. ТЮТЬКИН (ДИИТ), А. В. ГУЛАК (ООО СК «Оникс», Днепропетровск) СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОСНОВАНИЕМ..... | 127 |
| В. И. ЧАПЛЫГИН, О. В. ГРЕЧКО (ООО «НК Астра-Днепр», Запорожье) УСТРАНЕНИЕ КРЕНОВ ФУНДАМЕНТОВ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДРАБОТКОЙ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПОД ЕГО ПОДОШВОЙ | 132 |
| А. С. ЩЕРБАК (ДІТ) ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО ПІНОСКЛА..... | 141 |
| <i>РОЗДІЛ «РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ»</i> | |
| В. О. МЕЛЬНИЧУК (КМУ, Київ), О. М. САВЧУК, М. А. ГРІЧАНИЙ, І. Ю. ХОМЕНКО (ДІТ) АНАЛІЗ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ КОЛЕСА ВІДНОСНО РЕЙКИ З ВІДЕОЗАПИСІВ | 143 |

| | |
|--|-----|
| Н. А. РАДЧЕНКО, Т. И. КУЗНЕЦОВА (Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск), О. В. ЗВОНАРЕВА (ДИИТ) ОЦЕНКА ЛЕВИТАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ КОНТУРОВ ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ..... | 147 |
|--|-----|

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ»

| | |
|---|-----|
| А. М. АФАНАСОВ (ДИИТ) ВЫБОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА | 151 |
| В. М. БЕЗРУЧЕНКО, Ю. С. БОНДАРЕНКО, О. А. ХОРОШКО (ДІТ) ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА..... | 155 |
| В. М. БЕЗРУЧЕНКО, А. В. ШАПОВАЛОВ (ДІТ) АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЇ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ..... | 159 |
| Н. Г. ВИСИН, Б. Т. ВЛАСЕНКО, С. А. СОКОЛОВ (ДИИТ) ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ЭР2Т И ЕПЛ2Т..... | 162 |
| А. Е. ДРУБЕЦКИЙ (ДИИТ) ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТА ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОГТЕОБРАЗНЫМИ ПОЛЮСАМИ | 166 |
| О. Л. МАРЕНИЧ (ДІТ) ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ ЇХ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ..... | 172 |
| П. Є. МИХАЛІЧЕНКО (ДІТ) МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ АВАРІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. 2. КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ З ЕЛЕКТРОРУХОМОМ СКЛАДОМ..... | 175 |
| А. В. ПЕТРОВ (ДИИТ) ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ | 180 |
| Д. В. УСТИМЕНКО (ДІТ) МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ВІД СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ..... | 184 |

РОЗДІЛ «ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ»

| | |
|--|-----|
| В. П. ГНАТЕНКО, К. В. МОЙСЕЄНКО (ДІТ) РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНОГО ВИПРОБУВАННЯ НА МІЦНІСТЬ СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ ТИПУ Р65 МАРКИ 1/11 ПРОЕКТУ 65111Ж..... | 186 |
| И. П. КОРЖЕНЕВИЧ (ДИИТ), О. А. СУСЛОВ (ИрГУПС), Б. И. ТОРОПОВ (КИЕВГИПРОТРАНС) ПЛАН ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ, ПРОБЛЕМЫ ЕГО СЪЕМКИ, РАСЧЕТОВ И РЕАЛИЗАЦИИ..... | 193 |

РОЗДІЛ «ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ»

| | |
|---|-----|
| Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО (ДІТ) РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО ЗБИТКУ І ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ПРИ АВАРІЯХ З НАФТОПРОДУКТАМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ..... | 198 |
| А. В. РАДКЕВИЧ, Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. А. СТЕПАНЕНКО, С. А. ЯКОВЛЕВ, А. И. ШАПТАЛА, В. М. ЛИСНЯК (ДИИТ) РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ КОНВЕКТИВНО-ДИФУЗИОННОГО ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ | 203 |

РОЗДІЛ «АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ»

| | |
|---|-----|
| Б. М. БОНДАРЕНКО, Г. Л. МОРОЗОВ, А. П. РАЗГОНОВ (ДІТ) ВІБРОШУМОВА ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ АПАРАТУРИ..... | 206 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| Д. В. ДУНАЕВ, И. О. РОМАНЦЕВ, В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ) АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ..... | 212 |
| Т. Н. СЕРДЮК (ДИИТ), А. В. ШВЕЦ, В. К. ИВАНОВ (Институт радиоп физики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, Харьков) ВЫДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ МОЩНЫХ ПОМЕХ ОТ СИЛОВЫХ СЕТЕЙ..... | 218 |

РОЗДІЛ «МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ»

| | |
|--|-----|
| В. И. БОБРОВСКИЙ, А. В. КУДРЯШОВ (ДИИТ) ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ..... | 224 |
| М. П. БОЖКО, О. О. МАЗУРЕНКО (ДІПТ) АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОПЕРАТИВНОГО ФОРМУВАННЯ ДВОГРУПНИХ ПОЇЗДІВ НА ОКРЕМІ ПОКАЗНИКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ РОБОТИ..... | 230 |
| В. В. ЖУРАВЕЛЬ (ДІПТ) ПОКАЗНИКИ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНОЇ ГРКИ ТА ФАКТОРИ, ЩО НА НИХ ВПЛИВАЮТЬ..... | 237 |

РОЗДІЛ «МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

| | |
|--|-----|
| І. О. ВАКУЛЕНКО (ДІПТ) ПРО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПРИ ВТОМІ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ З ОСОБЛИВОСТЯМИ БУДОВИ ПОВЕРХОНЬ РУЙНУВАННЯ..... | 242 |
|--|-----|

ГАЛУЗЬ ЕКОНОМІЧНИХ НАУК

РОЗДІЛ «ЕКОНОМІКА ТРАНСПОРТУ»

| | |
|---|-----|
| В. М. БУБНОВ (ООО «ГСКБВ», Мариуполь), С. В. МЯМЛИН (ДИИТ), Н. Л. ГУРЖИ (ООО «ГСКБВ», Мариуполь) ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАГОНОВ-ПЛАТФОРМ СЕКЦИОННОГО ТИПА..... | 246 |
| О. М. ГНЕННИЙ (ДІПТ) СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАРТІСНОГО ФІЗИЧНОГО ЗНОСУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ, ЩО НЕ ВІДНОВЛЮЮТЬСЯ..... | 251 |
| К. В. ЖИЖКО (ДНУ ім. О. Гончара, Дніпропетровськ) ОСОБЛИВОСТІ ІНОЗЕМНИХ ІНВЕСТИЦІЙ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЕКОНОМІКУ ДЕРЖАВИ..... | 255 |
| А. О. КАГРАМАНЯН, А. В. ОНИЩЕНКО (УкрДАЗТ, Харьков) ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРІВУ ТЕПЛОВОЗІВ ВІД АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ..... | 259 |
| А. А. КОВТУН (БелГУТ, Гомель, Беларусь) ИННОВАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТРАСЛЕВОГО ОБРАЗОВАНИЯ И ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА..... | 264 |
| С. В. МЯМЛИН, А. С. БЛОХИНА (ДИИТ), З. Х. ЦЕЧОЕВА (Октябрьская железная дорога, Санкт-Петербург, Российская Федерация) ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ..... | 268 |

В. Д. ПЕТРЕНКО (ДИИТ)

ПАМ'ЯТИ ПРОФЕССОРА МИХАИЛА НАУМОВИЧА ГОЛЬДШТЕЙНА (К 100-ЛЕТІЮ СО ДНЯ РОЖДЕННЯ)

Стаття присвячена пам'яті видатного вченого в області механіки ґрунтів та фундаментобудування професора Гольдштейна Михайла Наумовича, який створив відому в світі школу геотехніків.

Стаття посвящена пам'яті видаючогося ученого в області механіки ґрунтів і фундаментостроєння професора Гольдштейна Михайла Наумовича, створившого известную в мире школу геотехніків.

The article is devoted to the memory of prominent scientist in the field of soil mechanics and construction of foundations Prof. Mikhail Naumovich Goldstein, who had created the worldwide-known geotechnical school.

В 2010 г. научная общественность стран СНГ отмечает 100-летие со дня рождения М. Н. Гольдштейна.



Михаил Наумович Гольдштейн (1910-1993)

Выдающийся ученый в области механики ґрунтов, оснований и фундаментов Гольдштейн М. Н. родился в 1910 г. в семье врачей.

Закончив в 1927 г. строительную профтехшколу, он работал на стройках Приднепровья и учился на вечернем факультете Днепропетровского строительного института. После окончания института в 1931 г. участвовал в проектировании крупных металлургических заводов, работал на Вахшстрое.

В 1934-1935 гг. был ассистентом на кафедре «Мосты» ДИИТа, а в 1936-1937 гг. – инженером кафедры оснований и фундаментов и заведующим лабораторией испытаний ґрунтов.

С 1938 г. он переходит работать в НИИ Пути и строительства МПС (г. Москва), занимаясь вопросами устойчивости земляного полотна и проблемами строительства железных дорог в районах вечной мерзлоты.

В 1939 г. М. Н. Гольдштейн защитил в МИИТе кандидатскую диссертацию на тему «Устойчивость свободных земляных откосов». С 1943 по 1946 г. обучался в докторантуре Академии Наук СССР под руководством члена-корреспондента Веденеева Б. Н. и в 1946 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании». В этот же период он участвовал в исследованиях по обеспечению устойчивости земляного полотна для бесперебойной работы железных дорог Урала и Сибири и в восстановлении прифронтных транспортных коммуникаций. Им были разработаны конструкции тонкостенных опускных колодцев и высоких свайных ростверков под опоры мостов, а также винтовых свай с высокой несущей способностью.

Вернувшись через 10 лет в 1948 г. в ДИИТ в качестве заведующего кафедрой оснований и фундаментов, он уже в 1949 г. создал первую в Украине научно-исследовательскую проблемную лабораторию механики ґрунтов, ставшую впоследствии широко известной не только в бывшем СССР, но и за его пределами. На базе этой лаборатории была создана целая сеть геотехнических станций-лабораторий, в которых проводились исследования по решению проблем деформаций и устойчивости земляного полотна железных дорог, плотин, дамб и других гидротехнических сооружений, борьбы с оползнями, укрепления берегов водохранилищ,

устойчивости оснований промышленных и гражданских зданий и сооружений.

Такие станции были созданы в Украине, России, Молдавии и других республиках бывшего СССР. Лаборатория механики грунтов стала ведущей в области создания приборов, методов и методик испытания различных грунтов.

Возглавив проведение фундаментальных исследований в области механики грунтов, профессор М. Н. Гольдштейн развил вопросы теории просадочных явлений и реологии грунтов, устойчивости земляного полотна, разжижения песков при взрывах и другие.

Настоящим золотым фондом были высококвалифицированные научные кадры, которые готовились под руководством М. Н. Гольдштейна. При кафедре была создана возглавляемая им аспирантура, в которой постоянно обучались 4...5 аспирантов, подбираемых из молодых сотрудников и студентов-выпускников ДИИТа. Он был научным руководителем 35 диссертантов. Под его руководством пять научных сотрудников кафедры и лаборатории защитили докторские диссертации, один из которых Гусев В. Б. стал впоследствии членом-корреспондентом АН СССР.

Михаил Наумович Гольдштейн много сделал для механики грунтов, занимаясь ею около полувека.

Он был автором ряда оригинальных монографий, учебников, справочных изданий, переводчиком и редактором переводов широко известных иностранных классических трудов, изданных с его помощью у нас в стране.

Из крупных монографий, написанных М. Н. Гольдштейном, прежде других необходимо упомянуть его книгу «Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании» 1948 г., бывшей его докторской диссертацией.

В 1952 г. вышла широко известная книга М. Н. Гольдштейна «Механические свойства грунтов», переизданная им затем в 1971, 1973 и 1979 г. уже в виде трех книг под тем же названием. Содержание этого нового трехтомного издания было автором значительно, более чем в четыре раза, расширено и дополнено по сравнению с изданием 1952 г.

Из учебников, написанных авторским коллективом, руководимым М. Н. Гольдштейном, следует назвать курс «Механика грунтов, основания и фундаменты» 1981 г.

Весьма интересной и практически полезной является монография, изданная в 1977 г. М. Н. Гольдштейном и его учениками М. И. Шевченко и С. Г. Кушнером. В этой монографии рассмотрена идея грунтового «стол-

ба», встречавшаяся еще у К. Терцаги в его книге «Механика грунтов в инженерной практике», перевод которой на русский язык редактировался М. Н. Гольдштейном. Он был также переводчиком изданной у нас классической книги Леонардса «Основания и фундаменты».

В течение всех лет своей творческой жизни Михаил Наумович Гольдштейн проводил большую научно-общественную работу. Он был неперенным участником многих совещаний и конференций, проводившихся в нашей стране, в том числе VIII Международного Конгресса по механике грунтов и фундаментостроению в 1973 году в Москве. Он также был членом ряда ученых советов, в том числе в МИСИ, членом президиума и Почетным членом Национального комитета СССР по механике грунтов и фундаментостроению, членом редколлегии журнала «Основания, фундаменты и механика грунтов». Нельзя не упомянуть большое Совещание по методам определения механических свойств грунтов, проводившееся под руководством М. Н. Гольдштейна в Днепропетровске, где были также продемонстрированы большая центрифуга и оригинальная трехосная аппаратура.

Выступления Михаила Наумовича обычно были зажигательными, оригинальными и слушались с большим интересом.

Под его руководством выполнен комплекс работ по научному обоснованию устойчивости подземных сооружений Киевского метрополитена, а также проектирования и строительства Днепропетровского метрополитена.

Большой вклад внес М. Н. Гольдштейн в подготовку и воспитание научных кадров, создание школы механиков, принесших ДИИТу признание в научных кругах многих стран.

Школа механики грунтов в ДИИТе создана профессором М. Н. Гольдштейном. Под его руководством в период с 1948 по 1981 г. были выполнены комплексные исследования в области механики грунтов, и в частности, изучены механические свойства всех основных типов грунтов. Проведены исследования устойчивости земляного полотна железных дорог и крупных гидротехнических сооружений и разработаны методы по ее повышению. Кроме того, усовершенствованы методы инженерно-геологических обследований оползней на железных дорогах и изучена устойчивость откосов и оползневых склонов.

Большой вклад в развитие школы внесли ученики профессора Гольдштейна: доктора наук, профессора К. Ш. Шадунц, А. Я. Туровская, А. Г. Дорфман, Л. М. Тимофеева, Г. М. Вариниченко, У. Х. Магдеев и член-корреспондент АН СССР, президент Международной инженерной Академии Б. В. Гусев.

Основными направлениями развития школы являются:

- разработка методов повышения устойчивости земляного полотна и грунтовых оснований инженерных сооружений железных и автомобильных дорог;
- совершенствование методов расчета прочности и надежности обделок тоннелей при их взаимодействии с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях;
- использование фундаментальных положений механики грунтов для разработки мероприятий по укреплению слабых оснований, обустройству надежных фундаментов зданий, при проектировании строительства каналов, водохранилищ и других сооружений.

Практическое значение механики грунтов для многих отраслей народного хозяйства, в том числе и для железнодорожного транспорта, огромно. Устойчивость земляного полотна необходима для обеспечения безопасности движения поездов, что особенно важно при увеличении их скоростей и грузоподъемности.

По инициативе проф. М. Н. Гольдштейна на факультете «Мосты и тоннели» ДИИТа в 1956 году была открыта новая специализация «Транспортные тоннели и метрополитены», которая функционирует и сейчас.

При кафедре в 1949 г. под руководством профессора М. Н. Гольдштейна была создана отраслевая проблемная лаборатория механики грунтов, которая стала известной не только в бывшем СССР, но и далеко за его пределами. На базе этой лаборатории были созданы геотехнические станции на строящихся объектах Куйбышевской, Каховской, Кременчугской и Киевской ГЭС, канала Днепр – Донбасс, а также Одесской, Молдавской, Северо-Кавказской, Казахской и Львовской железных дорог. На геостанциях решались проблемы устойчивости земляного полотна железнодорожных, гидротехнических и других сооружений. Лаборатория занимала ведущее положение в СССР в области создания приборов, методов и методик измерений деформаций грунтовых оснований различных сооружений.

Научная школа механики грунтов ДИИТа внесла большой вклад, как в развитие теории, так и в практику строительства и реконструкцию железных дорог и других инженерных транспортных сооружений.

Профессор Гольдштейн М. Н. опубликовал свыше 200 научных работ, в том числе 13 мо-

нографий, он перевел на русский язык труды выдающихся зарубежных ученых Терцаги, Пека, Леонардса, Харра, написал учебник по механике и свойствам грунтов.

Главными направлениями развития исследований, проводимых в настоящее время в отраслевой научно-исследовательской лаборатории механики грунтов являются следующие:

- разработка методов повышения устойчивости земляного полотна и оснований инженерных сооружений железных и автомобильных дорог;
- контроль качества уплотнения грунтов методом динамического зондирования и акустическими методами;
- разработка математической модели определения устойчивости и надежности земляного полотна;
- разработка технологий струйного закрепления оснований и фундаментов транспортных сооружений путем инъектирования цементных и других смесей;
- разработка методологии расчетов устойчивости земляного полотна на основе компьютерных технологий;
- развитие теории взаимодействия тоннельных конструкций с вязко-упруго-пластичским грунтовым массивом.

За период существования лаборатории было подготовлено более 40 кандидатов и 6 докторов наук, которыми написаны десятки монографий, изданы сотни статей и подготовлены десятки изобретений.

Высокий уровень научной подготовки, огромный опыт научно-исследовательской и практической работы, создание известной школы в области механики грунтов М. Н. Гольдштейна ставят его в один ряд с известными в мире учеными, такими как Терцаги, Цытович и другие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов. Основные компоненты грунта и их взаимодействие [Текст] / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971. – 375 с.
2. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов. Напряженно-деформативные и прочностные характеристики [Текст] / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1973. – 304 с.

Поступила в редколлегию 19.03.2010.

Принята к печати 26.03.2010.

Г. А. АЖЕРМАЧЕВ, С. Г. АЖЕРМАЧЕВ, В. В. МОЛОШНЫЙ (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЗЛОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ КОЛОНН СТАЛЬНЫХ РАМНЫХ КАРКАСОВ В БЕТОННЫХ ОСНОВАНИЯХ

Показано можливість закріплення сталевих колонн рамних каркасів до фундаментів без анкерних болтів. Дається оцінка роботи елементів вузла закріплення.

Показана можливість закріплення сталевих колонн рамних каркасів к фундаментам без анкерних болтів. Дається оцінка роботи елементів вузла закріплення.

A possibility of fixing the steel columns of frameworks to the foundations without anchor bolts is demonstrated. The estimation of work of elements of fixing unit is given.

При разработке проектов стальных рамных каркасов многоэтажных зданий, особенно для сейсмических районов, всегда приходится решать два основных вопроса.

Первый – создание конструктивных решений узлов закрепления ригелей с колоннами, воспринимающими поперечные силы и изгибающие моменты, которые при экстремальных условиях могут вызвать пластические деформации или усталостные трещины, приводящие к хрупкому разрушению в элементах узла.

Второй – закрепление колонны в фундаменте, обеспечивающее восприятие поперечной и продольной сил, а также изгибающего момента расчетной величины при основном и особом сочетании нагрузок.

Существующие конструктивные решения узлов закрепления колонн с фундаментами [1...6] не всегда обеспечивают заданную сейсмостойкость рамного каркаса и здания в целом. Основной причиной низкой сейсмостойкости в этих узлах, является наличие концентраторов высоких напряжений и отсутствие контроля начального натяжения анкерных болтов (рис.1...3).

Все это затрудняет определение объективного напряженно-деформированного состояния в элементах узла закрепления при расчетных нагрузках.

Проектировщики часто идут по пути увеличения металлоемкости узлов для повышения надежности сооружения при сейсмических воздействиях.

Анализ конструктивных решений показывает, что такое решение не всегда ведет к повышению сейсмостойкости узла закрепления, а чаще всего, даже снижает сейсмостойкость уз-

ла и здания в целом. Это происходит из-за того, что жесткость соединения элементов узла закрепления повышается, при этом, уменьшается возможность развития пластических деформаций в наиболее напряженных сечениях и, как результат, появление усталостных трещин, которым способствуют начальные напряжения от сварки.

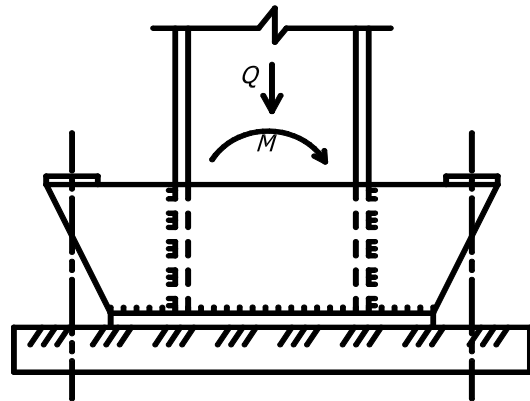


Рис. 1. Узел крепления базы колонны к фундаменту

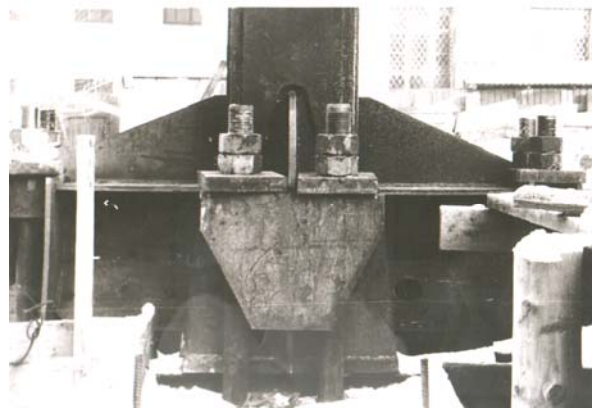


Рис. 2. Крепление базы колонны при помощи анкерных болтов

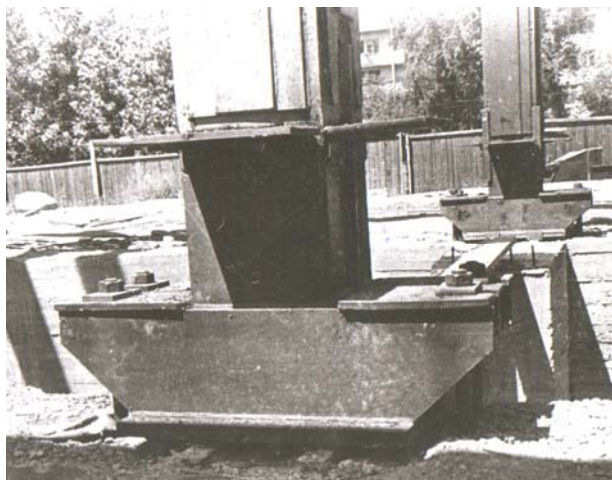


Рис. 3. Узел соединения колонны с фундаментом

В НАПКС разработаны и продолжают совершенствоваться безбазовые узлы закрепления стальных колонн рамных каркасов с фундаментами [7].

Основная идея предложенного конструктивного решения является то, чтобы отказаться от специального опорного устройства в нижней части колонны, от анкерных болтов и упростить монтаж колонн.

Как правило, многоэтажные здания имеют один или несколько подвальных этажей, выполненных из железобетонных конструкций. Стены и перекрытия этих помещений достаточно хорошо армированы. Поэтому предлагается стержень колонны стального рамного каркаса заглублять в железобетонный массив на заданную глубину, обеспечивающую восприятие продольной поперечной силы, а также, изгибающий момент, возникающий в экстремальных условиях.

Осуществляется это следующим образом. В основании колонны предусматривается стальная пластина, площадь которой обеспечивает передачу продольной силы на бетонное основание. Поперечную силу и изгибающий момент воспринимает горизонтальная арматура, расположенная в стенах подвальных помещений. Горизонтальная арматура приваривается к стержню колонны посредством поперечных листовых элементов или другим способом. Изгибающий момент в основании колонны воспринимается парой сил, образованной нижней и верхней арматурой (рис. 4). Сам стержень колонны, заглубленный в бетон, работает как балка на упругом основании под действием продольной силы и поперечного момента (рис. 5).



Рис. 4. Безбазовый узел крепления колонны к фундаменту

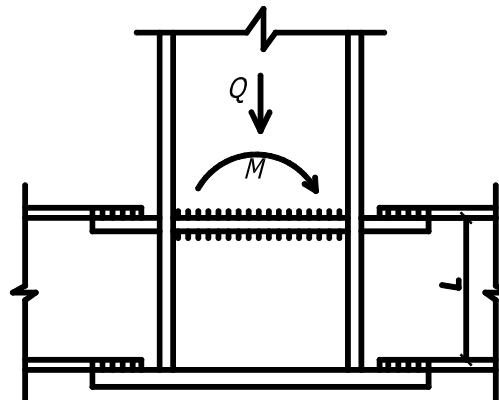


Рис. 5. Схема работы безбазового узла крепления колонны к фундаменту

Предложенное конструктивное решение закрепления стального рамного каркаса в железобетонном фундаменте позволяет значительно уменьшить металлоемкость узлов закрепления, снизить объемы сварочных работ. Упростить монтаж стального каркаса.

Упрощение монтажа стального каркаса обеспечивается тем, что при производстве бетонирования подвальных помещений элементы колонн первого этажа устанавливаются так, чтобы отметка верха установленных частей колонны находилась на высоте 1000...1200 мм от нулевой отметки.

После установления всех колонн (или их части), заканчиваются бетонные работы нулевого цикла и дальнейший монтаж осуществляется по типовому решению.

Данное конструктивное решение полностью исключает применение анкерных болтов и контроль усилий в них при закручивании гаек.

Выводы

1. Применение обычных узлов закрепления колонн стальных рамных каркасов не всегда обеспечивает заданную сейсмостойкость зданий и сооружений, и требует значительного расхода металла и сварочных работ.

2. Применение безбазовых закреплений стальных колонн рамных каркасов в фундаменте значительно снижает расход металла, объем

сварочных работ, а также упрощает монтаж и повышает сейсмостойкость здания в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельников, Н. П. Металлические конструкции [Текст] / Н. П. Мельников. – М.: Стройиздат, 1983. – 541 с.
2. Металлические конструкции [Текст] / под ред. Е. И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1985. – 560 с.
3. Металлические конструкции [Текст] / под ред. Н. С. Стрелецкого. – М.: Стройиздат, 1971. – 776 с.
4. Проектирование металлических конструкций [Текст] / под ред. В. А. Бирюлева. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.
5. ГОСТ Справочник проектировщика. Металлические конструкции [Текст]. – 2-е изд. / под ред. Н. П. Мельникова. – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
6. Стальные конструкции производственных зданий [Текст] : справочник / А. А. Нилов, В. А. Пермяков, А. Я. Прицкер. – К.: Будівельник, 1986. – 272 с.
7. Патент на корисну модель №33387. Україна. Вузол сполучення металевої колони з фундаментом [Текст] / Г. А. Ажермачов, О. С. Антоненко. – Опубл. 25.08.2008, Бюл. № 12.

Поступила в редколлегию 18.03.2010.

Принята к печати 22.03.2010.

ПРОГНОЗ КРЕНОВ ФУНДАМЕНТОВ СООРУЖЕНИЙ НА ВОДОНАСЫЩЕННОМ ОСНОВАНИИ ПРИ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЕ СЛОЯ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Показано рішення для прогнозу крену прямокутного фундаменту на лінійному пружному ізотропному водонасиченій основі при розрахунковій схемі ґрунтового шару кінцевої товщини. Доведене, що швидкість процесу фільтраційної консолідації основи прямо пропорційна величині коефіцієнта Пуассона основи, відношенню довжини підшви фундаменту до його ширини й обернено пропорційна товщині ґрунтового шару.

Показано решение для прогноза крена прямоугольного фундамента на линейном упругом изотропном водонасыщенном основании при расчетной схеме ґрунтового слоя конечной толщины. Доказано, что скорость процесса фильтрационной консолидации основания прямо пропорциональна величине коэффициента Пуассона основания, отношению длины подошвы фундамента к его ширине и обратно пропорциональна толщине ґрунтового слоя.

The solution for the forecast of incline of the rectangular base on the linear elastic isotropic water-saturated basement under the settlement scheme of a soil layer of a final thickness is shown. It is proved that rate of process of filtration consolidation of the basement is directly proportional to the value of Poisson's coefficient ratio of the basement, division of the foundation base length to its width and inversely proportional to the soil layer thickness.

Проблема

Расчет и прогноз развития кренов фундаментов сооружений, возведенных по расчетной схеме слоя конечной толщины на водонасыщенном основании почти не представлен в ДБН В.2.1-10-2009 «Основания и фундаменты сооружений».

Цель работы

Разработка аналитического решения по прогнозу крена прямоугольного фундамента в рамках модели линейно упругого изотропного водонасыщенного основания при расчетной схеме ґрунтового слоя конечной толщины.

Актуальность

Наблюдения за осадками существующих зданий и строений показывают, что большие осадки нередко сопровождаются общим креном, приводящим к дополнительным, весьма нежелательным деформациям в конструкциях сооружений, затрудняющим их нормальную эксплуатацию. Выложены результаты теоретических исследований закономерностей развития во времени кренов фундаментов с прямоугольной формой подошвы на водонасыщенном ґрунтовом основании. В качестве модели и расчетной схемы основания принят упругий изотропный водонасыщенный ґрунтовый слой конечной толщины. Вносим допущение, что эпюра напряжений на контакте «основание-фундамент» имеет прямолинейные очертания (этой эпюре соответствует расчетная схема абсолютно – гибкого фундамента [1]).

Методика исследования

Задача исследований для математической модели имела следующие исходные. ґрунтовый слой толщиной H подстилается малосжимаемым скальным основанием. На поверхности слоя конечной толщины расположен прямоугольный фундамент со сторонами L и b . На фундамент действует моментная нагрузка $M=Q \cdot e$, где M – действующий на уровне подошвы фундамента опрокидывающий момент, Q – равнодействующая приложенных к фундаменту вертикальных нагрузок, а e – эксцентриситет ее приложения. Предполагается, что в общем случае момент M является функцией времени t .

ґрунтовое основание характеризуется упругими характеристиками – модулем сдвига $G=E/[2 \cdot (1+\nu)]$ и коэффициентом Пуассона ν , где E – модуль общей деформации ґрунта.

При этом реологической характеристикой основания является коэффициент пространственной консолидации $C_v = C_k/3 \cdot (\lambda + 2G)/(3\lambda + 2G)$, где C_k – коэффициент консолидации при компрессии, а λ – константа Лямэ $\lambda = \nu \cdot E/[(1+\nu) \times (1-2\nu)]$ [2, 3, 4, 5]. Предполагается, что моментная нагрузка приложена к фундаменту в момент времени $t=0$.

Рассмотрен случай постоянной во времени моментной нагрузки. В качестве фунда-

$$S(r,t) = W(r,t,H) = \frac{1-\nu}{2\pi GH} \times \int_0^\infty \left[\frac{\text{Sh}^2(a)}{a + \text{Sh}(a)\text{Ch}(a)} - \frac{2(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{\text{Sh}^2(a)(1+\text{Ch}(a))^2 a}{[a + \text{Sh}(a) \cdot \text{Ch}(a)]^2} \sum_{i=1,3,5} \frac{i^2 \pi^2}{i^2 \pi^2 + a^2} e^{-\frac{a^2 + i^2 \pi^2}{H^2} C_v t} \right] \cdot J_0\left(\frac{r}{H}, a\right) da. \quad (1)$$

В формуле (1) a – параметр; $\text{Sh}(a)$ и $\text{Ch}(a)$ – соответственно гиперболические синус и косинус; $J_0(x)$ – функция Бесселя первого ряда с нулевым индексом; r – координата; $W(r,t,H)$ – вер-

ментального используем полученное автором [2] решение (1) задачи о сосредоточенной силе, приложенной к верхней границе слоя конечной толщины. Решение (1) было получено в предположении о том, что на контакте «раздробленный грунт – скала» имеет место фильтрующая прослойка. Если таковая отсутствует, то в (1) следует удвоить толщину грунтового слоя, т.е. вместо H положить $H_1 = 2H$.

тикальное перемещение верхней границы основания; $S(r,t)$ – осадка верхней границы основания [2, 6]. Исследуем граничные (при $t=0$ и $t \rightarrow \infty$) значения (1). При $t \rightarrow 0$ имеем:

$$S(r,0) = W(r,0,H) = \frac{1-\nu}{2\pi GH} \cdot \int_0^\infty \left[\frac{\text{Sh}^2(a)}{a + \text{Sh}(a)\text{Ch}(a)} - \frac{2(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{\text{Sh}^2(a) \cdot [1 + \text{Ch}(a)]^2 \cdot a}{a + \text{Sh}(a) \cdot \text{Ch}(a)} \sum_{i=1,3} \frac{i^2 \pi^2}{(i^2 \pi^2 + a^2)^2} \right] \cdot J_0\left(a \frac{r}{H}\right) da.$$

С учетом равенства [7]

$$\sum_{i=1,3} \frac{i^2 \pi^2}{(i^2 \pi^2 + a^2)^2} = \frac{1}{4a} \cdot \frac{\lambda + \text{Sh}(a)\text{Ch}(a)}{[1 + \text{Ch}(a)]^2} \quad \text{найдем:}$$

$$s(r,0) = \frac{1}{4\pi GH} \int_0^\infty \frac{\text{Sh}^2(a)}{a + \text{Sh}(a)\text{Ch}(a)} \cdot J_0\left(a \frac{r}{H}\right) da. \quad (2)$$

При $t \rightarrow \infty$ имеем:

$$s(r,\infty) = \frac{1-\nu}{2\pi GH} \int_0^\infty \frac{\text{Sh}^2(a)}{a + \text{Sh}(a)\text{Ch}(a)} \cdot J_0\left(a \frac{r}{H}\right) da. \quad (3)$$

Сопоставление (2) и (3) позволило сделать вывод о том, что в процессе фильтрационной консолидации средняя осадка любой точки дневной поверхности слоя конечной толщины увеличится в $2(1-\nu)$ раз. В случае если коэффициент Пуассона грунтового скелета $\nu = 0,5$, то фильтрационная консолидация отсутствует вообще.

Расчет зависимостей «относительный крен – безразмерное время» для слоя конечной толщины выполнялся так. Вначале с использованием зависимостей вида:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\text{Sh}^2(a)}{a + \text{Sh}(a)\text{Ch}(a)} &\approx \sum_{i=1}^{10} a_{0i} \cdot T_i^*(z_0); \\ z_0 &= \exp(-d_0 a) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

была выполнена аппроксимация первого слагаемого подынтегральной функции выражения (1). Здесь $T_i(x)$ – смещенные полиномы Чебышева [6]. Далее с использованием зависимостей

$$\left. \begin{aligned} \exp(-a^2 c_k t) &\approx \sum_{i=1}^{10} a_{1i} T_i^*(z_1); \\ z_1 &= \exp\left(-d_1 a \cdot \frac{\sqrt{C_v \cdot t}}{H}\right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

была сделана аппроксимация входящей в (1) экспоненциальной функции. После этого с использованием выражений вида:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\text{Sh}^2(a) \cdot (1 + \text{Ch}(a))^2}{a + \text{Sh}(a) \cdot \text{Ch}(a)} \cdot \frac{k^2 \pi^2}{(a^2 + k^2 \pi^2)^2} &\approx \sum_{i=1}^{10} a_{2i} T_i^*(z_2); \\ z_2 &= \exp(-d_2 a) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

была выполнена аппроксимация первых одиннадцати членов входящего в подынтегральную функцию (1) ряда. В результате выполненных

таким образом преобразований подынтегральная функция была представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\text{Sh}^2(a)}{a + \text{Sh}(a) \cdot \text{Ch}(a)} - \frac{2(1-2\nu)}{1-\nu} \cdot \frac{\text{Sh}^2(a) \cdot [1 + \text{Ch}^2(a)] \cdot a}{(a + \text{Sh}(a) \cdot \text{Ch}(a))^2} \cdot \sum_{i=1,3}^{\infty} \frac{i^2 \pi^2}{(a^2 + i^2 \pi^2)^2} \exp\left(-\frac{a^2 + i^2 \pi^2}{H^2} C_\nu t\right) \approx \\ & \approx \sum_{i=1}^{10} a_{0i} T_1^*(z_0) - \frac{2(1-2\nu)}{1-\nu} \sum_{i_0=1}^{11} \exp\left(-\frac{i^2 \pi^2}{H^2} C_\nu \cdot t\right) \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^j a_{ijkl} \cdot z_1^{k-1} \cdot z_2^{l-1}; \\ & z_1^{k-1} \cdot z_2^{l-1} = \exp\left(-\left[(l-1)d_1 \sqrt{\frac{C_\nu \cdot t}{H^2}} + 2d \cdot j\right] \cdot a\right). \end{aligned} \right\} (7)$$

Здесь $a_{ijkl} = a_{1i} a_{2j} \cdot c_k \cdot c_l$, где c_k и $c_l - k$ -ый и l -ый коэффициенты смещенных полиномов Чебышева i -ой и j -ой степени.

Далее с использованием соотношения (6) были аналитически вычислены несобственные интегралы вида:

$$\int_0^{\infty} e^{-az} J_0(ar) dr = \frac{1}{\sqrt{z^2 + a^2}}. \quad (8)$$

В результате равенство (1) было представлено в виде:

$$\left. \begin{aligned} S(r, t) &= \frac{1-\nu}{2\pi G Q} \left\{ \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^i a_{ij} \varphi_j(H, r) - \frac{2(1-\nu)}{1-\nu} \times \right. \\ & \times \left. \sum_{i_0=1}^{11} e^{-\frac{i^2 \pi^2 C_\nu t}{H^2}} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{ijkl} \varphi_{kl}(H, r, t) \right\}; \\ \varphi_j(H, r) &= \begin{cases} \frac{1}{r} & \text{при } j=1; \\ \frac{1}{\sqrt{r^2 + H^2(j-1)^2 d_0^2}} & \text{при } j \neq 1; \end{cases} \\ \varphi_{ijkl}(H, r, t) &= \begin{cases} \frac{1}{r} & \text{при } k=l=1; \\ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (l-1)^2 d_1^2 C_k t}} & \text{при } k=1 \text{ и } l \neq 1; \\ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (k-1)^2 d_{2j}^2 H}} & \text{при } k \neq 1 \text{ и } l=1; \\ \frac{1}{\sqrt{r^2 + \left[(l-1)d_1 \sqrt{\frac{C_k t}{H^2}} + (k-1)d_{2j}\right]^2 \cdot H^2}} & \text{при } k \neq 1 \text{ и } l \neq 1 \end{cases} \quad (9) \end{aligned} \right\}$$

Далее найдем дифференциал осадки в точке $dg(\xi, \eta)$, которая приложена в точке с координатами (x, y) от элементарной силы $dg(\xi, \eta)$ натами (ξ, η) имеем:

$$\left. \begin{aligned} dS &= \frac{(1-\nu)}{2\pi G} dg(\xi, \eta) \left\{ \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^i a_{ij} \varphi_j(H, r, x, y, \xi, \eta) - \frac{2(1-\nu)}{1-\nu} \cdot \sum_{i_0=1}^{11} e^{-\frac{i^2 \pi^2 C_\nu t}{H^2}} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{ijkl} \cdot \varphi_{kl}(H, t, x, y, \xi, \eta) \right\} \\ \varphi_j(H, x, y, \xi, \eta) &= \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} & \text{при } j=1; \\ \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + H^2 d_0^2 (j-1)^2}} & \text{при } j \neq 1; \end{cases} \\ \varphi_{kl}(H, x, y, \xi, \eta) &= \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} & \text{при } k=l=1; \\ \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (l-1)^2 d_1^2 C_k t}} & \text{при } k=1 \text{ и } l \neq 1; \\ \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (k-1)^2 d_{2j}^2 H^2}} & \text{при } k \neq 1 \text{ и } l=1; \\ \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + \left[(l-1)d_1 \sqrt{\frac{C_k t}{H^2}} + (k-1)d_{2j}\right]^2 \cdot H^2}} & \text{при } \begin{matrix} k \neq 1 \\ l \neq 1 \end{matrix} \end{cases} \quad (10) \end{aligned} \right\}$$

Теперь найдем прогиб основания в направлении оси OY [8], т.е. дифференциал крена при действии моментной нагрузки относительно оси OY . Имеем:

$$d i = \frac{\partial s}{\partial x} = - \frac{d g(\xi, \eta)(1 - \nu)}{2 \pi G} \left\{ \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^i a_{ij} \Phi_j^*(x, y, \xi, \eta) - \frac{2(1 - \nu)}{(1 - \nu)} \sum_{i_0=1}^{11} e^{-\frac{i^2 \pi^2 C_k t}{H^2}} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{ijkl} \cdot \Phi_{kl}^*(H, t, x, y, \xi, \eta) \right\};$$

$$\Phi_j^*(x, y, \eta, \xi) = \begin{cases} \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } j=1; \\ \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + H^2 d_0^2 (j-1)^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } j \neq 1; \end{cases}$$

$$\Phi_{i,j,k,l}^*(H, x, y, \xi, \eta) = \begin{cases} \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } k=l=1; \\ \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (l-1)^2 d_1^2 C_k t]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } k=1 \text{ и } l \neq 1; \\ \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (k-1)^2 d_{2j}^2 H^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } k \neq 1 \text{ и } l=1; \\ \frac{1}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + \left\{ (k-1)d_{2j} + (l-1)d_1 \sqrt{\frac{C_k t}{H^2}} \right\}^2 H^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } \begin{matrix} k \neq 1 \\ l \neq 1 \end{matrix} \end{cases} \quad (11)$$

Следующим шагом подставляем в (11) значение дифференциала нагрузки $dg(\xi, \eta)$ и проинтегрируем полученное таким образом выражение по площади фундамента на интервале $\xi \in (-b/2, b/2)$ и $\eta \in (-L/2, L/2)$. При этом положим $x = y = 0$ (в этом случае так найден крен в центре фундамента). Имеем:

$$i = \frac{6 Q e}{\pi G b L^3} = \int_{-b/2}^{b/2} d \eta \int_{-L/2}^{L/2} \xi^2 \left\{ \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} a_{ij} \Phi_j^*(H, \xi, \eta) - \frac{2(1 - \nu)}{(1 - \nu)} \sum_{i_0=1}^{11} e^{-\frac{i^2 \pi^2 C_k t}{H^2}} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{ijkl} \cdot \Phi_{kl}^*(H, \xi, \eta) \right\} d \xi;$$

$$\Phi_j^* = \begin{cases} \frac{1}{(\xi^2 + \eta^2)^{\frac{3}{2}}} & \text{при } j=1; \\ \frac{1}{[\xi^2 + \eta^2 + H^2 d_0^2 (j-1)^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } j \neq 1; \end{cases}$$

$$\Phi_{kl}^* = \begin{cases} \frac{1}{(\xi^2 + \eta^2)^{\frac{3}{2}}} & \text{при } k=l=1; \\ \frac{1}{[\xi^2 + \eta^2 + (l-1)^2 d_1^2 C_k t]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } k=1 \text{ и } l \neq 1; \\ \frac{1}{[\xi^2 + \eta^2 + (k-1)^2 d_{2j}^2 H^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } k \neq 1 \text{ и } l=1; \\ \frac{1}{[\xi^2 + \eta^2 + H^2 \left\{ (k-1)d_2 + (l-1)d_1 \sqrt{\frac{C_k t}{H^2}} \right\}^2]^{\frac{3}{2}}} & \text{при } \begin{matrix} k \neq 1 \\ l \neq 1 \end{matrix} \end{cases} \quad (12)$$

Далее представим, что $\frac{\eta^* \cdot b}{2} = \eta$, В этом случае (12) принимает новый вид:

$$\frac{\xi^* \cdot L}{2} = \xi, \quad t^* = \frac{2 C_k t}{b^2}, \quad m = \frac{L}{b} \text{ и } n = \frac{2 H}{b}.$$

$$i = \frac{3Qe}{\pi Gb^3} = \int_{-1}^1 d\eta^* \int_{-1}^1 \xi^2 \left\{ \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^n a_{ij} \Phi_j^*(\xi^*, \eta^*) - \frac{2(1-\nu)}{(1-\nu)} \sum_{i_0=1}^{11} e^{-\frac{t^2 \pi^2 t}{n^2}} \sum_{i_0=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^j a_{ijkl} \cdot \Phi_{kl}(\xi^*, \eta) \right\} d\xi^*;$$

$$\Phi_j^*(\xi^*, \eta^*) = \begin{cases} \frac{1}{(m^* \xi^{*2} + \eta^{*2})^{3/2}} & \text{при } j=1; \\ \frac{1}{[m^* \xi^{*2} + \eta^2 + d_0^2 (j-1)^2 n^2]^{3/2}} & \text{при } j \neq 1; \end{cases}$$

$$\Phi_{kl}^*(\xi^*, \eta^*) = \begin{cases} \frac{1}{(m^* \xi^{*2} + \eta^{*2})^{3/2}} & \text{при } k=l=1; \\ \frac{1}{[m^* \xi^{*2} + \eta^2 + (l-1)^2 d_1^2 t^*]^{3/2}} & \text{при } k=1 \text{ и } l \neq 1; \\ \frac{1}{[m^* \xi^{*2} + \eta^2 + (k-1)^2 d_{2j}^2 n^2]^{3/2}} & \text{при } k \neq 1 \text{ и } l=1; \\ \frac{1}{\left\{ m^* \xi^{*2} + \eta^{*2} + n^2 \left[(l-1) d_1 \sqrt{\frac{t^*}{n^2}} + (k-1) d_{2j} \right]^2 \right\}^{3/2}} & \text{при } \begin{matrix} k \neq 1 \\ l \neq 1 \end{matrix} \end{cases} \quad (13)$$

Выражения (13) интегрировались методом трапеций [8]. При этом для удобства расчетов табулировались вычисленные по формуле (14) значения относительных кренов i_0 и полученные результаты рассматривались в графическом виде [8].

Заключение

Анализ полученных графических зависимостей позволяет сделать четкие выводы. В процессе фильтрационной консолидации крен расположенного на слое конечной толщины на интервале времени $t \in (0, \infty)$ изменяется в $2(1-\nu)$ раз. При этом если коэффициент Пуассона грунтового скелета $\nu \geq 0,5$, то изменения крена во времени не происходит вообще. Чем выше значение коэффициента Пуассона грунтового скелета водонасыщенного слоя конечной толщины, тем быстрее происходит стабилизация крена фундамента. Чем меньше отношение L/b , тем быстрее завершается процесс развития крена во времени. При прочих равных условиях процесс развития крена фундамента с прямоугольной формой подошвы в сторону его большей стороны характеризуется более медленным затуханием, чем процесс развития крена в сторону меньшей стороны фундамента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунов-Посадов, М. И., Расчет конструкций на упругом основании [Текст]. – 3-е изд. / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – М.: Стройиздат, 1984 – 679 с.
2. Зарицкий, Ю. К. Теория консолидации грунтов [Текст] / Ю. К. Зарицкий. – М.: Наука, 1967 – 270 с.
3. Флорин, В. А. Основы механики грунтов [Текст]. – т. 1 / В. А. Флорин. – М.: Госстройиздат, 1959. – 357 с.
4. Флорин, В. А. Основы механики грунтов [Текст]. – т. 2 / В. А. Флорин. – М.: Госстройиздат, 1961. – 543 с.
5. Тимошенко, С. П. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьир. – М.: Наука, 1966. – 635 с.
6. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 840 с.
7. Ватсон, Д. Н. Теория бесселевых функций [Текст] / Д. Н. Ватсон. – М.: Изд-во иностр. лит., 1949. – 798 с.
8. Бабич, Ф. В. Особенности развития крена прямоугольных фундаментов на водонасыщенном основании для слоя конечной толщины [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Приднепровская гос. академия строительства и архитектуры. – Д., 2006. – 171 с.

Поступила в редколлегию 23.03.2010.
Принята к печати 28.03.2010.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОСІДАНЬ ФУНДАМЕНТІВ ВІД ДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ

Проведено дослідження осідання штампів від впливу динамічного навантаження за допомогою методики з використанням методу скінченних елементів.

Проведено исследование осадки штампа от воздействия динамической нагрузки с помощью методики с использованием метода конечных элементов.

In the article the research of sinking of stamp under the dynamic loading by procedure with the use of finite-element method is conducted.

У процесі експлуатації будівель і споруд у багатьох випадках відбуваються деформації несучих конструкцій, які викликані різними чинниками. Однією з найбільш розповсюджених причин деформацій є вібраційний вплив обладнання, розташованого поблизу несучих конструкцій. Осідання споруд від впливу динамічних навантажень можуть досягати значних розмірів. Про це свідчать спостереження за існуючими спорудами.

Савінов О. О. [5] запропонував визначати динамічне осідання в залежності від коефіцієнта пористості ґрунту, але його методика не має змоги врахувати вплив горизонтальних і обертальних коливань і не завжди може бути застосована із-за складності визначення коефіцієнту пористості у шарах ґрунту під подошвою споруди. Таким чином, аналітичний метод не завжди може описати реальний стан поведінки ґрунту під фундаментом. Вирішити таку проблему можливо при використанні методу скінченних елементів (МСЕ) для розрахунків осідання.

Метою статті є аналіз осідання дослідного штампів від динамічного впливу за допомогою методики, яка базується на використанні МСЕ.

Під час проектування фундаментів з динамічними навантаженнями необхідно створити такі умови роботи, якими забезпечується надійна експлуатація об'єктів. Виникнення надлишкових вібрацій може бути попереджене шляхом оцінювання динамічного стану об'єктів за допомогою комплексу практичних і теоретичних досліджень [4].

При виконанні прогнозування вібраційного впливу на фундаменти споруд важливим є визначення осідання. Осідання фундаменту від динамічного впливу пропонується визначати за

МСЕ, з використанням програмного комплексу «PLAXIS 7.2» за такою методикою [1]:

1. Визначення інженерно-геологічних умов майданчика.

2. Вибір розмірів розрахункової схеми. Необхідною процедурою при здійсненні динамічних розрахунків за МСЕ є складання розрахункової схеми. Це одна із трудомістких і важливих операцій, від якої залежить достовірність одержаного результату розрахунку.

Для об'єкта динамічного впливу необхідно задавати характеристики жорсткості. В розрахунках за допомогою чисельного методу матеріал фундаменту прийнято лінійно-деформованим, суцільним.

Розміри розрахункової схеми по вертикалі необхідно вибирати більшими за величину стисненої зони, визначеної за методом пошарового підсумовування за будівельними нормами, методом еквівалентного шару ґрунту, експресметодом тощо. Нижнім шаром розрахункової схеми може бути твердий, щільний або скельний ґрунт. Розмір розрахункової схеми по горизонталі необхідно вибирати згідно з конкретними завданнями визначення осідань основ і фундаментів формувальних машин.

3. Вибір моделі основи.

При динамічному розрахунку фундаментів за будівельними нормами основу розглядають як пружно-в'язке лінійно деформоване середовище.

Однак розвиток чисельних методів дає змогу, при розрахунку параметрів коливань, наблизити модель ґрунтового середовища до реального. Б. А. Шлефлером [7] досліджено поведінку піщаних зразків в умовах динамічного навантаження МСЕ. Поведінку скелету ґрунту прийнято такою, що задовольняла граничну умову Мора-Кулона. При проведенні розрахунку

ку застосовано ідеально пружно-пластичну модель для відображення нелінійної поведінки ґрунтів, яка заснована на виконанні умови Мора-Кулона. Така модель основи дає більш точні результати за рахунок чіткішої фіксації напруг і деформацій у той чи інший момент навантаження на ґрунт. Пружно-пластична модель, заснована на умові Мора-Кулона, базується на таких параметрах: модуль пружності та коефіцієнт Пуассона, кут внутрішнього тертя і питома зчеплення.

Загальні деформації включають лінійну (пружну) і пластичну частини, причому пластична складова деформацій виникає після досягнення напруженим станом межі пропорційності (текучості, міцності).

Залежність між напругами і деформаціями білінійна. Дана модель деформування ґрунтів передбачає врахування фізичної та геометричної нелінійності, ущільнення в процесі деформування тощо. Сутність МСЕ полягає в тому, що конструкція, що розраховується, розглядається складеним із кінцевого числа окремих елементів простої геометричної форми, щільно прилеглих один до одного і шарнірно скріплених між собою в вершинах цих елементів. Форма і розміри конструкції залишаються незмінними. Для плоскої конструкції найбільш підходить трикутна форма елементів. Суцільне середовище конструкції, що розраховується, після розділення на елементи не втрачає своєї основної якості – воно залишається суцільним, що складається із окремих двовимірних елементів.

Кожен скінченний елемент характеризується матрицею жорсткості, яка встановлює зв'язок між вузловим зусиллям і вузловими переміщеннями елемента в залежності від координат його вузлів і пружних властивостей матеріалу. Також вся конструкція, що розраховується, характеризується узагальненою матрицею жорсткості системи, яка складається із матриць жорсткості всіх елементів, що входять до її складу. На цю матрицю накладаються граничні умови і вузлові зусилля. Після інтегрування матриці жорсткості одержуємо компоненти переміщень в усіх вузлах системи. Основне рівняння руху об'єму, що залежить від часу під впливом динамічного навантаження:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F, \quad (1)$$

де M – матриця мас; u – вектор переміщення; C – матриця затухання; K – матриця жорсткості; F – вектор сили.

Переміщення u , швидкість \dot{u} , прискорення \ddot{u} можуть змінюватися з часом [6]. Величина

$K \cdot u = F$ переписана як і для статичного розрахунку деформації. Матриця K містить властивості жорсткості матеріалу і вектор F містить компоненти навантаження [2].

4. Поділ розрахункової схеми на елементи.

5. Встановлення часу дії динамічного навантаження.

6. Максимальне осідання основи необхідно визначати при досягненні амплітуди вібропереміщення фундаменту.

7. Динамічне осідання фундаменту машини за певний період експлуатації необхідно визначати як суму осідань від кожного з циклів роботи машини за цей період.

Методику визначення осідання, запропоновану автором, перевірено шляхом порівняння величини осідання з даними осідань одержаних експериментальним шляхом професором Д. Д. Барканом [3]. Він наводить результати експериментальних досліджень осідань дослідного металевого штампу. Досліджувались осідання, викликані ударами падаючого вантажу масою 0,882 кг з висоти близько 1 м. Основа являла собою пісок середньої крупності з наступними фізико-механічними характеристиками: питома вага $\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$, кут внутрішнього тертя $\varphi = 30^\circ$, модуль деформації $E = 35 \text{ МПа}$, коефіцієнт водонасичення S_y близько 0,13. Створювалось імпульсне навантаження на заглиблений штамп.

Запропоновано проводити розрахунок осідання штампу з використанням МСЕ в плоскій постановці. По-перше, побудовано розрахункову схему, яка складається із досліджуваного фундаменту, основи. Розмір розрахункової схеми прийнято $1 \times 1 \text{ м}$. Для розрахунку прийнято сітку 15-ти вузлових трикутних скінченних елементів. Для розрахунків осідань використано пружно-пластичну модель основи з використанням умови Мора-Кулона. Процедура розрахунків осідання складалась з поділу розрахункової схеми на елементи з розмірами 0,1 % від її площі. Розрахункова схема складалась із 1006 елементів з середнім розміром сторони 0,05 м. Наступним етапом було встановлення величини динамічного навантаження і часу його дії.

Час дії динамічного навантаження було задано відповідно до кількості ударів, прийнятих під час проведення експериментальних досліджень [3]. Експериментальні дослідження були проведені при кількості ударів до 3000. Визначено величину максимального осідання з використанням чисельного методу від динамічного

впливу від кожних 500 ударів, як показано на рис. 1.

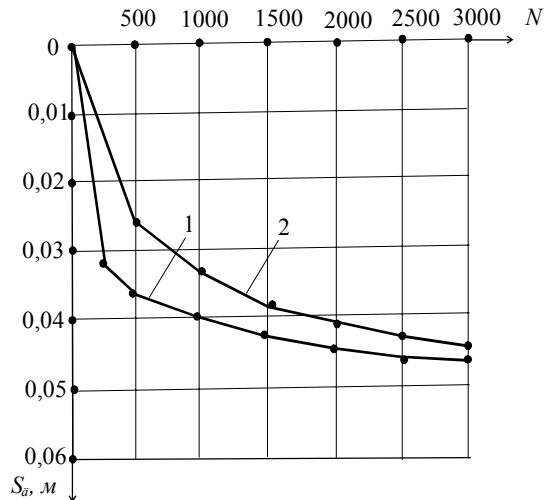


Рис. 1. Графік залежності динамічного осідання від кількості ударів:

- 1 – за запропонованою методикою;
2 – за даними експериментальних досліджень

За результатами досліджень виявлено збіжність запропонованої методики з результатами натурних досліджень, описаних проф. Д. Д. Барканом [3]. Тобто дані осідань штампа, одержані за допомогою методики, що пропонується, і експериментальні дані при кількості ударів від 1000 до 3000 відрізняються на величину до 20 %.

Безперечно, чисельні методи мають суттєві переваги при аналізі осідань фундаментів від

динамічних впливів коливань порівняно з аналітичними методами.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бандуріна, О. В. Аналіз динамічного стану фундаменту формувальної машини [Текст] / О. В. Бандуріна // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій*. – Львів: Каменярь, 2007. – Вип. 7. – С. 388-395.
2. Бандуріна, О. В. Методологічні підходи до вирішення задач динаміки основ і фундаментів [Текст] / О. В. Бандуріна // *Галузеве машинобудування, будівництво (зб. наук. пр.)*. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – Вип. 16. – С. 19-24.
3. Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов [Текст] / Д. Д. Баркан. – М.: Стройвоенмориздат, 1948. – 412 с.
4. Вибрационная безопасность: ГОСТ 12.1.012–90 [Текст] – М.: Государственный стандарт Союза ССР, 1991. – 12 с.
5. Савинов, О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет [Текст] / О. А. Савинов – Л.: Стройиздат, 1979. – 200 с.
6. Brinkgreve, R. B. J. PLAXIS. Version 7 [Електрон. ресурс] / R. B. J. Brinkgreve, P. A. Vermeer. – Rotterdam: A. A. Balkema, 1998. – Режим доступу: <http://www.plaxis.nl>.
7. Strain localization modeling and pore pressure in saturated sand samples [Текст] / В. А. Schrefler *et al.* // *Comput. Mech.* – 1999. – 22, № 3. – P. 266-280.

Надійшла до редколегії 25.02.2010.

Прийнята до друку 01.03.2010.

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Запропоновано економіко-математичну модель розкриття та підготовки шахтного поля, засновану на теорії графів. Модель оптимізовано за фактором мінімальних обсягів проведення підготовчих виробок.

Предложена экономико-математическая модель вскрытия и подготовки шахтного поля, основанная на теории графов. Модель оптимизирована по фактору минимальных объемов проведения подготовительных выработок.

We propose an economic-and-mathematical model of opening and preparation of mine field based on the graph theory. The model is optimized by the factor of minimum amounts of conducting the preparation underground works.

Актуальность

Для решения задач, связанных с проектированием горных предприятий и их дальнейшим развитием, отечественными учеными еще в 70...80-е годы прошлого столетия были разработаны методы количественной оценки параметров горных предприятий на основе экономико-математического моделирования [1 – 6]. В те годы оптимизационные модели строились на основе критерия приведенных затрат. Как ограничения вводились требования по обеспечению заданных объемов производства или качества товарной продукции [4 – 6]. Актуальность задачи оптимизации параметров вскрытия и подготовки шахтных полей обусловлена не только многообразием функциональных связей между отдельными технологическими звеньями, но и тем обстоятельством, что более 60 % общей суммы капитальных затрат, направляемых на поддержание, и 70 % – направляемых на строительство новых выработок, составляют затраты на горные работы. Если рассмотреть граф системы оптимизируемых параметров, то блоки, характеризующие вскрытие и подготовку, определяют множество альтернативных вариантов, как отдельной шахты, так и всего шахтного фонда региона. Поэтому основным вопросом, возникающим при рассмотрении перспектив развития шахт, прежде всего, является обоснованный выбор основных характеристик способов вскрытия и подготовки, решение которого и является целью настоящей публикации.

Постановка задачи

Для решения поставленной задачи разработана экономико-математическая модель, основан-

ная на теории графов и методах оптимального программирования.

Изложения материала и результаты

Главная особенность модели – возможность использования для ее решения потоковых алгоритмов стандартными методами.

При обосновании необходимости векторной оптимизации параметров шахт выбор того или иного метода в значительной мере условно предопределен фактором глубины. Это не случайно, так как во многих случаях необходимо исследовать и транспортные и вентиляционные сети шахт, качество которых во многом определяется состоянием горных выработок.

Сетевые методы оптимизации в принципе позволяют совместно оптимизировать потоки груза и воздуха. Вместе с тем апробация метода показала, что если горные работы ведутся на одном горизонте и вентиляционные сети шахт, разрабатывающих, например, крутые пласты шахт, достаточно стабильны, то, как правило, фактор вентиляции не сдерживает необходимый рост добычи. Однако, совместный синтез транспортных и вентиляционных потоков вызывает серьезные трудности при построении исходного мультиграфа, а недостаточно высокая сходимость задачи отражается на сходимости результата. По этой причине для выделения на исходном мультиграфе частичного подграфа с заданными свойствами предпочтение отдавалось транспортным алгоритмам.

Согласно [3], математическая задача формулируется следующим образом. В m пунктах (очистных забоях) добывается, соответственно, G_1, G_2, \dots, G_m т полезного ископаемого, которое требуется доставить в n пунктов потребления (в

технологический комплекс на поверхности). В противоположном направлении – от поверхности к очистным и подготовительным забоям – подается свежий воздух. Исходя из этого, в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях предполагается сооружение сети из любых технически оправданных капитальных и подготовительных горных выработок. Данную сеть можно формализовать в терминах теории графов следующим образом: каждой дуге поставить в соответствие горную выработку, а вершине – сопряжение горных выработок. На множество дуг B должны быть известны функции затрат C_{ij} (масса дуги) и пропускные способности R_{ij} . Кроме того, в вершинах A задаются интенсивности d . Пунктам производства (очистным забоям) соответствуют положительные интенсивности, пунктам потребления (технологическому комплексу) – отрицательные и перевалочным пунктам (сопряжениям горных выработок, бункерам) – нулевые. При этом в горных выработках возможны следующие варианты:

- грузопоток угля $x^{(1)}$ и поток воздуха $x^{(2)}$;
- только поток воздуха $x^{(2)}$ (вентиляционные выработки);
- только грузопоток угля $x^{(1)}$ (выработки нейтральные по вентиляции).

Исходя из этого, для каждой выработки задаются пропускные способности по углю $R_{ij}^{(1)}$ и воздуху $R_{ij}^{(2)}$ и соответствующие им интенсивности $D_i^{(1)}$ и $D_i^{(2)}$.

Массы дуг будут представлять собой суммарные затраты на проведение, поддержание горной выработки, транспортирование по ней груза, проветривание, кондиционирование воздуха. Затраты на проведение и поддержание выработки в течение всего срока службы шахты зависят от площади ее поперечного сечения F и вида крепи k

$$R_{ijk}^{np} + R_{ijk}^{под} = f_{ijk}^k(F_{ij}). \quad (1)$$

Затраты на транспортирование груза определяются грузопотоком $x^{(1)}$ и видом транспорта:

$$R_{ijk}^{tp} = \varphi_{ijk}^l(x_{ij}^{(1)}). \quad (2)$$

Затраты на проветривание определяются количеством проходящего по выработкам воздуха $x^{(2)}$ и площадью поперечного сечения выработок F :

$$R_{ijk}^b = \varphi_{ijk}^k(x_{ij}^{(2)}, F_{ij}). \quad (3)$$

Затраты на кондиционирование рудничного воздуха определяются температурой воздуха θ_j , проходящего по выработке, и его дебитом:

$$R_{ijk}^{кв} = \eta_{ijk}(\theta_j, x^{(2)}). \quad (4)$$

Т.к. вид транспорта и тип крепи невозможно выразить аналитической зависимостью, для каждой дуги задается несколько сочетаний видов транспорта и крепи k и, следовательно, вершины i и j соединяются несколькими дугами, а исходный граф преобразуется в мультиграф.

Оптимизация параметров вскрытия и подготовки шахтного поля осуществляется для условий каждой конкретной шахты, но с учетом дополнительных ограничений по инвестициям и объему извлекаемых запасов.

Экономико-математическая модель. С учетом изложенного экономико-математическая модель задачи имеет следующий вид.

Минимизировать функцию цели:

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_t [C_{ijkt} x_{ijkt}^{(1)} + K_{ijkt}] \beta_t \rightarrow \min \quad (5)$$

при следующих ограничениях:

- по полноте извлечения запасов в t -м году;

$$x_{ijkt}^{(1)} \geq Z_{ijkt} \varepsilon_t; \quad (6)$$

- по объему добычи в t -м году:

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_t x_{ijkt}^{(1)} \geq D_t^n; \quad (7)$$

- по инвестициям на поддержание мощности:

$$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_t K_{ijkt} y_t \leq K_t; \quad (8)$$

- по пропускной способности выработок:

$$\sum_{k=1}^p x_{ij}^{(1)} \leq r_{ij}^{(1)}, \quad k = 1, 2, \dots, p;$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ij}^{(2)} \leq r_{ij}^{(2)}, \quad k = 1, 2, \dots, p; \quad (9)$$

- по непрерывности потоков груза и воздуха:

$$\sum_{ij} x_{ijk}^{(1)} - \sum_{ij} x_{ijk}^{(1)} = d_i^{(1)};$$

$$\sum_{ij} x_{ijk}^{(2)} - \sum_{ij} x_{ijk}^{(2)} = d_i^{(2)}. \quad (10)$$

Условные обозначения, принятые в модели:

C_{ijkt} – эксплуатационные затраты на добычу;

K_{ijkt} – величина инвестиций на поддержание уровня добычи;

β_t – коэффициент дисконтирования;

Z_{ijkt} – балансовые запасы i -й шахты, подлежащие погашению при k -м варианте развития в t -м году j -го технологического звена;

ε_t – коэффициент извлечения в t -м году;

D_t^n – планируемый объем добычи в t -м году;

u_t – доля инвестиции по каждому звену в t -м году;

K_t – допустимый объем инвестиций.

В основу метода исследования на экстремум приведенной выше экономико-математической модели положена идея эволюционного моделирования и случайного поиска с «двойным возвратом» [4].

Выбор оптимальной структуры и параметров поддержания шахтного фонда начинается с установления положения стартовой точки X_0 , которая определяет исходное состояние поисковой системы. Эта точка принимается центром гиперсферы радиуса R , и с помощью датчика случайных чисел осуществляется реализация n -мерного случайного вектора. В исследуемой области оптимизируемых параметров определяется случайная точка:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + \theta R_i^m; \quad i = 1, 2, \dots; \\ R_i^m &= (r_{i1}^m, r_{i2}^m, \dots, r_{in}^m). \end{aligned} \quad (11)$$

Если точка X_{i+1} удовлетворяет ограничениям модели (6)–(10), то она принимается в качестве стартовой. Если же все заданные S реализаций случайного вектора с проверкой ограничений не привели к успеху, то радиус гиперсферы R сокращается:

$$R^{m_{j+1}} = R^{m_j} k, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где k – параметр сходимости в зависимости от характера ограничений и размеров области поиска ($k = 0,8 \dots 0,99$).

Число случайных проб варьируется в пределах $15 < S < 35$. После этого осуществляется следующая серия пробных испытаний случайных точек на новой поверхности гиперсферы сокращенного радиуса. Процесс вариации радиуса гиперсферы продолжается до соблюдения условия:

$$R^{m_j} - R^{m_{j+1}} > K_R, \quad (13)$$

где K_R – критерий длины радиуса гиперсферы.

В противном случае по формуле:

$$R^{m_{j+1}} = R^{m_j} / K \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (14)$$

строится новая последовательность гиперсфер. При этом для каждого изменения радиуса гиперсферы вычисляются параметры случайных точек, проверяемых по ограничениям задачи. Если в ходе построения t гиперсфер стартовая точка X_0 , удовлетворяющая заданным ограничениям, не определена, то из последней S -й точки, лежащей на поверхности t -й гиперсферы, в случайном направлении производится «большой шаг» L :

$$\begin{aligned} L^K &= (l_1^k, l_2^k, \dots, l_n^k); \\ R^{m_0} &= R^{m_t} + L^k; \quad k = 0, 1, \dots, P. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, полученная случайная точка R будет центром новой гиперсферы, а, следовательно, и очередного цикла поиска стартовой точки.

Собственно «поиск» осуществляется после того, как найдена стартовая точка, удовлетворяющая ограничениям. Из указанной точки в случайном направлении производится s пробных шагов, параметры которых (длина и их число) определяются сложностью функции цели и ограничений. Первый шаг из этой серии, приводящий к изменению функции цели, будет «рабочим», а полученная точка X_i – стартовой:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{i+1}, & \text{ если } F(X_{i+1}) < F(X_i); \\ \bar{X}_{i+1}, & \text{ если } F(X_{i+1}) \geq F(X_i) > F(\bar{X}_{i+1}); \\ X_i, & \text{ если } F(\bar{X}_{i+1}) > F(X_i), \quad i = 0, 1, \dots, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\tilde{X}_{i+1} = X_i + H_i \theta_i$;

$$\bar{X}_{i+1} = \tilde{X}_{i+1} - 2H_i \theta_i;$$

θ_i – случайный вектор, равномерно распределенный в n -мерной единичной гиперсфере;

H_i – величина пробного шага.

Если ни один шаг серии случайных проб не приведет к изменению функционала (1), то длина «малого шага» уменьшается:

$$H_i^{j+1} = H_i^{(j)} k, \quad (17)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots$ – номер рабочего шага;

$j = 0, 1, 2, \dots$ – номер вариации рабочего шага.

Если $H_i < k_w$ (k_w – параметр длины «малого шага»), то из точки X_{i+1} в случайном направлении производится «большой шаг»:

$$X_0 = X_{i+1} + L\theta, \quad (18)$$

где L – величина «большого шага», размер которого должен быть не меньше $3/4$ области оптимизируемых параметров развития шахтного фонда.

Осуществление определенного числа случайных проб при неудачном «малом шаге» в обоих направлениях позволяет системе поиска приобрести глобальные свойства. Последние достигаются за счет того, что, сохраняя некоторое время этот шаг неизменным, система поиска поднимается «по склону» и преодолевает таким образом «хребет» функции цели, после чего с помощью «большого шага» выводится из системы локальных экстремумов в другую случайную область.

Методики реализации алгоритма. Основные этапы подготовки исходной информации и алгоритм решения поставленной задачи на ЭВМ приведены ниже.

1. Построение по каждой i -й шахте мультиграфа вскрытия и подготовки шахтного поля. В соответствии с конкретными горно-геологическими условиями и наличием сооружений на поверхности устанавливаются различные сочетания вскрывающих и подготавливающих выработок, проведение которых целесообразно для поддержания мощности и развития шахты. На основе полученного набора технически возможных сочетаний горных выработок строится мультиграф, отражающий перспективы развития шахты. При этом ориентация дуг мультиграфа должна соответствовать предполагаемым направлениям движения потоков угля и воздуха.

2. Построение матрицы ориентации, которая является главной информационной базой о топологии сети, так как учитывает ориентацию дуг и последовательность исследования вершин исходного мультиграфа.

Матрица состоит из трех строк и столбцов, число которых равно числу дуг мультиграфа. При этом первая строка определяет порядковую нумерацию дуг, вторая – нумерацию вершин исходящих дуг и третья – нумерацию вершин входящих дуг.

3. Построение информационной матрицы. Она состоит из строк, число которых равно числу вершин. Число столбцов зависит от числа очистных забоев, бункеров, сопряжений, технологического комплекса на поверхности, производительности очистных забоев и потребности их в воздухе.

4. Построение матрицы условий, в которой число столбцов равно числу дуг, а число строк зависит от пропускных способностей дуг по грузу и воздуху, наличия или отсутствия пото-

ков по дугам (отмечается соответственно знаками +1 и 0), сроков поддержания горных выработок.

5. Задание видов крепи, транспортных средств и другого горношахтного оборудования составляет в виде отдельных матриц, элементами которых являются технологические и стоимостные параметры.

6. Формирование возможных вариантов развития шахтного фонда производится на основе альтернативного графа оптимизируемых параметров.

7. Подготовка массива исходных данных и ввод информации в ЭВМ. На этом этапе задаются условия включения в процессе оптимизации поисковой системы «большого» и «малого» шагов, количественные параметры мультиграфа (число вершин и дуг, интенсивности источников, пропускные способности и другие параметры, характеризующие топологию сети).

Процесс оптимизации начинается с определения допустимого варианта развития шахтного фонда. При этом в целевой функции учитываются суммарные текущие издержки и единовременные затраты с учетом фактора времени за весь рассматриваемый период.

Выводы

Определение экономически эффективных направлений воспроизводства фондов представляет собой задачу на отыскание оптимума в системе альтернативных решений, т.е. связанную с выбором оптимальных вариантов. Для ее решения наиболее целесообразно использовать дискретные модели путем замены непрерывных, нелинейных функций некоторой таблицей их значений в выбранных точках.

В соответствии с изложенными предпосылками разработана экономико-математическая модель выбора целесообразного варианта развития угольной шахты, использование которой позволит осуществлять обоснованный выбор основных характеристик способов вскрытия и подготовки запасов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдулов, П. В. Математическое программирование в горной промышленности [Текст] / П. В. Авдулов. – М.: МГИ, 1970. – 279 с.
2. Астахов, А. С. Линейное программирование в горном деле [Текст] / А. С. Астахов. – М.: Госгортехиздат, 1964. – 265 с.
3. Резниченко, С. С. Математическое моделирование в горной промышленности [Текст] / С. С. Резниченко. – М.: Недра, 1981. – 216 с.

4. Салли, В. И. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении [Текст] / В. И. Салли. – К.: Вища шк., 1991. – 460 с.
5. Устинов, М. И. Алгоритмизация и программирование задач оптимизации параметров угольных шахт [Текст] / М. И. Устинов, М. Н. Набродов. – М.: Недра, 1971. – 161 с.
6. Экономико-математическое моделирование в проектировании угольных шахт [Текст] / А. М. Курносков и др. – М.: Наука, 1969. – 208 с.
7. Вагонова, А. Г. Экономическое обоснование топологии сети горных выработок [Текст] / А. Г. Вагонова // Управление экономикой переходного периода. – Донецк: ІЕП НАН України, 2005. – С. 241-249.
8. Вагонова, А. Г. К проблеме регулирования качества угольного сырья и диверсификации обогащительного производства [Текст] / А. Г. Вагонова // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 3. – С. 93-96.

Поступила в редколлегию 18.03.2010.
Принята к печати 23.03.2010.

Ю. Л. ВИННИКОВ, М. О. ХАРЧЕНКО (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка)

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЩІЛЬНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ ҐРУНТОВИХ ПОДУШОК ЯК ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

Виконано статистичний аналіз випадкових величин механічних характеристик ущільнених ґрунтів і встановлено закономірності їх розподілу. Зокрема, для модуля деформації, питомого зчеплення і кута внутрішнього тертя отримано логарифмічно нормальний закон розподілу, для опору пенетрації – експоненційний.

Выполнено статистический анализ случайных величин механических характеристик уплотненных грунтов и установлены закономерности их распределения. В итоге, для модуля деформации, удельного сцепления и угла внутреннего трения получен логарифмически нормальный закон распределения, для удельного сопротивления пенетрации – экспоненциальный.

The statistic analysis of variability values of mechanical characteristics of compacted soils is done. Also the laws of their distribution are determined. As a result, it is determined that for the deformation modulus, unit cohesion and internal friction angle the logarithmic normal law of distribution is more correct, while for penetration resistance – exponential law.

Варіювання значень механічних характеристик ґрунтів як природних, так і ущільнених масивів значно більше за розкид аналогічних величин в інших матеріалах будівельних конструкцій. Зокрема, згідно з ДСТУ Б В.2.1-5-96 «ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань» інженерно-геологічний елемент вважається однорідним, якщо величина коефіцієнта варіації для його фізичних властивостей не перевищує $v = 15\%$, а для механічних – $v = 30\%$. Ці значення значно перевищують, наприклад, призмову міцність бетону на стиск ($v = 13,5\%$) і на розтяг ($v = 11,2 \dots 15,5\%$), модуль пружності бетону ($v = 4,4 \dots 9,2\%$), міцність арматурної сталі на розтяг ($v = 5 \dots 9,4\%$), межу текучості сталі ($v = 4,6 \dots 7,3\%$), міцність скла ($v = 6\%$) і навіть міцність фанери ($v = 24,3\%$) [1–4] тощо.

Деформації та напруження основ, фундаментів і споруд доцільно представляти у вигляді просторово-часових випадкових полів, властивості яких залежать від неоднорідності ґрунтового масиву, а також від просторових і часових флуктуацій зовнішніх навантажень. Отже, оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) як природних, так і штучних основ будівель і споруд є задачею ймовірісно-статистичних досліджень.

Випадкові величини (ВВ), до яких відносять і властивості ґрунтів, повністю характеризуються кривими розподілу (КР). Залежно від особливостей тих чи інших ґрунтів КР їх ВВ можуть мати різний вигляд. За М. М. Єрмолає-

вим [5], М. М. Масловим [6], В. І. Крутовим [7], А. П. Пшенічкіним [8], V. Wijeyakulasuriya, B. Look [9], Z. Mlynarec, J. Wierzbicki [10], КР значень, головним чином, фізичних характеристик ґрунтів відповідають закону нормального розподілу Гаусса. М. Н. Гольдштейн [11] прогнозував, що для механічних властивостей ґрунтів найбільш коректним має бути логнормальний (логарифмічно нормальний) розподіл. За дослідженнями О. К. Бугрова та В. Г. Шиліна [12], стохастичні властивості ґрунтів найточніше описуються нормальним покращеним і Грама-Шарльє ЗР ВВ.

Таким чином, досі експериментально недостатньо обґрунтовано коректність ЗР ВВ механічних характеристик ущільнених ґрунтів, оскільки для штучних масивів подібні дослідження майже не виконувались. У цьому напрямку відомі лише роботи Л. М. Тимофєєвої [13], І. Г. Чарушнікова [14], Б. І. Баликова [15] й авторів [16]. Згідно з цими дослідженнями найбільш вірогідними є нормальний, логарифмічно нормальний та експоненційний ЗР цих ВВ.

Коректно отримані статистичні закономірності ЗР ВВ дозволять розробити методіку розрахунку ґрунтових подушок із урахуванням неоднорідності властивостей ущільненого масиву [17, 18], зокрема, і при використанні методу скінченних елементів (МСЕ) [19].

Тому за **метою роботи** прийнято – експериментально дослідити ЗР ВВ механічних характеристик ущільнених ґрунтів, зокрема, їх моду-

ля деформації, питомого зчеплення, кута внутрішнього тертя та питомого опору penetрації.

Авторами протягом 2006...2010 рр. виконувалися польові та лабораторні дослідження фізико-механічних характеристик ущільнених ґрунтів штучних основ для кількох будівельних об'єктів, зокрема, протитуберкульозного диспансеру по вул. Шилівській у Полтаві (об'єкт № 1), двох резервуарів під нафтопродукти ємністю 3000 м³ у с. Качанове Гадяцького району Полтавської обл. (об'єкт № 2), споруд електрометалургійного заводу потужністю 3 млн. т. слябів на рік поблизу м. Комсомольськ Полтавської обл. (об'єкт № 3).

Технологічні параметри ґрунтової подушки на об'єкті № 1 наступні: матеріал – місцевий лесовий суглинок легкий пілуватий із вологістю на межі текучості $W_L = 0,29$ і розкочування $W_p = 0,21$. Ущільнення ґрунту дна котловану було поверхнєве за допомогою важкої трамбівки. Поверх дна зводилась штучна основа відсіпанням суглинку шарами по 50 см з укочуванням завантаженими самоскидами масою 20 т за 8...12 проходів за одним слідом до проектного значення щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,65$ г/см³ при коефіцієнті ущільнення $k_s = 0,90$. Потужність подушки відповідала її проектному значенню $h = 4,0...4,4$ м.

На об'єкті № 2 ґрунтова подушка під резервуари мала товщину близько 3 м і діаметр 22 м. Її виконали з місцевих лесових пілуватих супісків і суглинків (число пластичності $I_p = 5,3...15,8$ %), які пошарово укочували 10...12 проходками за одним слідом завантаженими самоскидами та 12...14 ударами за одним слідом трамбівки у формі конусу з нижнім і верхнім діаметрами відповідно 930 і 430 мм, висотою 800 мм і масою 2 т, яку скидали з висоти 5...6 м (рис. 1, а).

На об'єкті № 3 штучний насип площею 190 га та потужністю 4...5 м зводили на заболоченій місцевості з використанням розкривних порід Єристовського та Лавриковського родовищ залізних кварцитів. Для зміцнення основи насипу заболочений масив прорізали траншеями перерізом 1x1,5 м із кроком 3 м, які заповнювали щебенем. Потім розкривні породи доставлялись на майданчик, розрівнювались шарами потужністю 0,3 м й ущільнювались пневматичними та вібраційними котками (рис. 1, б) до проектного значення щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,711$ г/см³ при коефіцієнті ущільнення $k_s = 1,01$ за тестом Проктора.

Фізико-механічні характеристики ущільнених ґрунтів на всіх дослідних об'єктах визначали у кожному шарі штучної основи відбором ґрунту в металеві кільця площею поперечного

перерізу 40 см² та об'ємом 140 см³ (діаметром і висотою відповідно близько 70 і 35 мм), а потім транспортували та зберігали згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.1-8-2001 «Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків» і ДБН А.2.-1-2008 «Інженерні вишукування для будівництва». Визначення механічних властивостей ґрунтів виконували згідно з ДСТУ Б В.2.1-3-96 «Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення», ДСТУ Б В.2.1-4-96 «Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності», ДСТУ Б В.2.1-5-96 «Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань».



Рис. 1. Технологія зведення дослідних ґрунтових подушок:
а – під резервуар ємністю 3000 м³; б – під споруди електрометалургійного заводу

Деформаційні показники визначалися шляхом ущільнення зразків ґрунту під тиском без можливості бічного розширення. Дослідження проводились на приладі для компресійних випробувань КПР-1 прикладанням тиску ступенями $\sigma = 0,025; 0,05; 0,10; 0,20; 0,30$ МПа.

Пенетраційні дослідження в лабораторії виконувались за такою методикою: після досягнення умовної стабілізації деформацій ґрунту кільце зі зразком виймали з ущільнювача й здійснювали penetрацію ґрунту з використанням лабораторного пенетрометра ЛП-1 наконечником із кутом конічності 30° при чотирьохп'яти ступенях навантаження й кінцевому зануренні конусу $h \geq 1$ см. Навантаження на першій ступені – 0,66...0,76 Н (вага конусу зі шта-

нгою), на наступних – залежно від виду і стану ґрунту. Інтервал прикладання навантаження – 0,5 хв. Глибину занурення конусу визначали за шкалою індикатора годинникового типу з точністю 0,01 см. Після компресії та penetрації зразки випробували у приладі одноплощинного зрушення ПСГ-2М.

Зокрема, за цією методикою на об'єкті № 1 було відібрано 78 зразків ґрунту при горизонтальній орієнтації кілець і 28 – при вертикальній. При цьому отримано $n = 55$ комплексів значень (n – кількість ВВ) модуля деформації ґрунту E при різних тисках у компресійному приладі й змінність характеристик міцності ущільненого ґрунту за глибиною подушки. Для об'єкту № 2 – $n = 108$ ВВ опору penetрації ґрунту R . На об'єкті № 3 отримано $n = 374$ комплексів ВВ модуля деформації E при різних ти-

сках у компресійному приладі, $n = 50$ ВВ кута внутрішнього тертя φ і питомого зчеплення ґрунту c .

Для аналізу експериментальних даних застосовано наступний алгоритм методики [1]:

1. визначалась необхідна кількість дослідних даних;

2. після отримання експериментальних даних у польових і лабораторних умовах у вигляді статистичного ряду вони аналізувались з метою виключення грубих помилок;

3. для «очищеного» ряду розраховувались статистичні параметри;

4. підбирався оптимальний ЗР для дослідних ВВ і перевірялась його адекватність.

У табл. 1 зведені статистичні параметри ВВ механічних характеристик ущільнених ґрунтів для дослідних об'єктів.

Таблиця 1

Статистичні параметри експериментальних ЗР ВВ механічних властивостей ущільненого ґрунту

| Статистичні параметри | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 | \bar{X} | \hat{X} | μ_3 | μ_4 | σ | ν | A | E |
|--|-------|-------|--------|-------|-----------|-----------|---------|---------|----------|-------|------|------|
| Об'єкт № 1 | | | | | | | | | | | | |
| Модуль деформації E , МПа, при тиску $\sigma = 0,05 \dots 0,1$ МПа | 1,15 | 4,75 | 19,58 | 109,2 | 5,18 | 3,78 | 7,27 | 62,88 | 1,95 | 0,38 | 0,99 | 1,39 |
| E , МПа, при тиску $\sigma = 0,1 \dots 0,2$ МПа | 1,68 | 6,28 | 33,04 | 214,8 | 10,6 | 37,7 | 390,1 | 8935 | 6,14 | 0,57 | 1,68 | 3,28 |
| E , МПа, при тиску $\sigma = 0,2 \dots 0,3$ МПа | 0,43 | 4,87 | 18,32 | 117,5 | 13,4 | 48,6 | 408,8 | 9840 | 6,97 | 0,52 | 1,21 | 1,16 |
| Об'єкт № 2 | | | | | | | | | | | | |
| Питомий опір penetрації R , кПа | -4,3 | 23,2 | -136,1 | 853,6 | 436 | 62706 | 88974 | 10^9 | 250 | 0,57 | 0,57 | -0,2 |
| Об'єкт № 3 | | | | | | | | | | | | |
| E , МПа, при тиску $\sigma = 0 \dots 0,05$ МПа | -3,6 | 14,8 | -62,2 | 275,6 | 8,55 | 21,7 | 187,9 | 3669 | 4,66 | 0,55 | 1,86 | 4,78 |
| E , МПа, при тиску $\sigma = 0,05 \dots 0,1$ МПа | 0,06 | 0,95 | 2,02 | 13,4 | 7,64 | 10,2 | 65,67 | 1514 | 3,19 | 0,41 | 2,01 | 11,5 |
| E , МПа, при тиску $\sigma = 0,1 \dots 0,2$ МПа | 0,14 | 1,43 | 3,61 | 20,23 | 12,6 | 19,8 | 158,4 | 3630 | 4,45 | 0,35 | 1,79 | 6,23 |
| E , МПа, при тиску $\sigma = 0,2 \dots 0,3$ МПа | 0,64 | 1,84 | 5,05 | 22,22 | 19,4 | 41,1 | 312,6 | 10975 | 6,42 | 0,33 | 1,18 | 3,47 |
| Питоме зчеплення ґрунту c , кПа | 0,9 | 2,3 | 7,05 | 27,2 | 16 | 16,2 | 82,58 | 1308 | 4,03 | 0,25 | 1,26 | 1,97 |
| Кут внутрішнього тертя ґрунту φ , ° | -0,9 | 2,4 | -7,10 | 26,1 | 31,3 | 10,9 | -38,87 | 514 | 3,3 | 0,11 | -1,1 | 1,31 |

Примітка: $M_1 \dots M_4$ – моменти 1...4 порядків; \bar{X} – математичне очікування; \hat{X} – дисперсія; μ_3 – центральний момент третього порядку; μ_4 – центральний момент четвертого порядку; σ – середнє квадратичне відхилення (стандарт); ν – коефіцієнт варіації; A – коефіцієнт асиметрії; E – ексцес.

На рис. 2 представлені найбільш типові експериментальні гістограми й аналітичні ЗР ВВ E для різних тисків у компресійному приладі, а на рис. 3 – для R , φ та c .

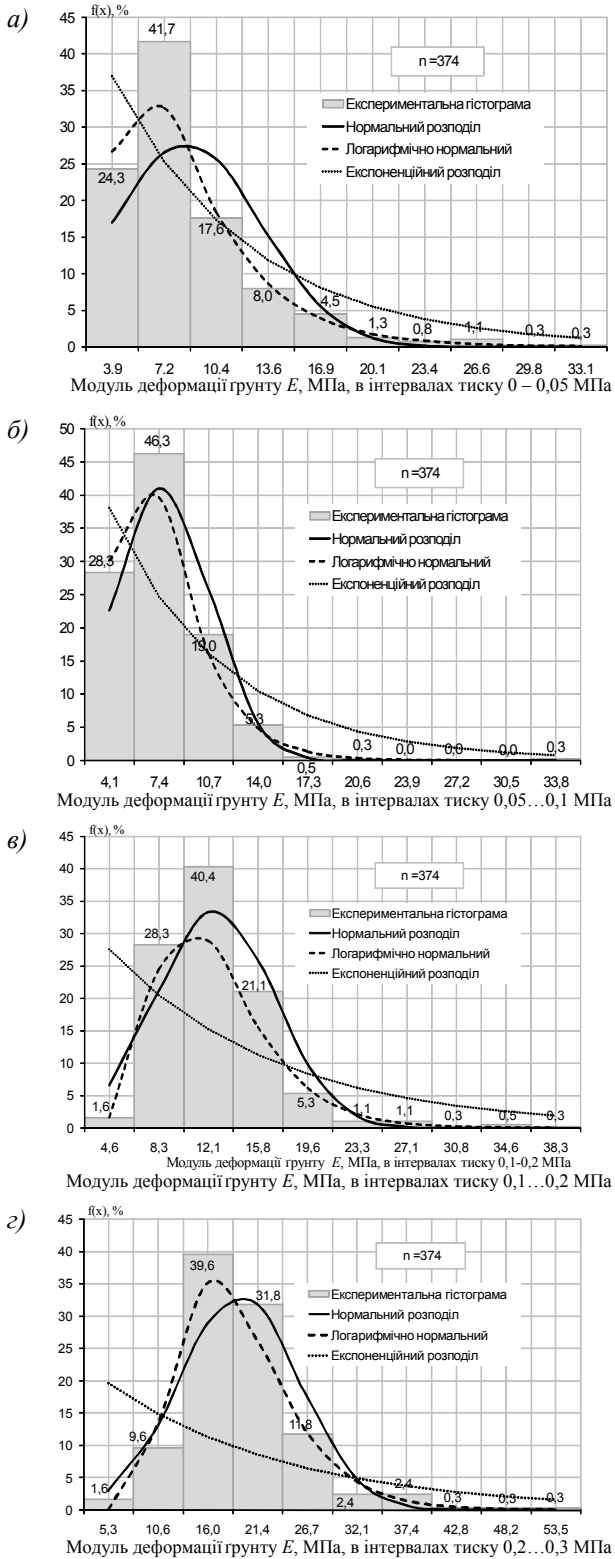


Рис. 2. Типові експериментальні гістограми і закони розподілу ВВ модуля деформації ущільненого ґрунту при різних тисках у компресійному приладі (дослідний об'єкт № 3)

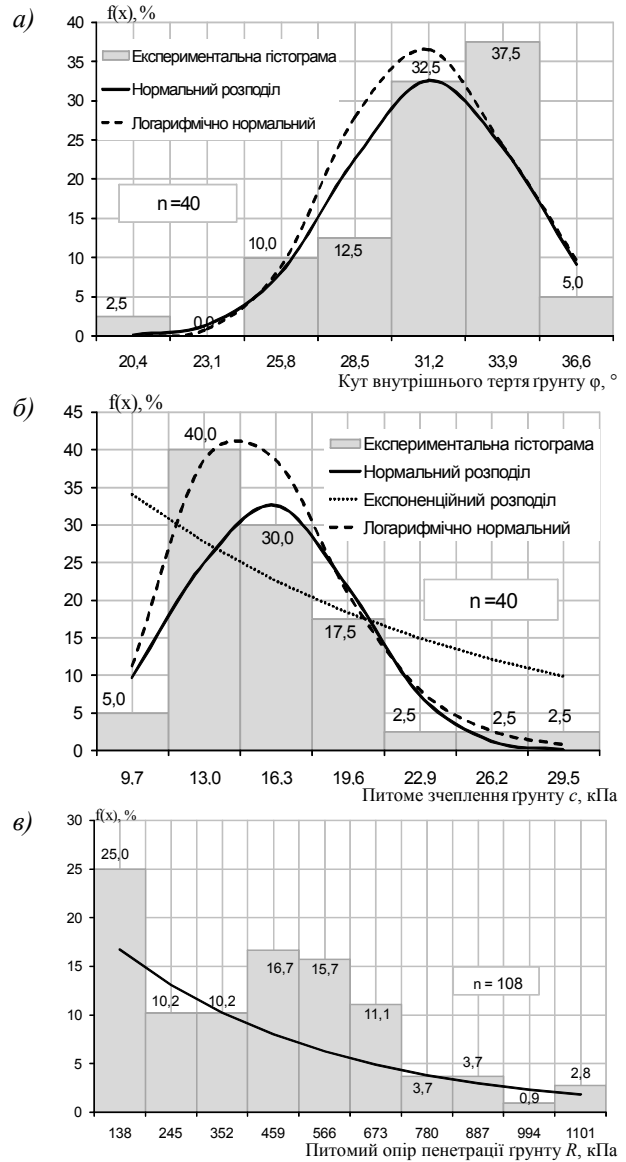


Рис. 3. Типові експериментальні гістограми і закони розподілу ВВ механічних характеристик ущільненого ґрунту: а – кута внутрішнього тертя (об'єкт № 3); б – питомого зчеплення (об'єкт № 3); в – питомого опору penetрації (об'єкт № 2)

Аналізуючи експериментальні й аналітичні розподіли ВВ модуля деформації ущільненого ґрунту (рис. 2), кута внутрішнього тертя (рис. 3, а) і питомого зчеплення (рис. 3, б), можна зробити узагальнення про те, що для них найбільш коректним є логарифмічно нормальний ЗР. Зокрема, критерій Пірсона $\chi^2_{\text{досл.}}$ для аналітичних кривих ВВ модуля деформації склав 3,3 (рис. 2, а), 2,53 (рис. 2, б), 8,03 (рис. 2, в), 3,95 (рис. 2, г); кута внутрішнього тертя – 4,12 (рис. 3, а) і питомого зчеплення – 16,92 (рис. 3, б). Отже, нашими дослідженнями фактично підтверджена гіпотеза М. Н. Гольдштейна [8].

Розподіл ВВ значень питомого опору penetрації ущільненого ґрунту (рис. 3, в) найкраще апроксимується експоненційним ЗР, хоча у деяких інтервалах спостерігаються достатньо значні відхилення від аналітичної кривої, що підтверджується критерієм Пірсона $\chi^2_{\text{досл.}} = 34,4$. Таким чином, розподіл ВВ цієї характеристики потрібно ще додатково вивчати. Для цього доцільно, крім лабораторних penetраційних випробовувань, виконувати і польові.

Висновки

Механічні характеристики ущільнених ґрунтів найбільш коректно описуються логарифмічно нормальним та експоненційним ЗР. Зокрема, для опору penetрації R у багатьох випадках правомірним є експоненційний ЗР, а для модуля деформації E , питомого зчеплення c і кута внутрішнього тертя φ – логарифмічно нормальний.

Дані досліджень є певною базою для ймовірнісних розрахунків ґрунтових подушок. Зокрема, вони відкривають можливість аналітично визначати розрахунковий опір ущільнених ґрунтів й осідання фундаментів на них як випадкових функцій, виконувати математичне моделювання геотехнічних задач для штучних основ за допомогою МСЕ в імовірнісній постановці, а в перспективі – оцінювати рівень надійності споруд як системи «ґрунтова подушка-фундамент-будівля» тощо.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Лычев, А. С. Надежность строительных конструкций [Текст] : учебное пособие / А. С. Лычев. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 184 с.
2. Чирков, В. П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций [Текст] / В. П. Чирков. – М.: Маршрут, 2006. – 620 с.
3. Надежность стальных конструкций производственных зданий [Текст] : монография / под ред. С. Ф. Пичугина. – Полтава: ООО «Асми», 2009. – 452 с.
4. Зоценко, М. Л. Використання «хвостів» Полтавського ГЗК при влаштуванні земляних споруд [Текст] / М. Л. Зоценко // Світ геотехніки. – 2005. – № 4. – С. 7-11.
5. Ермолаев, М. Н. Надежность оснований и фундаментов [Текст] / М. Н. Ермолаев, В. В. Михеев. – Л.: Стройиздат, 1976. – 152 с.
6. Маслов, Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов [Текст] / Н. Н. Маслов. – М.: Высш. шк., 1982. – 511 с.
7. Крутов, В. И. Физико-механические характеристики неоднородных уплотненных грунтов [Текст] / В. И. Крутов, Н. Т. Танатаров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1993. – № 3. – С. 2-5.
8. Пшеничкин, А. П. Определение вероятностных оценок физических и деформационных характе-

- ристик грунтовых полей [Текст] / А. П. Пшеничкин // Тр. межд. конф. по геотехнике «Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика». – СПб.: АСВ, 2005. – Т. 2. – С. 323-329.
9. Look, B. Statistical models for reliability assessment of rock strength [Текст] / B. Look, V. Wijeyakulasuriya // Proc. of the 17th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press, 2009. – P. 60-63.
 10. Mlynarec, Z. Statistical criteria of determination of homogenous geotechnical layers [Текст] / Z. Mlynarec, W. Tschuschke, J. Wierzbicki // Proc. of the 16th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Rotterdam Mill press Science Publishers, 2005. – P. 725-728.
 11. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов [Текст] / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971...1979. – Т. I. – 1971. – 368 с., Т. II. – 1973. – 375 с., Т. III. – 1979. – 304 с.
 12. Бугров, А. К. Определение вероятностных характеристик активного давления грунта методом Монте-Карло [Текст] / А. К. Бугров, В. Г. Шилин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – № 5. – С. 92-94.
 13. Тимофеева, Л. М. О статистическом подходе к оценке прочности уплотненных лессовых грунтов [Текст] / Л. М. Тимофеева // Основания и фундаменты: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь: ППИ, 1978. – С. 78-83.
 14. Чарушников, И. Г. Прочностные характеристики уплотненных просадочных грунтов Новосибирска [Текст] / И. Г. Чарушников, Я. Е. Шаевич // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – № 5. – С. 10-11.
 15. Бальков, Б. И. Способ оценки представительности проб крупнообломочного грунта при инженерно-геологических изысканиях и геотехконтроле качества уплотнения [Текст] / Б. И. Бальков // Инженерная геология. – 2007. – С. 21-25.
 16. Винников, Ю. Л. К оценке неоднородности сложения грунтовых подушек [Текст] / Ю. Л. Винников, М. А. Харченко, А. В. Яковлев // Материалы V Межд. науч.-техн. конф. «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов». – Волгоград: ВолГАСУ, 2009. – С. 193-200.
 17. Михеев, В. В. Расчет крупнопанельных зданий на статистически неоднородном основании [Текст] / В. В. Михеев, Г. Б. Рывкин, В. И. Шейнин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – № 2. – С. 21-23.
 18. Гарагаш, Б. А. Надежность пространственных регулируемых систем «сооружение – основание» при неравномерных деформациях основания [Текст] / Б. А. Гарагаш. – Сочи: Кубанькино, 2004. – 908 с.
 19. Гагин, В. И. Расчет балок на многослойном стохастическом основании [Текст] / В. И. Гагин, П. М. Иванилов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 3. – С. 61-64.

Надійшла до редколегії 10.03.2010.

Прийнята до друку 17.03.2010.

В. Ф. ГРЕЧКО, О. В. ГРЕЧКО (Запорожское отделение ГП «Государственный НИИ строительных конструкций»)

ОПЫТ УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ АВАРИЙНОГО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА

Зведення каскаду гідроелектростанцій в річці р. Дніпро супроводжувались створенням штучних водосховищ. Зміна гідрогеологічних умов спричинила підтоплення прилеглих територій і необхідність забезпечення експлуатаційної придатності розташованих на них будівель і споруд. Наведено результати робіт по відбудові автомобільного шляхопроводу над залізничним полотном з інтенсивним рухом поїздів в місті Нікополь Дніпропетровської області, розташованого на березі Каховського водосховища. В надземних конструкціях шляхопроводу, за більш ніж 40 років експлуатації, виникли неприпустимі деформації, причиною яких є нерівномірні осідання фундаментів опор. Нерівномірність осідань фундаментів досягла 600 мм. Осідання фундаментів виникли в результаті змін фізико-механічних характеристик лесових ґрунтів внаслідок підняття рівня підземних вод.

Возведение каскада гидроэлектростанций в русле р. Днепр сопровождалось созданием искусственных водохранилищ. Изменение гидрогеологических условий привело к подтоплению прилегающих территорий и необходимости обеспечения эксплуатационной пригодности расположенных на них зданий и сооружений. Приводятся результаты работ по восстановлению автомобильного путепровода над железнодорожным полотном с интенсивным движением поездов в городе Никополь, Днепропетровской области, расположенного на берегу Каховского водохранилища. В надземных конструкциях путепровода, за более 40 лет эксплуатации, произошли недопустимые деформации, причиной которых явились неравномерные осадки фундаментов опор. Неравномерность осадок фундаментов достигла 600 мм. Осадки фундаментов произошли из-за изменения физико-механических характеристик лёссовых грунтов основания вследствие поднятия уровня подземных вод.

The creation of the cascade of hydroelectric power stations in Dnepr-river channel was accompanied by creation of artificial water basins. Change of hydro-geological conditions has resulted in flooding of adjoining territories and necessity of maintenance of the operational suitability of buildings and constructions located on them. The results of works on restoration of automobile overbridge above railroad tracks with intensive movement of trains in the city of Nikopol located on the coast of Kakhovskoe water basin are presented. During operation more than 40 years, the inadmissible deformations in the above-ground overbridge constructions, caused by non-uniform settlements of foundations of supports, have taken place. The non-uniformity of foundations settlements has achieved 600 mm. The foundations settlements were due to the changes of physical-and-mechanical characteristics of loessial soil of foundation owing to heaving of the underground water level.

Автомобільний путепровод над ж/д путями у станції Нікополь по ул. Електрометаллургов – чотирьохпролітний із сборного залізобетона. Геометрична схема споруди – 14,06 + 2х32,96 + 14,06 (м). Розрахункові тимчасові навантаження – Н-18; НК-80. Побудований в 1963 г. по проекту Харківського відділення «Промстрой-проекта».

В плані путепроводу розташований по прямій, в профілі на односторонньому ухилі. Підходи до путепроводу виконані в насипах, висотою до 8 метрів.

Пролітні споруди – балочні розрізи. Середні проліти перекриті переднапруженими залізобетонними пролітними спорудами, крайні – із звичайного залізобетона. В поперечному сеченні пролітні споруди складаються із 13 Т-образних балок, об'єднаних

між собою діафрагмами, причому, в крайніх пролітах об'єднання здійснено шляхом зварки закладних деталей, а в середніх – шляхом натягнення пучків поперечної арматури.

Всі опори путепроводу мають стовпчасту конструкцію. Кожна з них складається із двох рядів стоек, об'єднаних по верху монолітними ригелями. Стойки опор – сборні, трубчастого сечення, заповнені бетоном і піском.

Ґрунтові умови площадки на момент проектування характеризувалися наявністю лесових відкладень у вигляді супісців і суглинків потужністю 25...26 м, підстиляємих на глибині 37 м скальними породами, а також відсутністю підземних вод. Фундаменти під опори путепроводу запроектовані і зведені у вигляді монолітних залізобетонних лент шириною 4,2 м і довжиною 18 м. Незважаючи на ого-

воренные в проекте условия возведения фундаментов на слое уплотненного грунта, применение фундаментов мелкого заложения в данных грунтовых условиях оказалось неоправданным.

Деформации путепровода наблюдались, начиная с 1966 г. В течение десятилетий эксплуатация путепровода требовала ремонтных работ из-за местных утечек воды из трубопроводов и общего повышения уровня подземных вод.

В 2001 г. сотрудниками института выполнено обследование сооружения и классифицировано его техническое состояние как аварийное.

Зафиксированы повороты опор, крены стоек, нарушения узлов сопряжения пролётных конструкций, а также дальнейшее развитие этих процессов во времени. Основной причиной аварийного состояния путепровода явились неравномерные осадки фундаментов опор, проявившиеся в результате неучтённых проектом сложных инженерно-геологических условий площадки. Проверочный расчёт основания показал, что несущая способность грунтов основания меньше расчётных нагрузок, передаваемых фундаментами опор (нарушены требования по предельным состояниям I группы).

Детальное исследование грунтовых условий площадки застройки показало, что в геологическом отношении в разрезе по оси путепровода принимают участие следующие грунтовые напластования:

1. Насыпной слой представлен суглинком желтовато-серым, коричневатобурый от твердой до текучепластичной консистенции. Слой встречен всеми разведочными скважинами. Мощность слоя 2,8...4,8 м.

2. Почвенный слой представлен суглинком темно-бурый, с примесью растительных остатков, макропористым, просадочным, от твердой до тугопластичной консистенции. Слой распространен повсеместно. Мощность слоя 0,5...0,6 м.

3. Суглинок лессовый палево-серый, макропористый с включением карбонатных «журавчиков», от мягкопластичной до текучей консистенции. Слой распространен повсеместно. Мощность слоя 5,0...6,2 м.

4. Лесс палевый, текучей консистенции. Слой встречен всеми скважинами. Мощность слоя 2,0...5,9 м.

5. Суглинок лессовый, палево-бурый, местами коричневатобурый, с прослоями лесса палевого текучего, включениями карбонатных «журавчиков», от тугопластичного до текуче-

пластичного. Слой распространен повсеместно. Мощность слоя 9,1...12,7 м.

6. Лесс палево-серый, текучий. Слой встречен всеми скважинами. Мощность слоя 6,5...7,9 м.

7. Суглинок палевый, палево-бурый, зеленовато-серый от твердой до полутвердой консистенции. Слой распространен повсеместно. Мощность слоя 6,5...7,9 м.

8. Дресвяно-щебенистый грунт с песчаным заполнителем, в кровле слоя с суглинистым заполнителем, водонасыщенный. Слой встречен всеми разведочными скважинами. Мощность слоя 1,3...2,4 м.

9. Гранит.

Уровень подземных вод обнаружен на глубинах 4,3...4,7 м и практически достиг подошвы фундаментов. Основанием фундаментов опор путепровода на момент обследования являются обводненные лессовые суглинки естественного сложения.

Для предупреждения дальнейших осадков опор путепровода признано целесообразным выполнить усиление фундаментов опор путепровода подведением буроинъекционных свай. Исходя из инженерно-геологических и гидрогеологических условий, опорным слоем под сваи принят слой ИГЭ-9 (гранит) с условием заглубления нижнего конца сваи на 0,5 м.

После проведения полевых статических испытаний опытных свай, выполненных в непосредственной близости от действующего путепровода, произведен выбор оптимальной конструкции буроинъекционной сваи.

Допускаемая нагрузка на отдельную сваю диаметром 250 мм с усиленным армированием (8 × Ø20 АШ в верхней части до глубины 15,7 м и 4 × Ø20 АШ до отметки залегания опорного слоя) принята 690 кН.

Для обеспечения производства работ по усилению фундаментов и безопасности движения поездов по железнодорожному полотну вокруг опоры № 2 и частично вокруг опоры № 3 выполнено оконтуривающее шпунтовое ограждение. Шпунтовое ограждение выполнялось при помощи одного ряда буроинъекционных свай Ø250 мм с шагом в плане 1,0 м и длиной 7,5 м. Поверху сваи объединялись армированным железобетонным ростверком.

После выемки грунта в пределах шпунтового ограждения выполнялся основной комплекс работ по усилению фундаментов. Для подведения свай под фундаменты через железобетонную плиту устраивались отверстия при помощи специальных коронок. Бурение скважин под

глинистым раствором осуществлялось до скалы с поверхности подмостей, установленных в уровне верха стаканов опор. Общий вид усиленного фундамента приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид усиливаемого фундамента

После установки арматурного каркаса выполнялось бетонирование ствола сваи.

Арматура свайных каркасов объединялась ростверком между собой и со стаканной частью опор.

В процессе производства работ выполнялся мониторинг деформаций опор путепровода при помощи локальной измерительно-информационной системы.

После окончания строительно-монтажных работ по устранению аварийности автодорожного путепровода над железнодорожными путями с интенсивным движением подвижного состава прошло 8 лет.

За время эксплуатации, в указанный период, конструкции путепровода остаются в технически удовлетворительном состоянии. Осадки опор стабилизированы.

Накопленный опыт позволил продолжить внедрение усиления фундаментов при помощи

подведения буроинъекционных свай на объектах, претерпевающих неравномерные осадки. В 2009 г. начато усиление ленточных железобетонных фундаментов аварийного девятиэтажного жилого дома в городе Николаеве, возведенного на просадочных грунтах без специальной подготовки основания.

ВЫВОДЫ

1. Обследование и анализ причин деформируемых сооружений необходимо выполнять комплексно, включая тщательное исследование основания, геологических и гидрогеологических условий площадки застройки.

2. При эксплуатации деформируемых сооружений рекомендуется выполнять мониторинг при помощи измерительно-информационной системы.

3. Приведенные факторы стабильной эксплуатации путепровода свидетельствуют о правильности выбранного инженерного решения по усилению фундаментов, расположенных на обводненных лессовых грунтах, при помощи подводки буроинъекционных свай-стоек.

4. Положительный опыт позволяет рекомендовать усиление фундаментов при реконструкции, а также деформированных зданий и сооружений буроинъекционными сваями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.02.01-83 Основания зданий и сооружений [Текст]. – М.: Стройиздат, 1985. – 41 с.
2. ДБН В.1.1-5-2000 Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах [Текст] / Госстрой Украины. – К., 2000. – 86 с.
3. ВБН В.2.1-1-97 Усиление фундаментов зданий и сооружений, возведенных на лёссовых грунтах, буроинъекционными сваями [Текст] / Украинская государственная корпорация по выполнению монтажных и специальных строительных работ. – К., 1997. – 57 с.

Поступила в редколлегию 12.03.2010.

Принята к печати 15.03.2010.

А. О. ГУРЖІЙ (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка)

РОБОТА ЗБІРНИХ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА (ПУЛЬПОВОДІВ) НА НАМИВНИХ ҐРУНТАХ ХВОСТОСХОВИЩА ҐЗК

Розглянуто результати вивчення впливу деформацій дамб хвостосховища на пульповоди. Пропонується при проектуванні трас пульповодів проводити розрахунки деформацій основи під пульповодом для обґрунтування захисту пульповодів від руйнування.

Рассмотрены результаты изучения влияния деформаций дамб хвостохранилища на пульповоды. Предлагается при проектировании трас пульповодов проводить расчеты деформаций основы под пульповодом для обоснования защиты пульповодов от повреждения.

The research results of influence of the deformation of tailing-dump dams on the sludge lines are considered. In designing the routes of sludge lines, it is offered to calculate the base deformations under the sludge line to substantiate the anti-destruction protection of sludge lines.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями

В даний час трубопровідний вид транспорту широко застосовується в гірничодобувній промисловості. Аналіз сучасних технологій транспортування і переробки корисних копалин в умовах шахт і рудників України вказує на широкий спектр застосовуваних видів трубопровідного транспорту. При цьому трубопровідний транспорт використовується як у виді магістральних систем, що представляють собою одне з основних технологічних ланок процесу видобутку або збагачення, але також широко використовується для забезпечення менш значних і допоміжних виробничих процесів [1].

Поширеність трубопровідного транспорту в гірничодобувній галузі, обумовлена різноманітністю можливих схем його застосування. Він є незамінною технологічною ланкою в складі вуглесосних і землесосних установок, гідромеханізації кар'єрів, збагачувальних фабрик, а також наміванні дамб хвостосховищ.

У практиці прокладання пульповодів використовуються дані про рельєф місцевості (балки, яри, водостоки). В аномальних зонах проектуються підтримуючі опори, компенсатори, обходи (подовження траси) і т.д. [2]. Але при прокладанні пульповодів не враховуються дані структурної оцінки їх профілів, що приводить надалі до порушення цілісності тіла пульповоду, який виготовляється звичайно зі сталі. Небезпека проривів полягає не тільки у втратах рідини, що транспортується, але і розмиві тіла дамби, що може призвести до аварії, яка нанесе також і негативні екологічні наслідки. Тому

важливим практичним завданням є дослідження деформацій, що виникають в тілі дамби під пульповодом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми

Результати останніх публікацій свідчать про наявність трудомістких проблем у технологічному процесі гірничорудного виробництва. Не завжди проводяться необхідні комп'ютерні дослідження із використанням останніх методик. Це призводить у підсумку до аварійних ситуацій на гідротехнічних спорудженнях і навіть до зупинки підприємства.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується дана стаття

Виникаючі швидкоплинні аварії на дамбах (греблях) хвостосховища, як правило, відносять до категорії «раптових», а причиною аварії, що відбулася, в основному, вважають порушення технології складування хвостів (шламів), переповнення ємкостей і т.д., але тільки не стан гірського масиву хвостосховища. Тому важливим завданням є дослідження деформацій огорожувальних дамб хвостосховища для обґрунтування захисту пульповодів від руйнування.

Формулювання мети статті

Виявити вплив масиву огорожувальної дамби хвостосховища на виникнення і розвиток у насипних ґрунтах ослаблених і аварійно-небезпечних ділянок під пульповодом. Розгля-

нути та порівняти розраховані (за програмою і аналітично) та вимірні значення деформацій основи ґрунту під пульповодом.

Виклад основного матеріалу досліджень

Обсяги гідромеханізації земляних робіт, а також гідротранспорту і наміву найрізноманітніших матеріалів у різних галузях народного

господарства безупинно збільшуються і складають більше мільярда кубічних метрів гірської маси в рік. Значну частину в обсязі цих робіт складає намів хвостосховищ.

Із 1970 року експлуатується хвостосховище Полтавського ГЗК. Поділено воно на два діючих відсіки I і II (об'єднані) і III відсік (рис. 1).

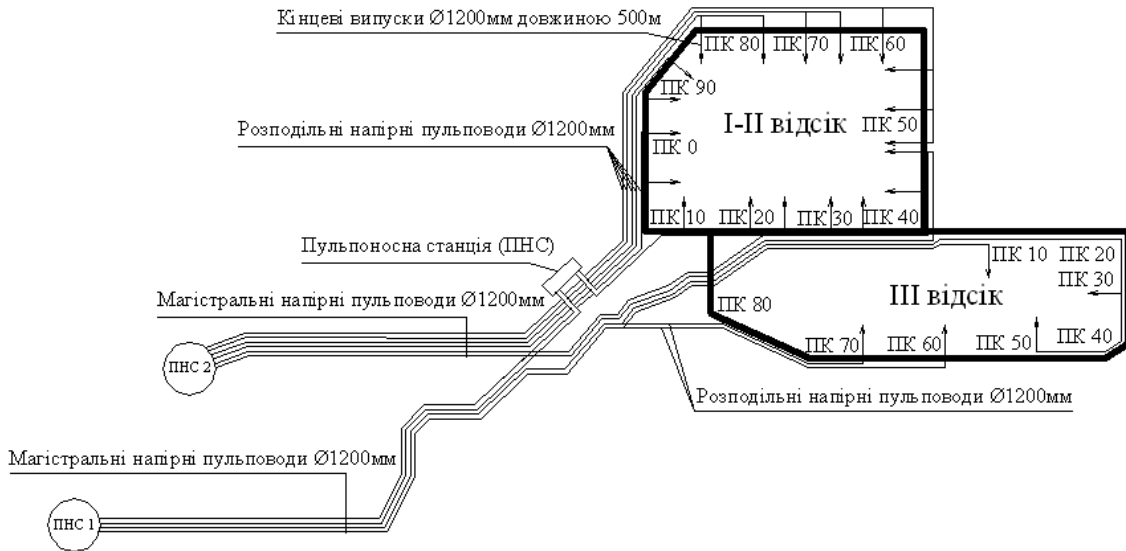


Рис. 1. Схема розкладки пульповодів

Подача пульпи в чашу I-го та II-го відсіку виконується магістральними і розподільними пульповодами (див. рис. 1), покладеними по гребеню на відмітках 67,0 м; 75,0 м.; 78,5 м.; 89,0 м; 91,0 м. Розподільні пульповоди III-го відсіку покладені на бермах з відмітками 76,0 м.; 79,3 м.; 80,6 м; 83,40 м. Ширина берм дозволяє укладання пульповодів, а також улаштування експлуатаційних автодоріг для обслуговування.

Неврахування сучасних тенденцій у технологічному процесі гірничорудного виробництва призводить у підсумку до аварійних ситуацій на гідротехнічних спорудженнях і навіть до зупинки підприємства.

Розглянемо найбільш характерні аварії хвостосховища Полтавського ГЗК. 26 травня 2003 року на відмітці 89,0 м огорожувальної дамби біля ПК72 відбулася осадка ґрунту в районі проходження пульповоду через автодорогу. Була виконана підсіпка автодороги щебенем. Осадку була замічена своєчасно, це дозволило не допустити розриву пульповоду. А у жовтні цього ж року осадка основи під пульповодом у районі ПК49 викликала його руйнування. У результаті прориву пульповоду була розмита частина огорожувальної дамби товщиною 0,2...0,3 м із відмітки 89,0 м до відмітки

76,60 м. 15 травня 2005 року по периметру карти 4 та у вересні при наміванні карти 14 під пульповодом були замічені повздовжні тріщини шириною 20...30 мм. Цього ж місяця утворилися повздовжні тріщини шириною до 40 мм на перемичці карт 4 і 5 в районі ПК29+30 та під пульповодом на перемичці 14 і 15 карт.

У країнах із розвинутою гірничорудною промисловістю трапляються руйнування хвостосховищ, що приносять значний збиток економіці, а в ряді випадків – супроводжуються людськими жертвами. Трубопровідний транспорт значно економічний, ніж залізничний, водний або автомобільний. Тому важливими практичними завданнями є питання про надійну та безперебійну роботу трубопроводів.

В результаті обстежень ділянки пульповоду, які було проведено у червні 2006 року біля ПК 45 III-го відсіку, було зафіксовано та виміряно повздовжні тріщини шириною 20...30 мм огорожувальної дамби під пульповодом. Повздовжня тріщина проходила як з одного боку пульповоду, так і з іншого (рис. 2).

Сучасний рівень програмного забезпечення дозволяє спрямувати методи моделювання НДС систем «споруда-основа» на розв'язання практичних завдань.

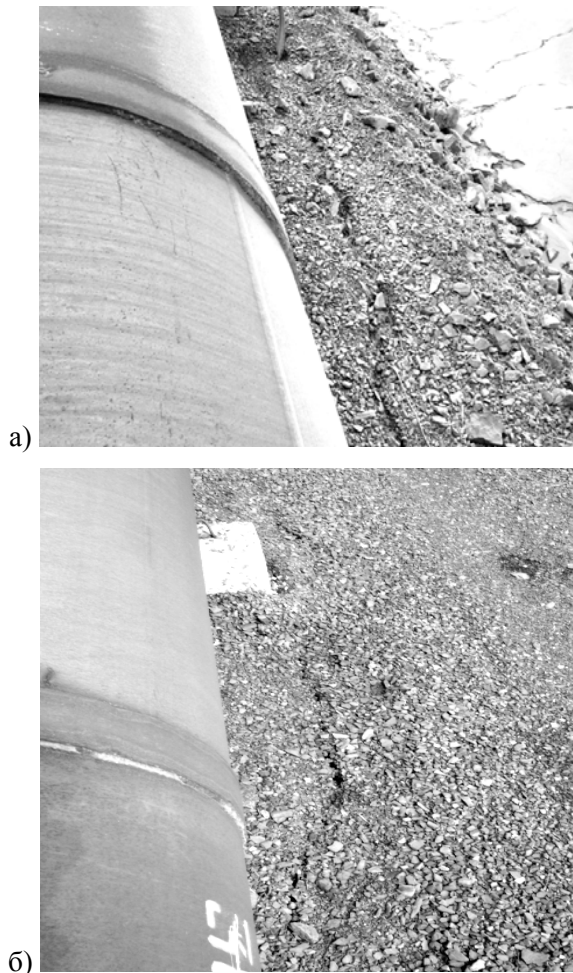


Рис. 2. Осідання огорожувальної дамби під пульповодом біля ПК45 III-го відсіку:
 а) – тріщина зі сторони карти наміву;
 б) – тріщина зі сторони автодороги

Тому розроблення методології розрахунку, в якій би поєднувався досвід експериментальних досліджень НДС основ при зведенні й експлуатації споруд із досягненнями математичного моделювання, є актуальним напрямом досліджень.

Широкі можливості при оцінці НДС відкривають, так звані, чисельні методи рішення, запозичені з механіки твердого деформуючого тіла. Найбільш ефективний з них – метод скінченних елементів (МСЕ). Суть методу полягає в тому, що суцільне тіло розглядають як таке, що складається із скінченного числа окремих елементів, що впритул прилягають один до одного і шарнірно скріплені між собою у вершинах цих елементів.

Застосування в практиці інженерних розрахунків стало можливим із розвитком і доступністю обчислювальної техніки. В останні два десятиліття завдяки застосуванню цього методу істотно розширився клас задач, розв'язуваних у механіці гірських порід.

Сучасні стандартні програмні засоби дозволяють суттєво розширити можливості методу скінченних елементів (МСЕ). Так, наприклад, для оцінювання напружено-деформованого стану системи «хвостосховище-основа» може бути використаний програмний комплекс «CONCORD-4.2», розроблений професором С. Ф. Клованичем за участю фахівців Полтавського НТУ ім. Ю. Кондратюка, який добре адаптується для розрахунків такого типу задач. Програмний комплекс призначений для рішення різних, як зовнішніх, так і внутрішніх задач механіки твердого тіла. Реалізована плоска задача (плоский напружений і плоский деформований стан) із використанням ізопараметричних скінченних елементів загального виду першого порядку [3].

На прикладі Полтавського ГЗК розглянемо рішення задачі оцінювання НДС дамби хвостосховища. Із загального масиву виділяємо область, яка нас цікавить. У даному випадку це геологічний розріз огорожувальної дамби III-го відсіку біля ПК45. При побудові розрахункової схеми враховано літологічне залягання ґрунтів [4].

Відповідно до геологічного розрізу вводимо у програму механічні характеристики прошарків ґрунту: питому вагу (γ), коефіцієнт Пуассона (ν), значення кута внутрішнього тертя (ϕ), зчеплення (c) й модуля деформації (E).

Виділивши на розрахунковій схемі окремі шари ґрунтів, розбиваємо область на скінченні елементи. В загальному випадку середовище є неоднорідним за своїми механічними властивостями. Однак розбивку на елементи зроблено так, що у межах кожного елемента ділянка середовища розглядається як однорідна. Причому, будь-який інший елемент, залишаючись так само однорідним, характеризується показниками механічних властивостей, відмінними від інших [5]. Таким чином, система елементів в цілому представляє неоднорідне середовище.

Точність і надійність моделювання залежить від досконалості прийнятого алгоритму рішення задачі, достовірності розрахункової схеми конкретним умовам будівництва чи експлуатації споруд, точності прийнятих у розрахунках параметрів і характеристик матеріалів, урахування дії інженерно-геологічних і техногенних процесів, послідовності будівництва і т.п. [6].

У межах площадки досліджень розрахункової схеми на глибину до 20,0 м поширені техногенні ґрунти чаші і дамб обвалування хвостосховища. Дамба з відміткою 89,75 м відноситься до вторинних дамб, утворених шляхом

відсіпання хвостів. Висота дамби складає 13,55 м. Насипні ґрунти тіла дамби залягають на намивних ґрунтах – хвостах чаші сховища. Хвости характеризуються середньощільним і рихлим складенням, в окремих інтервалах – щільним. Чітко вираженої закономірності в заміщенні літологічних різновидів хвостів не простежується. На глибину 1,0...2,0 м дамба укріплена скельним накиданням із кварцитів.

Далі геологічний розріз складають насипні ґрунти тіла дамби: техногенні ґрунти по гранулометричному складу відповідають піскам дрібним, середньої крупності, пилуватим, рідше – супіскам.

Розглянемо результати розрахунку дамби III-го відсіку хвостосховища. На рис. 3 показано розрахункову схему із зазначенням усіх шарів.

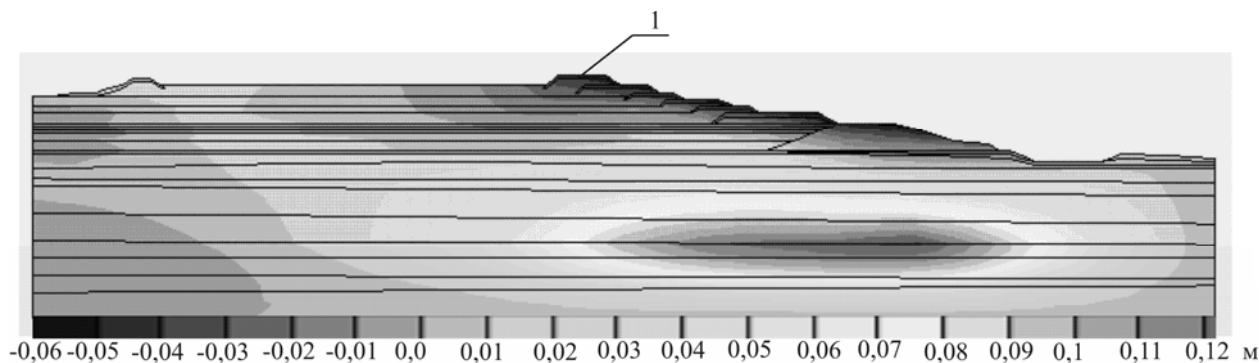


Рис. 3. Ізополя деформацій дамби при її самоущільненні:
1 – досліджувана ділянка дамби під пульповодом

При виведенні результатів розрахунку показана кольорова шкала, яка дозволяє оцінити ступінь небезпеки руйнування породного масиву у довільній його точці.

Отже, за результатами математичного моделювання (див. рис. 3.) отримали переміщення

основи під пульповодом на досліджуваній ділянці 0,035 м.

На рис. 4 показано напрямок переміщень шарів тіла дамби. Із рисунка видно, що напрямок руху шарів основи дамби протилежний намивним ґрунтам.

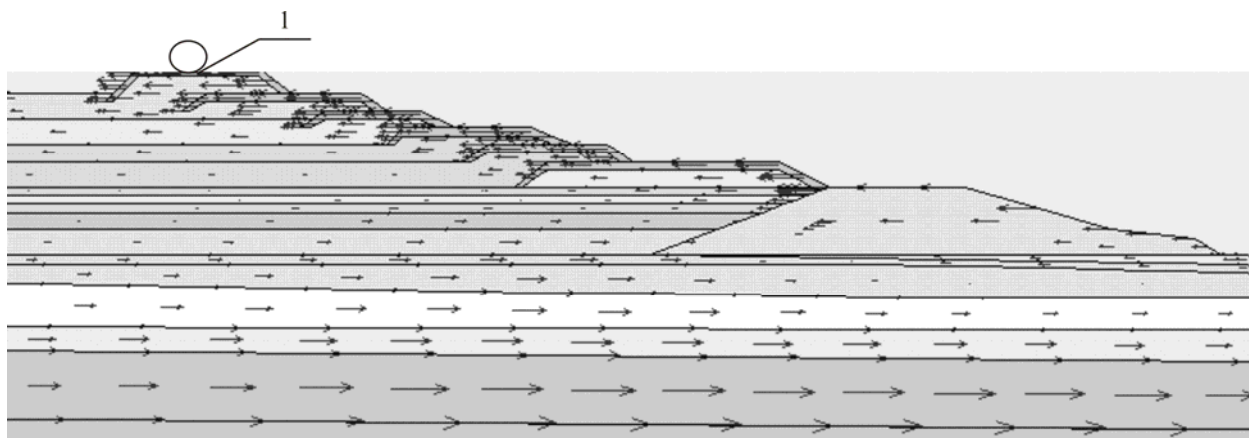


Рис. 4. Схема напрямку переміщень шарів тіла дамби та її основи:
1 – досліджувана ділянка дамби під пульповодом

Переміщення порід основ, що трансформуються намивними ґрунтами, викликають при цьому в ґрунтах перерозподіл напруженого стану, це і призводить до виникнення і розвитку тріщин розриву в різних напрямках щодо подовжньої осі дамби. Виявлений напрям переміщень масиву хвостосховища за програмою (рис. 4) пояснює ширину розкриття тріщин (рис. 2): тріщина зі сторони карти намиву ширша за розкриттям, ніж та, що зі сторони автодороги. Таким чином, розраховані переміщення

за програмним комплексом «CONCORD» реально відображають процес, що відбувається в масиві ґрунту дамби.

Результати, отримані при моделюванні, були підтвержені спостереженнями за деформаціями огорожувальної дамби за допомогою системи контрольно-виміральної апаратури (КВА). Встановлена КВА в тілі огорожувальної дамби (по гребеню). Саме на довжині досліджуваної ділянки 4 м було виявлено деформацію основи під пульповодом від 3 см до 4 см.

Розрахуємо максимальне переміщення λ_0 пульповоду на цій же ділянці, яке виникне від деформації основи. За СНиП 2.05.06-85 [7]:

$$\lambda_0 = \frac{1}{2} \left(\psi - \sqrt{\psi^2 - 3,75 \frac{\tau_{гр.оп.} l^2}{E_0 \delta_n} \Phi_1 \xi_0} \right) = \frac{1}{2} \times$$

$$\times \left(8191,56 - \sqrt{8191,56^2 - 3,75 \frac{0,153 \cdot 400^2}{2,2 \cdot 1,2} 0,883 \cdot 3,5} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} (8191,56 - \sqrt{67101658 - 107465}) =$$

$$= \frac{1}{2} (8191,56 - 8184,998) = \frac{1}{2} 6,56 = 3,28 \text{ см,}$$

де

$$\psi = \xi_0 + 0,2 u_{\max} + \frac{\tau_{гр.оп.} l^2}{E_0 \delta_n} \Phi_1 = 3,5 + 0,2 \cdot 1,21 +$$

$$+ \frac{0,153 \cdot 400^2}{2,2 \cdot 1,2} 0,883 = 8191,56 \text{ см;}$$

$\xi_0 = 3,5$ – максимальне зрушення земної поверхні, см; $\tau_{гр.оп.} = 0,153$ – граничний опір ґрунту повздовжнім переміщенням пульповоду, МПа; $u_{\max} = 1,21$ – переміщення, що відповідає настанню граничного значення $\tau_{гр.оп.}$; $l = 400$ – довжина ділянки однозначних деформації земної поверхні, см; $E_0 = 2,2$ – модуль пружності, МПа; $\delta_n = 1,2$ – номінальна товщина стінки труби, см;

$$\Phi_1 = 0,9 - 0,65 \sin(l/l_m - 0,5) =$$

$$= 0,9 - 0,65 \sin(400/200 - 0,5) = 0,883;$$

$l_m = 200$ – довжина ділянки деформації пульповоду, см.

Отже, максимальне переміщення λ_0 пульповоду біля ПК45 III-го відсіку, яке виникне від деформації основи, за розрахунком буде дорівнювати 0,0328 м.

Висновки із даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На основі проведених досліджень можна стверджувати, що при деформації основи 0,035 м під пульповодом на досліджуваній ділянці (одержаної за програмою) слід очікувати максимальне переміщення пульповоду 0,0328 м (розраховане за СНиП 2.05.06-85).

За отриманими результатами можна виявити та передбачити причини аварійних випадків, пов'язаних із розривами збірних труб (пульповодів), прокладених під і над високими насипами.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Таран, В. Д. Сооружение магистральных трубопроводов [Текст] / В. Д. Таран. – М.: Недра, 1964. – 544 с.
2. Казакевич, М. И. Проектирование конструкций надземных промышленных трубопроводов [Текст] / М. И. Казакевич, А. Е. Любин. – К.: Будівельник, 1989. – 160 с.
3. Клованич, С. Ф. Программа «Concord» для решения геотехнических задач методом конечных элементов [Текст] / С. Ф. Клованич // Вісн. Одеського нац. морського ун-ту. – 2003. – Вип. 10. – Одеса: ОНМУ, 2003. – С. 39-46.
4. Отчет об инженерно-геологических изысканиях по площадке III отсека хвостохранилища и трасы пульповодов [Текст]. – К.: УкрНИИВодоканалпроект. – арх. 16489.
5. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов: (Напряженно-деформативные и прочностные характеристики) [Текст] / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
6. Зоценко, М. Л. Розрахунки міцності і деформативності основ із використанням рішень нелінійної механіки ґрунтів [Текст] / М. Л. Зоценко, О. В. Борт // Розрахунок будівель та споруд спільно з основою: зб. матер. наук.-техн. семінару. – Львів, 2002. – С. 44-52.
7. СНиП 2.05.06-85 Магистральные трубопроводы [Текст]. – М.: Стройиздат, 1988. – 52 с.

Надійшла до редколегії 15.03.2010.

Прийнята до друку 24.03.2010.

Е. Б. ДРУЖКО (ДонНАСА, Донецк), В. Ф. ОГЛОБЛИН, В. В. САМОЙЛОВ (ДонИЖТ, Донецк)

ПОДАТЛИВЫЕ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

У статті викладено результати ефективності і конструктивні рішення вузлів і елементів податливості кріплення об'єктів тунельного типу в складних геологічних умовах. Запропоновано конструкцію кріплення з універсальних податливих блоків. Розроблено емпіричний метод, що ґрунтується на результатах статистичної обробки представницької кількості випробувань кріплення із зміною найбільш характерних параметрів.

В статье изложены результаты эффективности и конструктивные решения узлов и элементов податливости крепи объектов тоннельного типа в сложных геологических условиях. Предложена конструкция крепи из универсальных податливых блоков. Разработан эмпирический метод, основанный на результатах статистической обработки представительного числа испытаний крепи с изменением наиболее характерных параметров.

The article is dealt with the issues of efficiency and constructive solutions to nodes and elements of the lining objects of tunnel type in complicated geological conditions. A construction of the lining from the universal yielding blocks of uniform size is offered. Reaching pliable layer and methods of calculating of the veering capacity of a two-layer lining arched and circular shapes are recommended.

Перспектива освоения подземного пространства неразрывно связана со строительством большого количества объектов тоннельного типа. Во многих случаях они сооружаются в сложных горно-геологических условиях, которые характеризуются большими смещениями контура выработки. Доказано, что в таких случаях наиболее рационально применять податливые или ограниченно-податливые крепи (обделки) [1].

Следует отметить, что существующие конструктивные решения узлов и элементов податливости далеки от совершенства. Так, в рамных металлических податливых крепях из спецпрофиля податливость осуществляется за счет взаимного проскальзывания двух элементов крепи, соединенных специальным замковым соединением. Наибольшее распространение получило замковое соединение, состоящее из двух хомутов и соединительных планок, прижимающих профили друг к другу при затягивании гаек. Как показывает опыт, основным недостатком указанного соединения является то, что в процессе работы происходит изгиб соединительных планок, перекося и деформация хомутов в месте резьбы. Одновременно с прогибом планок в соединении заклиниваются замки и обрываются соединительные хомуты.

Эффективность применения металлической арочной крепи в значительной степени зависит от ее контакта с боковыми породами и качества

работ по креплению. Надежный контакт с породами должен достигаться:

- максимальным приближением контура выработки в проходке к контуру крепи за счет более точного оконтуривания сечения (контурное взрывание, проведение выработки комбайном);
- качественной забутовкой закрепного пространства по всему периметру выработки;
- расклинкой арок в двух точках верхняка на расстоянии 1/3 пролета, что обеспечивает заданный режим загрузки конструкции при вертикальной податливости до 300...350 мм.

Практика показывает, что последнее условие имеет особо важное значение для устойчивости крепи. В большинстве случаев, когда вопросу расклинки крепи не уделяется должного внимания, нагрузка от смещающихся пород передается на среднюю часть верхняка, что вызывает его прогиб еще до начала работы в податливом режиме. Такой характер деформации крепи особенно часто наблюдается при ее использовании для крепления выработок площадью сечения более 12 м², поскольку коэффициент надежности работы крепи в податливом режиме приближается к единице, поэтому одним из направлений совершенствования металлических податливых крепей является повышение надежности их работы в податливом режиме. Для этого в отечественной и зарубежной практике предложены крепи, имеющие форму

свода в виде эллипса (в отличие от циркульного свода в обычных крепях) с большей вертикальной осью, что позволяет им надежно работать в податливом режиме в условиях преобладающих смещений со стороны кровли.

Другим наиболее распространенным решением узла податливости является установка между элементами крепи прокладок, сминающихся при определенной нагрузке (блочные бетонные и железобетонные крепи с деревянными или синтетическими прокладками между блоками). Недостатком таких конструкций является «расползание» прокладок в процессе деформирования, что приводит к появлению на стыках блоков растягивающих напряжений и снижению прочности материала крепи более чем вдвое.

Общим недостатком рассмотренных выше податливых крепей является то, что они меняют свои геометрические параметры «в свету» и не могут обеспечить постоянную форму и размеры сечения тоннеля в течение его срока службы.

Исходя из вышеизложенного, предлагается конструкция крепи из универсальных податливых блоков, показанная на рис. 1. В ее основе лежит универсальный двухслойный элемент заводского изготовления (рис. 1, в), состоящий из железобетонного блока 1 и податливого слоя из пеноматериала 2. В качестве материала для податливого слоя можно использовать карбамидный пенопласт МБП-6, который наносится на железобетонные тубинги в заводских условиях путем набрызга или наклеивания готовых листов пенопласта.

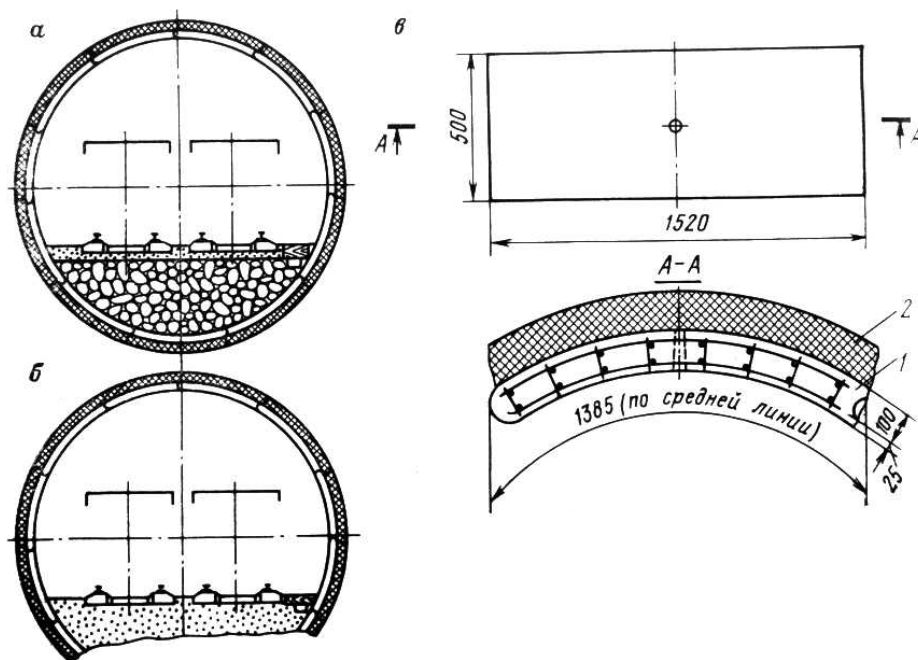


Рис. 1. – Конструкция крепи из универсальных податливых блоков:
 а) – общий вид замкнутой крепи; б) – общий вид крепи без обратного свода;
 в) – конструкция универсального податливого свода

Размеры унифицированы таким образом, что при изменении числа блоков от 5 до 13 можно получить шесть типоразмеров сечений выработки с обратным или без обратного свода (табл. 1).

Принцип унификации заключается в том, что кольцевая форма заменяется правильным криволинейным многоугольником, длина сторона которого подбирается таким образом, чтобы при изменении числа блоков на один элемент вписанная в многоугольник окружность представляла собой очередное сечение тоннеля. Строгое кольцевое очертание крепи соответ-

ствует сечению $9,3 \text{ м}^2$, выполненному из 10 блоков (см. табл. 1).

Блок представляет собой армированную цилиндрическую плиту с радиусом внутренней поверхности 2150 мм и толщиной 150 мм. Толщина податливого слоя, наносимого на блок, составляет 100...150 мм в зависимости от горно-геологических условий, в которых работает конструкция. Ширина универсального блока выбрана из условия грузоподъемности существующих крепеукладчиков – 500 мм. При таких параметрах масса блока составляет 250 кг.

Типоразмеры блочной податливой крепи

| Площадь сечения в свету, м ² | Площадь сечения в проходке, м ² | Ширина на уровне подвижного состава, мм | Высота в свету, мм | Число блоков, шт. | Число путей, шт. |
|---|--|---|--------------------|-------------------|------------------|
| Замкнутая крепь | | | | | |
| 6,1 | 9,1 | 2340 | 2380 | 7 | 1 |
| 7,5 | 11,9 | 2940 | 2610 | 8 | 1 |
| 9,3 | 16,5 | 3960 | 3070 | 10 | 2 |
| 11,9 | 22,0 | 4470 | 3300 | 11 | 2 |
| 13,5 | 25,5 | 4910 | 3560 | 12 | 2 |
| 15,0 | 30,2 | 5560 | 3960 | 13 | 2 |
| Арочная крепь | | | | | |
| 6,1 | 8,0 | 2340 | 2380 | 5 | 1 |
| 7,5 | 10,5 | 2940 | 2610 | 6 | 1 |
| 9,3 | 12,5 | 3960 | 3070 | 7 | 2 |
| 11,9 | 16,4 | 4470 | 3300 | 8 | 2 |
| 13,5 | 19,1 | 4910 | 3560 | 9 | 2 |
| 15,0 | 21,1 | 5560 | 3960 | 10 | 2 |

Примечание. Толщина тубинга без податливого слоя равна 150 мм для замкнутой и арочной крепей

В качестве материалов податливого слоя можно использовать вспененные пластмассы и различные виды пеногазобетона, однако, пенопласты, обладающие удачными деформационно-прочностными характеристиками, предпочтительнее жестких и прочных газобетонов.

Изыскания материала податливого слоя позволили рекомендовать для этих целей карбамидный пенопласт МБП-Б. Этот пенопласт представляет собой вспененный легкий однородный материал мелкоячеистой структуры. Он изготавливается при помощи специальной установки УППМ путем вспенивания и механического перемешивания предварительно подготовленных растворов. Для производства карбамидного пенопласта используют мочевиноформальдегидную смолу (МФФМ или МК-1), вспенивающе-отверждающий продукт АВО-1 или заменяющую его смесь из ортофосфорной кислоты и сульфанола. Кроме исходных компонентов в состав пенопласта входят модифицирующие добавки – диэтиленгликоль или этиленгликоль и резорцин.

Карбамидный пенопласт обладает следующими характеристиками:

- прочность на сжатие – 0,1...0,3 МПа;
- адгезия – 0,05...0,2 МПа;
- коэффициент сжатия – < 0,9;
- время схватывания – 5...60 с;

– время набора номинальной прочности – 24...72 ч.

Строгий расчет крепи с учетом отпора пород, осложненный непостоянством нагрузки, весьма трудоемок. Для практических расчетов такой сложной конструкции, как двухслойная крепь, разработан эмпирический метод, основанный на результатах статистической обработки представительного числа испытаний крепи с изменением наиболее характерных параметров. С учетом последнего положения проведена проверка работоспособности и разработана методика проектирования двухслойной крепи.

Результаты стендовых испытаний позволили оценить влияние различных факторов (размеров и формы крепи, прочности ее материала, отношения вертикальных и горизонтальных смещений, толщины пенопласта) на работоспособность крепи. Кроме того, с позиции множественного корреляционного анализа были получены зависимости для расчета несущей способности крепи с учетом упомянутых факторов. При этом следует иметь в виду, что несущая способность крепи определялась по появлению первых трещин в конструкции, поэтому зависимости, полученные после обработки этих результатов, пригодны для расчета двухслойной крепи по первому предельному

состоянию. Так, для расчета арочной крепи рекомендована зависимость

$$q = 1,7\delta/a_0 + 0,0083R_\delta + 0,3v - 0,24, \quad (1)$$

а для расчета крепи кольцевой формы

$$q = 2,78\delta/a_0 + 0,0049R_\delta + 0,3v - 0,28, \quad (2)$$

где q – несущая способность крепи; δ – толщина бетонной части крепи; a_0 – радиус (половина ширины) крепи; R_δ – прочность материала крепи на сжатие; v – отношение горизонтальных и вертикальных смещений контура выработки.

Окончательный выбор крепи для тоннеля должен производиться на основании анализа геомеханической обстановки и технико-экономического сравнения нескольких вариантов крепления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инъекционное упрочнение горных пород [Текст] / Ю. З. Заславский и др. – М.: Недра, 1984. – 176 с.

Поступила в редколлегию 22.03.2010.

Принята к печати 29.03.2010.

М. Л. ЗОЦЕНКО, О. І. НАЛИВАЙКО, І. І. ЛАРЦЕВА (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка), О. М. ПАНЬКО (Державне управління справами Президента України, Київ)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДОНЕПРОНИКНОСТІ ГРУНТОЦЕМЕНТУ

У статті представлено дослідження водонепроникності ґрунтоцементу прискореним методом визначення повітропроникності за допомогою пристрою ВВ-2 (типу «Агама»), а також коефіцієнта розм'якшення.

В статті представлені дослідження водонепроницаемости ґрунтоцемента ускоренным методом определения воздухопроницаемости при помощи прибора ВВ-2 (типа «Агама»), а также коэффициента размягчения.

The study of watertightness of the soil cement by speed-up method for air permeability determination by means of the ВВ-2 device («Агама» type) is presented in this article. The coefficient of softening is also determined.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями

Одним із ефективних напрямків зниження вартості пального фундаментобудування є використання у якості матеріалу ґрунтів, які залягають в основі будівель. За допомогою спеціального обладнання виконують розпушування ґрунту безпосередньо у масиві без його виймання. Одночасно у розпушений ґрунт нагнітається цементна суспензія та виконується перемішування й ущільнення ґрунтоцементної суміші. Після тужавіння суміші за всією товщиною слабого шару утворюється міцний ґрунтоцементний матеріал, який не розмокає у водному середовищі. Такі елементи можливо утворювати й у водонасиченому ґрунті, тобто нижче рівня ґрунтових вод. Досліди, які були проведені у часі з визначення міцності ґрунтоцементу, показали його зростання навіть через роки після виготовлення [1].

Відомим є метод влаштування штучних основ шляхом армування слабких ґрунтів вертикальними жорсткими елементами. Ефект такого армування основ полягає у тому, що у певному об'ємі слабого ґрунту частина його замінюється жорстким матеріалом з достатньо великими, порівняно з природним ґрунтом, механічними характеристиками. Ці характеристики утвореної штучної основи визначаються як середньовиважені. Вони можуть регулюватися за рахунок зміни відстані між сусідніми елементами армування [2]. В останні роки доволі часто влаштування штучних основ (закріплення слабких ґрунтів) здійснюють шляхом цементації ґрунту за струминною та бурозмішувальною технологіями. За допомогою вказаних техноло-

гій у масиві ґрунтів можна утворювати вертикальні, горизонтальні та похилі жорсткі ґрунтоцементні елементи. Ці технології також можна застосовувати не тільки для закріплення основи під фундаментами будівель і споруд, а й для стабілізації зсувонебезпечних схилів, укосів [3], влаштування протифільтраційних завіс, роздільних стінок для зниження впливу новобудов на існуючі будівлі і споруди тощо [2].

Відомо, що при закріпленні ґрунтів на схилах виникає так званий «баражний ефект», який проявляється у техногенному піднятті рівня ґрунтових вод на таких ділянках. Відомо також, що ґрунтоцемент, який виготовлено за бурозмішувальною технологією, має пористість, яка близька до пористості ґрунту природного складу. Цей факт породив хибну думку про те, що і проникність ґрунтоцементу близька до ґрунту. З цих міркувань актуально дослідити водонепроникність ґрунтоцементу за стандартними методами для подальшого прогнозування можливості виникнення баражного ефекту на закріплених схилах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання поставленої проблеми

Ґрунтоцемент представляє собою складну багатофазну систему, яка складається із ґрунту, що має полідисперсний та полімінеральний склад, та цементуючої речовини – цементу, який з'єднує частинки ґрунту в моноліт. Гель, який виділяється при гідролізі цементу, просочує ґрунт та заповнює його пори.

Ґрунтоцемент на відміну від цементних бетонів має значно більшу пористість. Якщо пористість бетонів складає декілька процентів і

пори утворюються в основному у застиглому цементному камені, то в ґрунтоцементі залишкова пористість може складати 20...30 % і вище. Встановлено, що в ґрунтоцементі переважають ультрамікропори. Крім того, внаслідок перемішування суміші і наступного гідролізу цементу при тужавінні виникає так звана «закрита пористість», тобто пори ґрунтоцементу більшістю не зв'язані між собою. Все це робить матеріал практично водонепроникним. Характер пор, який утворюється у бетоні, залежить від цілого ряду факторів і, в першу чергу, від щільності матеріалу та процесу його твердіння, а також від складу використаного цементу. Так, більш якісний бетон за водонепроникністю може бути отриманий на пуцоланових портландцементях; з технологічної позиції ефективним способом отримання водонепроникного бетону є його ущільнення.

Вивчати ґрунтоцемент як будівельний матеріал почали приблизно з 30-х рр. ХХ сторіччя. Було доведено доцільність застосування монолітного ґрунтоцементу для укладання в ядро накидних дамб та улаштування облицювання зрошувальних каналів. Встановлено, що глинистий ґрунт до закріплення з коефіцієнтом фільтрації $K_f = n \cdot 10^{-3}$ см/с, після закріплення його цементом (на 2-гу добу після виготовлення) має $K_f = n \cdot 10^{-8} \dots n \cdot 10^{-10}$ см/с, тобто він стає практично водонепроникним. Для цементно-глинистих матеріалів коефіцієнт фільтрації складає $K_f = n \cdot 10^{-7} \dots n \cdot 10^{-8}$ см/с, в той час як для цементних – $K_f = n \cdot 10^{-4} \dots n \cdot 10^{-5}$ см/с [4].

Виділення не розв'язаних раніше частин проблеми, яким присвячується стаття

При дослідженні властивостей ґрунтоцементу виникає питання: якими методами проводити ці дослідження? Чи вважати ґрунтоцемент близьким за характеристиками до бетонів, чи до ґрунтів? При дослідженні водонепроникних властивостей бетонів необхідно користуватися наступними стандартами [5, 6] і виконувати дослідження за «микрою плямою» чи експрес-методами. Якщо розглядати ґрунтоцемент як ґрунт, що змінений під хіміко-фізичним впливом, тоді для нього згідно зі стандартом [7] потрібно визначати коефіцієнт розм'якливості у воді K_{sof} .

Тому **метою роботи** є дослідження водонепроникних властивостей ґрунтоцементу (за методикою визначення водонепроникних власти-

востей для бетонів) та визначення його коефіцієнту розм'якливості.

Виклад основного матеріалу досліджень

З метою визначення характеристик водонепроникності ґрунтоцементу на дослідному майданчику в листопаді 2008 р. були виготовлені вертикальні ґрунтоцементні елементи діаметром 200 мм та довжиною 2,5 м. Кількість цементу – 20 % від ваги сухого ґрунту, водоцементне відношення розчину – В/Ц = 1. Дослідний майданчик складений лесовими просадочними суглинками першого горизонту (ІГЕ-3) з наступними характеристиками: вологість на межі текучості $W_L = 0,30$; вологість на межі пластичності $W_p = 0,21$; число пластичності $I_p = 0,09$; природна вологість $W = 0,13$; показник текучості $I_L = -0,89$; щільність частинок ґрунту $\rho_s = 2,66$ г/см³; щільність ґрунту $\rho = 1,56$ г/см³; щільність сухого ґрунту $\rho_d = 1,39$ г/см³; коефіцієнт пористості $e = 0,91$; коефіцієнт водонасичення $S_y = 0,35$. У віці 6 місяців (у травні 2009 р.) ґрунтоцементні елементи були викопані з масиву для подальшого дослідження у лабораторних умовах (рис. 1).



Рис. 1. Ґрунтоцементний елемент діаметром 200 мм в масиві ґрунту

Для дослідження водонепроникності ґрунтоцементу був застосований пристрій для прискореного визначення водонепроникності бетону ВВ-2, що дозволяє оцінювати *повітропроникність бетонів експрес-методом*. Цей метод оснований на наявності експериментальної залежності між повітропроникністю поверхневих шарів бетону та його водонепроникністю, ви-

значеній за «мокрою плямою» згідно зі стандартом [6]. Водонепроникність бетонного зразка за «мокрою плямою» оцінюється максимальним тиском води, при якому ще не спостерігається її просочування крізь зразок. Марку бетону по водонепроникності приймають за табл. 1.

Таблиця 1

| Марка бетону по водонепроникності за «мокрою плямою» | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Водонепроникність серії зразків, МПа | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| Марка бетону по водонепроникності <i>W</i> | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |

При застосуванні пристрою швидкісного оцінювання водонепроникності в якості параметру, який характеризує повітропроникність, використовується значення часу, за яке тиск в камері пристрою падає на певну величину.

Пристрій ВВ-2 (рис. 2) має необхідні атестати та сертифікати і відповідає всім нижченаведеним технічним характеристикам, що пред'являються до пристроїв визначення повітропроникності:

1. Початковий рівень вакууметричного тиску, що створюється всередині камери, – не менше 0,064 МПа.
2. Початковий тиск притиснення фланцю камери до поверхні бетону – не менше 0,05 МПа.
3. Ширина фланцю камери – не менше 25 мм.
4. Внутрішній об'єм порожнини камери – не менше 180 см³.

Діапазон показників вакуумметра прилада ВВ-2 – 0...1 кгс/см²; маса пристрою – 4 кг.

Пристрій ВВ-2 є порожнистою циліндричною камерою 1 з виступаючим фланцем 2. Зверху камери встановлений вакуумметр 3, з'єднаний з камерою через штуцер 4, на бічній поверхні – штуцер 5 підводу гнучкого шлангу 6. Шланг приєднаний до ручного вакуум-насосу 7. На осі штуцера 5 всередині камери розташований вакуумклапан 10. Штуцер 5 перекривається при досліді заглишкою 11. Для проведення випробувань пристрій встановлюють на поверхні зразка 8 за допомогою липкої герметизуючої мастики 9, яка накладається джгутом на фланці камери, при цьому контролюють, щоб фланець камери не виступав за край поверхні зразка.

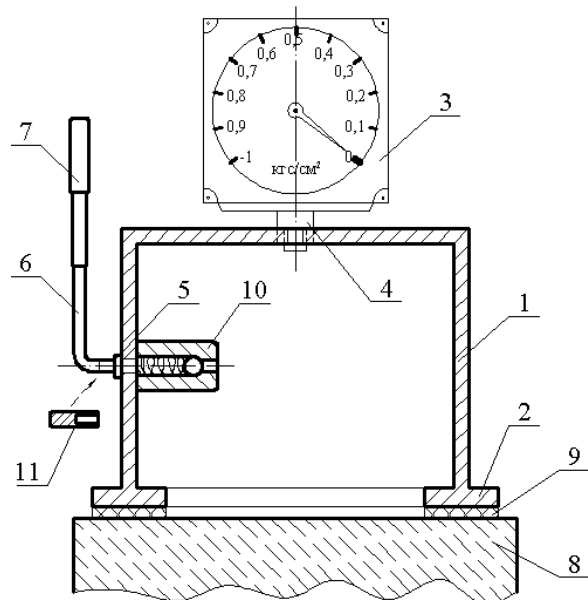


Рис. 2. Схема пристрою для прискороного визначення водонепроникності бетону ВВ-2

Згідно зі стандартами [5, 6], повітропроникність бетону визначається за результатами випробувань серії із 6 зразків-кубів розмірами ребра 150 мм чи циліндрів діаметром 150 мм та висотою не менше 100 мм. Випробування проводять при температурі повітря від +1 до +40 °С. Протягом двох діб до моменту випробування поверхня бетону не повинна піддаватися дії води чи іншої рідини. Поверхні, на яких будуть проводитись випробування, повинні бути очищені від поверхневої плівки цементного каменю. У зоні контакту фланцю камери з поверхнею бетону не повинно бути раковин глибиною більше 1 мм та діаметром більше 6 мм, а також виступів більше 1 мм та видимих тріщин.

Випробування проводять у наступній послідовності:

1. Встановлюють камеру на вибраній та підготовленій ділянці досліджуваного зразка та притискають пристрій до поверхні двома руками, створюючи необхідний тиск притиснення 0,05 МПа.

2. За допомогою вакуум-насосу в камері створюють розрідження до значення 0,075...0,08 МПа.

3. Знімають кінець шлангу, встановлюють на штуцер заглишку та спостерігають за показниками вакуумметра падіння тиску до значення $P_{01} = -0,060$ МПа. Даний тиск вважається тиском початкового розрідження. З цього моменту засікається час, за який тиск у камері падає до кінцевого розрідження $P_n = -0,054$ МПа.

Отримані значення часу t_i для досліджуваних зразків записують у порядку їх зростання та обчислюють середнє арифметичне значення часу двох середніх зразків (третього та четвертого) в якості параметру, який характеризує повітропроникність в серії зразків.

Водонепроникність бетону W визначають за градуовальною таблицею «час – марка бетону за водонепроникністю» (табл. 2).

Таблиця 2

Марка бетону за водонепроникністю для приладу ВВ-2

| Діапазон t_i , с | Марка бетону за водонепроникністю W |
|--------------------|---------------------------------------|
| 41...59 | 2 |
| 60...87 | 4 |
| 88...126 | 6 |
| 127...183 | 8 |
| 184...261 | 10 |
| 262...387 | 12 |
| 388...561 | 14 |
| 562...814 | 16 |
| 815...1181 | 18 |
| 1182...1734 | 20 |

Для перевірки справності пристрою та підтвердження доцільності його застосування для зразків ґрунтоцементу, попередньо була визначена марка за водонепроникністю залізобетонної балки заводського виготовлення (рис. 3), яка за паспортом має марку $W2$.

За результатами проведення 6-ти випробувань час падіння тиску в камері для 3-го та 4-го випробування був наступний – 44 та 52 с, відповідно. Середнє арифметичне значення часу складає 48 с, що згідно з табл. 2 відповідає марці бетону за водонепроникністю $W2$. Отже, даний пристрій можна застосовувати для визначення водонепроникності зразків.

Для визначення водонепроникності елемент ґрунтоцементу, діаметром 200 мм, який був вилучений на дослідному майданчику, розрізали на циліндри висотою по 150 мм. Далі поверхня була очищена з урахуванням усіх вищевикладених вимог і було проведено 6 випробувань (рис. 4), результати яких наведені в табл. 3.

З урахуванням даних табл. 2 і 3 середнє арифметичне значення часу падіння тиску в камері для 3-го та 4-го випробувань складає

$t = 463$ с, що відповідає марці по водонепроникності для бетонів $W14$.



Рис. 3. Визначення повітропроникності бетонної балки



Рис. 4. Дослідження повітропроникності ґрунтоцементу пристроєм ВВ-2

Таблиця 3

Значення часу та марки для досліджуваних зразків ґрунтоцементу

| № зразка | Час t_i , с | Марка W |
|----------|---------------|-----------|
| 1 | 305,27 | 12 |
| 2 | 320,58 | 12 |
| 3 | 445,00 | 14 |
| 4 | 480,54 | 14 |
| 5 | 520,30 | 14 |
| 6 | 784,98 | 16 |

Якщо марку по водонепроникності визначати за середньоарифметичним значенням часу падіння тиску в камері всіх проведених досліджень (в нашому випадку – 6-ти), то за даними табл. 3 $t_{\text{сер}} = 476$ с, що відповідає марці по водонепроникності $W14$. Коефіцієнт варіації, визначений в результаті проведення статистичної обробки даних методом найменших квадратів, для даного випробування склав $v = 0,11$.

Значення коефіцієнту варіації відповідає загальним уявленням для ґрунтів, це підтверджує, що ґрунтоцемент має досить високу водостійкість. Слід зазначити наступне: для того, щоб виготовити бетон марки за водонепроникністю $W14$, в нього необхідно не тільки додати спеціальні гідрофобні добавки, але й суворо дотримуватись технології виготовлення бетону з цією добавкою. Всі ці заходи значно збільшують собівартість такого бетону, який сам по собі вже є дорожчим, ніж ґрунтоцемент.

Оскільки ґрунтоцемент розглядається також як *зміцнений ґрунт*, то для оцінювання його водостійкості потрібно визначати коефіцієнт розм'якливості у воді. Згідно зі стандартом [7], за коефіцієнтом розм'якливості ґрунти поділяють на нерозм'якшувальні ($K_{\text{sof}} \geq 0,75$) та розм'якшувальні ($K_{\text{sof}} < 0,75$).

З досліджуваних експрес-методом зразків ґрунтоцементу діаметром 200 мм та висотою 150 мм були виготовлені кубики розмірами 7x7x7 см. Кубики були заміряні та поділені на дві серії по 6 штук: зразки 1-ої серії зберігалися протягом 28 діб у воді; зразки 2-ої серії зберігалися протягом 28 діб у повітряно-сухих умовах. По проходженню вказаного терміну зразки випробовувалися на одноосьовий стиск (рис. 5) відповідно до стандарту [8]. Результати випробувань наведені в табл. 4.

За результатами випробувань (табл. 4) для кожного зразка була визначена границя міцності ґрунту на одноосьовий стиск R_c – відношення навантаження, при якому виникає руйнування зразка, до площі первісного поперечного перерізу. Також для отриманих значень міцності ґрунтоцементу була проведена статистична обробка даних методом найменших квадратів. Коефіцієнт варіації для зразків, що зберігалися у повітряно-сухих умовах, склав $v = 0,057$; для зразків, що зберігалися у воді – $v = 0,092$.

Отримані дані свідчать про однорідність ґрунтоцементу як матеріалу та високу точність проведення експерименту.

За даними табл. 4 коефіцієнт розм'якливості, який визначається як відношення серед-

ніх значень границь міцності на одноосьовий стиск у водонасиченому та у повітряно-сухому стані, для зразків ґрунтоцементу, який виготовлений за бурозмішувальною технологією шляхом перемішування суглинку лесового просадочного (ПГЕ-3) та цементного розчину з кількістю цементу 20 % від ваги сухого ґрунту, становить: $K_{\text{sof}} = \frac{1,54}{1,39} = 1,11 > 0,75$.



Рис. 5. Визначення міцності ґрунтоцементу на одноосьовий стиск

Таблиця 4

Границя міцності зразків ґрунтоцементу R_c , МПа

| № зразка | R_c , МПа (повітряно-сухі) | R_c , МПа (водонасичені) |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1,38 | 1,55 |
| 2 | 1,50 | 1,48 |
| 3 | 1,45 | 1,45 |
| 4 | 1,31 | 1,59 |
| 5 | 1,30 | 1,74 |
| 6 | 1,37 | 1,46 |
| Середнє | 1,39 | 1,54 |

Висновки з проведених досліджень

– За допомогою пристрою для швидкого визначення водонепроникності бетонів доведено, що ґрунтоцементні елементи, які утворюються в результаті закріплення ґрунтів за бурозмішувальною технологією, мають високі водонепроникні характеристики ($W12 - W14$), які недосяжні для звичайних бетонів; слід враховувати і той факт, що 1 м³ бетону у тілі протифі-

льтраційної завіси коштує близько 3000 грн, у той час як 1 м³ ґрунтоцементу, який виготовлено у тілі завіси за бурозмішувальною технологією, коштує біля 1000 грн.

– Проведеними дослідженнями доведено, що пристрій експрес-методу для визначення повітропроникності бетонів можна застосовувати для швидкого визначення водонепроникності ґрунтоцементу.

– Випробування ґрунтоцементу як закріпленого ґрунту на розм'якчливість показали, що ґрунтоцемент не тільки не розмокає у воді, але й збільшує свою міцність; цей факт підтверджується даними інших дослідників [4].

– Спираючись на результати досліджень, можна зробити загальний висновок, що ґрунтоцемент, який виготовляється за бурозмішувальною технологією, доцільно використовувати для виготовлення протифільтраційних завіс, гідроізоляції підземних споруд, а також автомобільних доріг і злітних смуг аеродромів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Армирование лессовых грунтов оснований зданий и сооружений [Текст] / И. В. Степура и др. // Межд. конф. по проблемам механики грунтов,

фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь: ПГТУ, 2004. – С. 213.

2. Зоценко, М. Л. Ефективність роз'єднувальних стінок у ґрунті при захисті існуючих будівель від впливу новобудов [Текст] / М. Л. Зоценко, О. В. Борт // Бетон и железобетон в Украине. – 2007. – № 1. – С. 24-27.
3. ДБН В.1.1-3-97. Інженерний захист територій, будинків та споруд від зсувів та обвалів. Основні положення [Текст]. – К.: Держбуд України, 1998. – 40 с.
4. Токин, А. Н. Фундаменты из цементогрунта [Текст] / А. Н. Токин. – М.: Стройиздат, 1984. – 183 с.
5. ГОСТ 12730.0-78. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1994.
6. ГОСТ 12730.5-84. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
7. ДСТУ Б В.2.1-2-96. Ґрунти. Класифікація [Текст]. – К.: Держбуд України, 1997.
8. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]. – М.: ЦИТП, 1990.

Надійшла до редколегії 16.03.2010.

Прийнята до друку 22.03.2010.

М. Л. ЗОЦЕНКО, Д. О. ТРОЦЕНКО (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка), В. А. ТИТАРЕНКО (Державний НДІ будівельних конструкцій, Київ)

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ЛЕСОВИХ ҐРУНТІВ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ АНКЕРІВ

Викладено підсумки комплексних експериментальних досліджень впливу електрохімічного закріплення лесових ґрунтів на несучу здатність анкерів.

Изложены результаты комплексных экспериментальных исследований влияния электрохимического закрепления лесовых грунтов на несущую способность анкеров.

The results of complex experimental investigations of influence of the electrochemical stabilization of loessial soils on the bearing capacity of anchors are presented.

Недоліки найбільш поширених способів закріплення нафтогазопроводів діаметром 520, 720, 820, 1020 і 1420 мм від спливання шляхом баластування залізобетонними вантажами різної конструкції (високі трудомісткість і вартість, неуніверсальність) і влаштування над трубою армованих або неармованих перемичок із закріпленого ґрунту та призм обвалювання (значний об'єм земляних робіт, трудомісткість і можливість застосування лише в осушених траншеях) докладно проаналізовані в працях С. Я. Кушніра [1], Я. С. Марчука [2], С. В. Хазіна [3] та ін., присвячених зведенню та експлуатації магістральних нафтогазопроводів на обводнених територіях.

Сучасні ефективні рішення пальових анкерів (у вигляді козлових паль; металевого Г-подібного пристрою зі сталевих труб діаметром 160 мм з вильотом консолі 1100 мм із такої ж труби; залізобетонної призматичної палі перерізом 300×300 мм із консоллю; залізобетонної клиноподібної з пазами палі з поперечною консоллю з боку труби; металевих гарпунних і гвинтових анкерів; клиноподібної палі з виступами, оберненими розширеним боком до поверхні; анкеру в пробитій свердловині з розширеними за її довжиною) для закріплення нафтогазопроводів вимагають достатньо складного технологічного обладнання, але альтернативні способи баластування вантажами чи влаштування над трубою ґрунтових перемичок і призм обвалювання поступаються їм за матеріало- і трудомісткістю [1–3].

Тому шляхом подальшого удосконалення ґрунтових анкерів може бути спрощення технології їх зведення без зменшення надійності роботи. Для закріплення нафтогазопроводів на

обводнених ділянках є сенс застосовувати електрохімічні анкери [4–7].

Електрохімічний спосіб закріплення ґрунту [4–10] базується на спроможності іонів заліза, дисоційованих при пропусканні постійного електричного струму, вступати в реакцію з ґрунтом і утворювати з ним цементуючі з'єднання. Від пропускання струму навкруги сталевих паль міцність ґрунту підвищується за рахунок:

1) спроможності електролітично асоційованого заліза утворювати у ґрунті цементуючі новоутворення;

2) участі реакційно спроможного кремнезему, що міститься у ґрунтах і теж утворює цементуючі з'єднання внаслідок проходження електричного струму.

Поки, однак, майже не проводились натурні дослідження електрохімічних анкерів у водонасичених лесових ґрунтах, широко розповсюджених на території України, через що відсутні практичні рекомендації з їх зведення та методика розрахунку несучої здатності цих анкерів.

За **мету роботи** прийнято визначення впливу електрохімічного закріплення лесових ґрунтів на несучу здатність анкерів.

Натурні дослідження електрохімічних анкерів проведено на майданчику реконструкції шпиталю за вул. Володарського, 6 у м. Полтаві. Ґрунт несучого шару (потужністю 4 м) – суглинок лесовий, важкий пилуватий, м'якопластичний, макропористий, що має такі значення фізичних характеристик: вологість $w = 0,28$; вологість на межі текучості $W_L = 0,35$; вологість на межі розкочування $W_P = 0,20$; число пластичності $I_P = 0,15$; показник текучості $I_L = 0,53$; щільність скелету ґрунту

$\rho_d = 1,45 \text{ г/см}^3$; щільність ґрунту $\rho = 1,86 \text{ г/см}^3$; коефіцієнт пористості $e = 0,86$; коефіцієнт водонасичення $S_r = 0,87$. Розрахункові значення показників механічних властивостей ґрунту склали: кут внутрішнього тертя $\varphi_{II} = 16^\circ$; питоме зчеплення $c_{II} = 15 \text{ кПа}$; модуль деформації $E = 3,3 \text{ МПа}$; питомий опір penetрації ґрунту $R = 170 \text{ кПа}$. Підстильний шар – суглинок важкий пілуватий, тугопластичний, що має такі властивості: $w = 0,235$; $W_L = 0,34$; $W_p = 0,20$; $I_p = 0,14$; $I_L = 0,25$; $\rho_d = 1,56 \text{ г/см}^3$; $\rho = 1,925 \text{ г/см}^3$; $e = 0,73$; $S_r = 0,85$; $\varphi_{II} = 21^\circ$; $c_{II} = 23 \text{ кПа}$; $E = 7 \text{ МПа}$. Рівень ґрунтових вод склав менше 3 м від поверхні землі. Водневий показник середовища склав $\text{pH} = 8,0$.

Програма досліджень включала п'ять серій випробувань на дію вертикального статичного висмикуючого навантаження. Кожна серія містила випробування п'яти анкерів-близнюків: перша – до закріплення; друга-п'ята – аналогічні навантаження анкерів після їх електрохімічного закріплення при різних (та однакових для кожної серії) затратах електроенергії. Загальна кількість випробуваних анкерів складала 25.

У якості елементів (електродів) використано стрижні з арматури АІ діаметром 20 мм і довжиною 5000 мм (з полу підвалу), що забивались вертикально молотом вагою 63 Н, який падав із висоти 0,8 м. Електроди розміщували двома паралельними рядами по 10...12 штук на кожному полюсі. Відстань між сусідніми електродами в ряду становила 500 мм, між їх рядами – 1700 мм.

Як джерело постійного струму застосовували зварювальний випрямляч електричного струму ВС-600. У період обробки ґрунту струмом робоча напруга складала 60 В, сила струму – 20...40 А, максимальний час обробки однієї захватки (п'ята серія) електродів – 16 діб (включаючи час на періодичні зміни полярності). Затрати електроенергії на один електрод склали: у другій серії – 30 кВт/год; у третій – 60 кВт/год; у четвертій – 90 кВт/год; у п'ятій – 120 кВт/год.

Для створення висмикуючого навантаження на елемент використано анкерну платформу, що служила упором гідравлічному домкрату. Статичні випробування анкерів проводили за вимогами ДСТУ Б В.2.1-1-95 за допомогою гідравлічного домкрата ДГ-10 ступенями по 1...2 кН. Для вимірювання деформацій елементів на реперній системі зі сталюго прокату встановлювали по два прогиноміри з ціною по-

ділки 0,01 мм. Тиск у домкраті створювали за допомогою насосної станції НС-400 (максимальний тиск 40 МПа). На станції встановлено зразковий манометр на 40 МПа з ціною поділки 0,4 МПа. Кожний ступінь навантаження, крім останнього, доводився до умовної стабілізації деформації. Усі анкери випробувані до «зриву».

У польових умовах дослідження будівельних властивостей ґрунту та геометричних розмірів «зони впливу» навколо електрохімічного анкеру проводилося за penetраційною методикою [11], яка базується на порівнянні значень питомого опору penetрації R ущільненого (чи закріпленого) й природного ґрунту. Для цього після завершення процесу закріплення зона ґрунту навколо електроду розроблялася по горизонтах у діаметрі, достатньому з точки зору виконання робіт (близько 1 м). Використовувався penetрометр ЛП-1 з конічним наконечником із кутом розкриття 30° при 6...8 ступенях навантаження. Щоб одержати низку даних про міцність ґрунту через кожні 10 мм від стрижня, розташування точок penetрації було прийнято за спіраллю.

Графіки залежності вертикального переміщення (підйому) Δ анкерів (кожної з 5 дослідних серій: перша – до електрохімічного закріплення ґрунтів; друга – при затратах електроенергії на один електрод $Q = 30 \text{ кВт/год}$; третя – $Q = 60 \text{ кВт/год}$; четверта – $Q = 90 \text{ кВт/год}$; п'ята – $Q = 120 \text{ кВт/год}$) від дії статичного висмикуючого навантаження P на них $\Delta = f(P)$ за підсумками їх випробувань надані на рис. 1.

З графіків $\Delta = f(P)$, зокрема, видно, що:

1) всі графіки мають лише дві майже прямолінійні гілки (початкову, котра відповідає пружним деформаціям, у межах яких реалізується опір ґрунту за бічною поверхнею стрижня, та різкий «зрив», тобто вичерпання несучої здатності анкеру), а нелінійна (відповідає пружнопластичній стадії роботи ґрунту основи) ділянка – відсутня;

2) «зрив» графіків відбувається при підйомі анкерів, величина якого як до, так і після зміцнення ґрунту складає $\Delta \leq 1 \text{ см}$ (але, якщо для стрижня до пропускання струму «зрив» відбувався при $\Delta \leq 0,25 \text{ см}$, то після закріплення ґрунту «зрив» реалізовувався вже при $\Delta = 0,35...0,85 \text{ см}$);

3) при збільшенні затрат електроенергії на обробку кожного електроду несуча здатність анкерів також зростала.

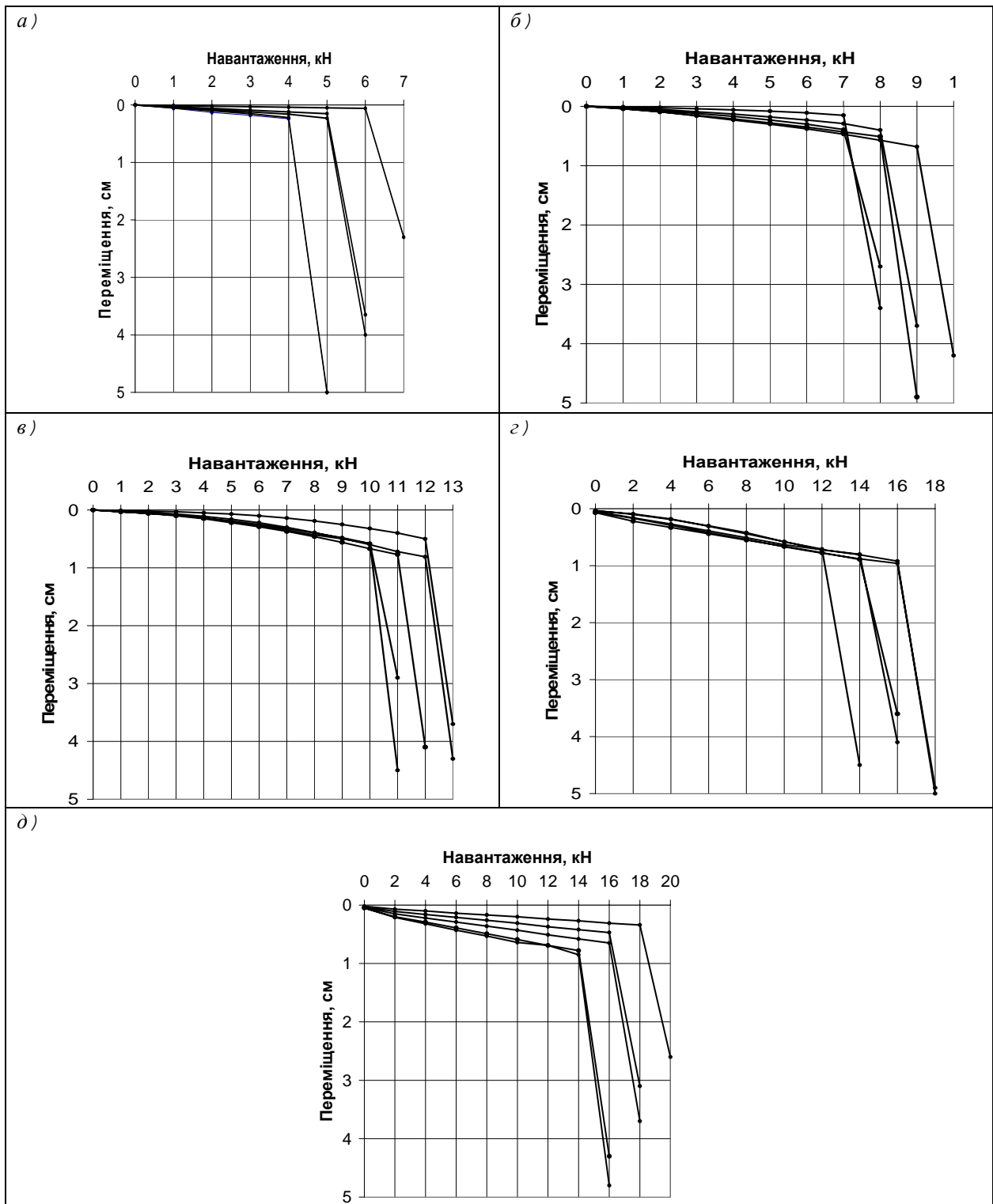


Рис. 1. Графіки залежності підйому анкерів від висмикуючого навантаження для дослідних серій:
 а) – до закріплення ґрунтів; б) – при затратах електроенергії на електрод 30 кВт/год; в) – 60 кВт/год;
 з) – 90 кВт/год; д) – 120 кВт/год

Для анкерів до обробки струмом ґрунту окремі граничні значення опору елементів висмикуванню склали $F_u = 4...6$ кН при кінцевому переміщенні $\Delta = 2,3...5,8$ см. Статистична обробка даних показала, що розрахункова величина їх несучої здатності – $F_d = 4,5$ кН при

коефіцієнті варіації $v = 0,174$. Для інших анкерів після обробки ґрунту струмом визначено показники зростання несучої здатності анкерів. При: $Q = 30$ кВт/год $F_u = 7...9$ кН при $\Delta = 2,7...4,9$ см; $F_d = 7,0$ кН ($v = 0,107$); $Q = 60$ кВт/год $F_u = 10...12$ кН при

$\Delta = 2,9 \dots 4,5$ см; $F_d = 10,05$ кН ($\nu = 0,091$);
 $Q = 90$ кВт/год $F_u = 14 \dots 18$ кН при
 $\Delta = 3,6 \dots 5,0$ см; $F_d = 14,8$ кН ($\nu = 0,102$);
 $Q = 120$ кВт/год $F_u = 16 \dots 20$ кН при
 $\Delta = 2,6 \dots 4,8$ см; $F_d = 17,5$ кН ($\nu = 0,096$).

Таким чином, відповідно до проведених досліджень і статистичної обробки їх результатів, кінцевий ефект зростання несучої здатності анкерів внаслідок закріплення водонасиченого лесоподібного ґрунту постійним електричним струмом навколо електродів складає $17,5/4,5 \approx 3,9$ разу.

На рис. 2 наведено графік зміни питомого опору penetрації з віддаленням від електрода. Межу «зони впливу» в площині поперечного перерізу анкера визначають за графіком у точці, де крива зміни R переходить у пряму, паралельну осі абсцис. Математично цей факт установлено статистичними розрахунками для визначенням точності R . Коли R_i перевищить величину $R_n + \sigma$ (де R_n – питомий опір penetрації природного ґрунту, σ – середнє квадратичне відхилення даної величини), це відповідає умовам закріпленого ґрунту.

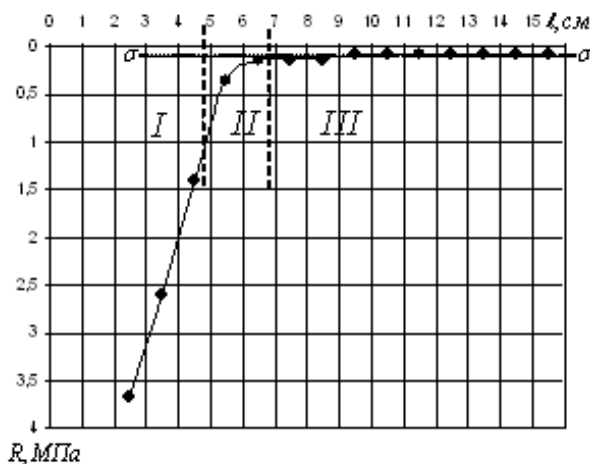


Рис. 2. Залежність питомого опору ґрунту penetрації R , МПа, від відстані l , см, до центра стрижня:
 I – зона закріплення; II – перехідна зона;
 III – природний ґрунт

Діаметр «зони впливу» – 136 мм, що перебільшує значення, встановлене вимірами елемента (рис. 3), де ця величина склала 98 мм. Для розрахунків вважаємо зоною закріплення навколо анкера ту частину «зони впливу», яка утримується при стрижні після його виймання з основи. Мінімальне значення питомого опору penetрації ґрунту в зоні закріплення $R = 0,90$ МПа.

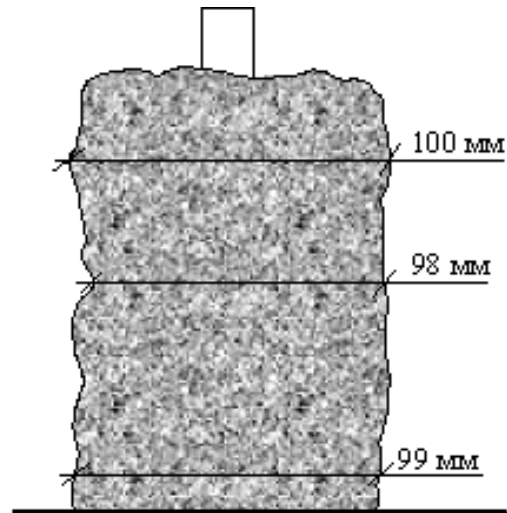


Рис. 3. Фрагмент електрода із закріпленим навколо нього ґрунтом, вийнятого з масиву

У процесі розкриття «зони впливу», яка безпосередньо прилягала до стрижнів, відбирались зразки для лабораторних випробувань, аналогічні зразкам ґрунту природного складу. Гранулометричний склад ґрунту визначався методом піпетки з використанням у якості диспергатора 10 % розчину пірофосфату натрію, а також із додатковим кип'ятінням ґрунту. Після закріплення глинистого ґрунту в його гранулометричному складі на 10...15 % збільшилася кількість пилюватих частинок (за рахунок зменшення глинистих). Це свідчить про утворення нових агрегатів розміром пилюватих частинок із глинистих за рахунок їх цементації. Як цементи можна розглядати гідрати оксидів заліза, алюмінію і кальцію.

Структурні зв'язки між глинистими частинками, утворені за їх допомогою, витримали дію 10 % розчину пірофосфату натрію, який до 20 % додавався до дистильованої води, і наступного кип'ятіння. Це свідчить про стійкість нових цементаційних зв'язків, котрі утворилися внаслідок електрохімічного закріплення ґрунту. У табл. 1 показано зіставлення величин властивостей для природного й закріпленого ґрунту.

Тобто, констатуємо, що від закріплення в ґрунті утворилися нові жорсткі зв'язки. За їх рахунок у середньому щільність скелету ґрунту зросла на $0,08$ г/см³ (на 5,5 %), підвищилась міцність ґрунту (розрахункові значення кута внутрішнього тертя зросли на 6° , а питомого зчеплення – майже в 3 рази), а його деформативність зменшилась у 2,7 разу, питомий опір penetрації R збільшився приблизно в 2,5 раз.

За даними досліджень, простежується й продовження зміцнення лесоподібного ґрунту й

після завершення пропускання постійного електричного струму крізь водонасичений ґрунт.

Таблиця 1

Зіставлення величин фізико-механічних характеристик природного й закріпленого ґрунту

| Характеристики ґрунту | одиниці виміру | природний ґрунт | закріплений ґрунт |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Вологість | % | 28 | 22 |
| Вологість на межі текучості | % | 35 | 29 |
| Вологість на межі розкочування | % | 20 | 19 |
| Число пластичності | % | 15 | 10 |
| Показник текучості | - | 0,55 | 0,30 |
| Щільність скелету | г/см ³ | 1,45 | 1,53 |
| Коефіцієнт пористості | - | 0,86 | 0,76 |
| Коефіцієнт водонасичення | - | 0,87 | 0,78 |
| Кут внутрішнього тертя | ° | 16 | 22 |
| Питоме зчеплення | кПа | 15 | 44 |
| Модуль деформації | МПа | 3,3 | 9,0 |
| Питомий опір penetрації | кПа | 170 | 420 |

Зменшення меж пластичності і числа пластичності відповідає зміні гранулометричного складу ґрунту. Питоме зчеплення ґрунту збільшилося (а його показник текучості відповідно знизився) внаслідок дії електрохімічних процесів, тобто за рахунок виникнення додаткових нерозчинних цементацийних зв'язків, відповідно підвищився модуль деформації. Збільшення кута внутрішнього тертя відбулося за рахунок збільшення площі контактів частинок. Щільність скелету зросла за рахунок утворення додаткових цементацийних зв'язків і, можливо, дії електрокінетичних процесів.

Дослідженнями одержано нові дані про розміри і будову «зони впливу» при електрохімічному закріпленні ґрунту. Навколо електрода виділено три області: I – область закріплення ґрунту розміром у 5 діаметрів поперечного перерізу стрижня (питомий опір penetрації у ній зменшується пропорційно відстані від стрижня і коливається від $36,7R_n$ до $10R_n$); II – перехідна область товщиною, що приблизно дорівнює діаметру стрижня (питомий опір penetрації у

цій зоні зменшується зі збільшенням відстані від стрижня і коливається від $10R_n$ до $R_n + \sigma$); III – область природного ґрунту.

«Зона впливу» при електрохімічному закріпленні ґрунту складається з двох частин (закріплення та перехідної) і становить 6,8 діаметра поперечного перерізу електроду.

За даними змінності граничних значень опорів F_u , кН, і розрахункових значень несучої здатності F_d , кН, електрохімічних анкерів від витрат електроенергії Q , кВт/год, на закріплення ґрунту навколо електродів побудовано графіки залежності $F_u = f(Q)$ та $F_d = f(Q)$, які можливо апроксимувати лінійними функціями:

$$F_u = a + b \cdot Q, \quad (1)$$

де $a = 4,68$ кН, та $b = 0,114$ кН/кВт/год – емпіричні коефіцієнти, при коефіцієнтах кореляції $r = 0,96$ і варіації $v = 0,13$;

$$F_d = a + b \cdot Q, \quad (2)$$

де $a = 4,00$ кН, та $b = 0,113$ кН/кВт/год при коефіцієнтах кореляції $r = 0,99$ і варіації $v = 0,06$.

Отже, встановлено, що величина несучої здатності електрохімічних анкерів на дію статичного висмикуючого навантаження лінійно залежить від витрат електроенергії на закріплення ґрунту навколо електродів.

Висновки

Несуча здатність занурених у водонасичений лесоподібний ґрунт арматурних елементів на дію вертикального висмикуючого навантаження після електрохімічного закріплення збільшилася у 3,9 разу. Зростання значення несучої здатності анкерів лінійно залежить від витрат електроенергії постійного електричного струму на закріплення ґрунту навколо електродів.

«Зона впливу» навколо стрижня-електроду при електрохімічному закріпленні ґрунту складається з двох областей: закріплення, діаметр якої не перевищує 5 діаметрів поперечного перерізу електроду, та перехідної, діаметр якої досягає 6,8 діаметра поперечного перерізу електроду. У межах області закріплення внаслідок дії електрокінетичних й електрохімічних процесів змінюється гранулометричний склад за рахунок зменшення кількості глинистих частинок і відповідно збільшення пилюватих, збіль-

шується площа контактів частинок. Ці ефекти є наслідком незворотної цементації глинистих частинок в агрегати пилюватої фракції.

Простежується зростання у 2,5...3 рази показників міцності та зменшення деформативності ґрунту в області закріплення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кушнір, С. Я. Особенности расчета и проектирования призм обвалования магистральных газопроводов в условиях Ямала [Текст] / С. Я. Кушнір // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях : тр. межд. науч.-техн. конф. – Уфа: «БашНИИстрой», 2006. – т. 2. – С. 191-195.
2. Марчук, Я. С. Діагностування технічного стану газопроводу під час капітального ремонту – науковий підхід [Текст] / Я. С. Марчук, Л. С. Шлапак // Нафт. і газова промисловість. – 2004. – № 4. – С. 44-45.
3. Хазин, С. В. Свайные анкеры для закрепления нефтегазовых трубопроводов [Текст] / С. В. Хазин, В. И. Хазин, Ю. Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – 252 с.
4. Трушинский, М. Ю. Электрохимические анкеры и сваи в фундаментостроении [Текст] / М. Ю. Трушинский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1996. – № 3. – С. 9-11.
5. Зоценко, Н. Л. Влияние постоянного электрического тока на пластические свойства лессовидного суглинка [Текст] / Н. Л. Зоценко, Н. И. Лапин // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях : тр. межд. науч.-техн. конф. – Уфа: «БашНИИстрой», 2006. – т. 2. – С. 60-66.
6. Троценко, Д. О. Баластування трубопроводів анкерами за допомогою електричного струму [Текст] / Д. О. Троценко // Інформаційний огляд. – ДК «Укртрансгаз», 2003. – № 1 (19). – С. 19-20.
7. Троценко, Д. О. Натурні дослідження електрохімічних анкерів для закріплення нафтогазопроводів [Текст] / Д. О. Троценко // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр. – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – Вип. 22. – С. 103-110.
8. Бондаренко, В. И. Электрохимическое закрепление пород в горном деле [Текст] / В. И. Бондаренко, С. Ф. Власов, В. В. Захаров. – Д.: Вид-во ДДУ, 1993. – 212 с.
9. Бугаев, В. Т. Экспериментальная установка для исследования электроосмоса при погружении моделей свай [Текст] / В. Т. Бугаев, И. Н. Мироненко // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. – Вип. 53, Кн. 2. – К.: НДІБК, 2000. – С. 39-42.
10. Передерій, В. М. Електрохімічне закріплення глинистих ґрунтів [Текст] / В. М. Передерій // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне: РДТУ, 1999. – Вип. 2. – С. 197-203.
11. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти [Текст] : підручник / М. Л. Зоценко та ін. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.

Надійшла до редколегії 15.03.2010.

Прийнята до друку 22.03.2010.

Л. Л. КАУФМАН (США), Б. А. ЛЫСИКОВ, К. И. ЗАПОЛОВА (Донецкий национальный технический университет), И. Ж. СИРАЧЕВ (ОАО «Трест Донецкшахтопроходка», Донецк)

ОПЫТ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Наведено приклади будівництва підземного комплексу гідроелектростанції в Непалі та каналізаційного тунелю в США, в яких при визначенні кошторисної вартості враховувалися геотехнічні ризики.

Приведены примеры строительства подземного комплекса гидроэлектростанции в Непале и канализационного туннеля в США, в которых при определении сметной стоимости учитывались геотехнические риски.

The article gives examples of underground construction of hydropower station in Nepal and sewer tunnel in the USA. These projects pay attention to influence of geotechnical risks and their consequences.

Строительство подземных структур включает много геотехнических рисков, из-за чего участники проекта, финансирующие и выполняющие строительство, требуют их качественного и количественного анализа и учета при определении ожидаемого бюджета [1].

Примером такого строительства служит станция Nyadi Hydropower (Непал) мощностью 20 MW. Проектом, выполненным в 2000 г. предусматривалась базовая стоимость, равная 32,25 млн долл. со сроком строительства 5 лет. В состав проекта входили бетонная плотина через реку Nyadi, подземный резервуар, а также головной туннель, подводящий воду к турбинам по стальной напорной трубе длиной 3,7 км.

К сожалению, хотя в Непале ранее были построены подобные электростанции, участники проекта не располагали данными о фактических рисках подземного строительства и связанных с ними затратами. Поэтому единственной альтернативой для получения сведений о возможных опасностях был опрос людей, вовлеченных ранее в гидротехнические работы.

Приглашенный для оценки риска персонал имел значительный опыт и состоял из независимых консультантов. При обсуждении ими совместно с представителями подрядчика поставленных вопросов было принято решение о классификации рисков и их относительной важности (табл. 1).

Таблица 1

Классификация и относительная важность рисков

| Вид риска | Факторы риска | Относительная важность, % |
|-----------------------|--|---------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Риск общего характера | Подземные геологические условия | 9,6 |
| | Условия площадки строительства и другие изменяющиеся условия | 5,4 |
| | Ошибки проектирования | 5,4 |
| | Избыточная экскавация | 11,2 |
| | Всего | 31,6 |
| Риск единицы работ | Инфляция | 2,5 |
| | Колебания курса валют | 4,6 |
| | Дефектные работы | 4,0 |
| | Производительность труда | 3,8 |
| | Производительность оборудования | 4,5 |
| | Всего | 19,4 |

Таблица 1 (окончание)

| 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------------|---|------|
| Риск нарушения графика строительства | Трудовые споры, забастовки | 3,2 |
| | Несчастные случаи, повреждения людей и собственности | 4,4 |
| | Запаздывание проектной документации | 4,2 |
| | Аварии оборудования | 6,9 |
| | Возможности ресурсов, своевременная поставка оборудования | 6,6 |
| | Изменения порядка переговоров и решения споров | 3,4 |
| | Неблагоприятные погодные условия | 2,1 |
| | Всего | 30,8 |
| Другие риски | Публичные беспорядки, терроризм | 9,4 |
| | Требование согласований и их получение | 5,8 |
| | Стандарты и правила | 3,0 |
| | Всего | 18,2 |

В зависимости от предыдущей изученности факторов риска и имеющегося опыта было проведено ранжирование влияния этих факторов

на стоимость строительства. Для случая гидростанции Nyadi шкала ранжирования несколько изменена (табл. 2).

Таблица 2

Ранжирование влияния изученности факторов риска на стоимость строительства

| Изученность факторов риска | Класс изученности риска | Краевые значения ранжирования | |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------|
| | | нижняя | верхняя |
| Хорошая | A | - 5 % | + 20 % |
| Приемлемая | B | - 10 % | + 30 % |
| Недостаточная | C | - 15 % | + 50 % |
| Плохая | D | - 20 % | + 100 % |

Далее применительно к головному туннелю станции Nyadi рассматривается методика расчета влияния рисков на определение стоимости строительства.

На 1-ом шаге расчета в зависимости от сметной (базовой) стоимости объектов, входящих в комплекс головного туннеля и важности (веса) каждого фактора риска, были определены взвешенные базовые значения стоимости видов работ (табл. 3). На 2-ом шаге в зависимости от влияния изученности факторов риска были определены краевые значения взвешенной стоимости каждого вида работ (табл. 4).

Краевые значения определяют диапазон варьирования стоимости работ, а сумма этих значений – границы варьирования общих затрат на строительство головного туннеля. Од-

нако, вместо простого сложения краевых значений, для объективной оценки факторов риска был применен метод статистических испытаний Монте-Карло. С этой целью для каждого вида работ были построены треугольники вероятностного распределения, где в основаниях треугольников находятся базовые и краевые значения взвешенной стоимости работ из табл. 4, а высотой является их вероятность.

Предполагалось, что сложение таких треугольников, соответствующих видам работ, позволит получить функцию нормального распределения, для которой могут быть определены форма, дисперсия (мера разброса), среднее отклонение. С помощью специальных программ были получены четыре кривых распределения для каждого фактора риска.

Таблица 3

Взвешенные базовые значения стоимости работ, входящих в комплекс головного туннеля

| Вид работ | Базовая стоимость тыс. долл. | Взвешенные базовые значения стоимости, тыс. долл. | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|---|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | | Риск общего характера (вес 0,316) | Риск единицы работ (вес 0,194) | Риск нарушения графика (вес 0,308) | Другие риски (вес 0,182) |
| Обустройство площадки строительства | 191,20 | 60,42 | 37,09 | 58,89 | 34,80 |
| Портал | 23,67 | 7,48 | 4,58 | 7,29 | 4,30 |
| Экспкация туннеля | 721,68 | 228,05 | 140,00 | 222,28 | 531,35 |
| Железобетонная крепь | 773,28 | 224,36 | 150,00 | 238,17 | 140,74 |
| Анкерная крепь | 215,59 | 68,13 | 41,82 | 66,40 | 39,24 |
| Опережающая крепь | 99,37 | 31,40 | 19,28 | 30,60 | 18,08 |
| Разведочные скважины | 19,37 | 6,12 | 3,76 | 9,97 | 3,53 |
| Тампонажные работы | 162,28 | 51,28 | 31,48 | 50,00 | 29,53 |
| Бетонная крепь | 251,20 | 79,38 | 48,73 | 77,37 | 45,72 |
| Итого | 2457,67 | 776,60 | 476,77 | 756,94 | 447,28 |
| Прочие | 451,28 | | | | |
| Всего | 2908,95 | | | | |

Таблица 4

Краевые значения взвешенной стоимости работ, входящих в комплекс головного туннеля

| № п/п | Виды работ | Полная базовая стоимость, тыс. долл | Знак диапазона | Риск общего характера | | | |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| | | | | Взвешенные базовые значения стоимости | Класс риска | Границы диапазона | Краевые значения стоимости |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Обустройство площадки строительства | 191,20 | - + | 60,42 | <i>B</i> | 0,9 1,3 | 54,38 78,55 |
| 2 | Портал | 23,67 | - + | 7,48 | <i>A</i> | 0,95 1,2 | 7,10 8,98 |
| 3 | Экспкация туннеля | 721,68 | - + | 228,05 | <i>D</i> | 0,82 | 182,44 456,10 |
| 4 | Железобетонная крепь | 773,28 | - + | 224,36 | <i>C</i> | 0,85 1,5 | 190,71 336,54 |
| 5 | Анкерная крепь | 215,59 | - + | 68,13 | <i>B</i> | 0,9 1,3 | 61,32 88,57 |
| 6 | Опережающая крепь | 99,37 | - + | 31,40 | <i>B</i> | 0,9 1,3 | 28,26 40,82 |
| 7 | Разведочные скважины | 19,37 | - + | 6,12 | <i>B</i> | 0,9 1,3 | 5,51 7,96 |
| 8 | Тампонажные работы | 162,28 | - + | 51,28 | <i>D</i> | 0,82 | 41,02 102,56 |
| 9 | Бетонная крепь | 251,20 | - + | 79,38 | <i>D</i> | 0,82 | 63,50 158,76 |

Таблица 4 (продолжение)

Краевые значения взвешенной стоимости работ, входящих в комплекс головного туннеля

| Риск единицы работ | | | | Риск нарушения графика | | | |
|---------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Взвешенные базовые значения стоимости | Класс риска | Границы диапазона | Краевые значения стоимости | Взвешенные базовые значения стоимости | Класс риска | Границы диапазона | Краевые значения стоимости |
| <i>9</i> | <i>10</i> | <i>11</i> | <i>12</i> | <i>13</i> | <i>14</i> | <i>15</i> | <i>16</i> |
| 37,09 | A | 0,95 1,2 | 35,24 44,51 | 58,89 | D | 0,82 | 47,11 117,78 |
| 4,58 | A | 0,95 1,2 | 4,35 5,50 | 7,29 | B | 0,9 1,3 | 6,56 9,48 |
| 140,00 | D | 0,8 2 | 112,00 28,00 | 222,28 | D | 0,82 | 177,82 444,56 |
| 150,00 | A | 0,95 1,2 | 142,50 180,00 | 238,17 | C | 0,85 1,5 | 202,44 357,26 |
| 41,82 | A | 0,95 1,2 | 39,73 50,18 | 66,4 | B | 0,9 1,3 | 59,76 86,32 |
| 19,28 | B | 0,9 1,3 | 17,25 25,06 | 30,60 | B | 0,9 1,3 | 27,54 39,78 |
| 3,76 | B | 0,9 1,3 | 3,38 4,89 | 5,97 | B | 0,9 1,3 | 5,37 7,76 |
| 31,48 | A | 0,95 1,2 | 29,91 37,78 | 50,00 | B | 0,9 1,3 | 45,00 65,00 |
| 48,73 | B | 0,9 1,3 | 43,86 63,35 | 77,37 | B | 0,9 1,3 | 69,63 100,58 |

Таблица 4 (окончание)

Краевые значения взвешенной стоимости работ, входящих в комплекс головного туннеля

| Другие риски | | | |
|---------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Взвешенные базовые значения стоимости | Класс риска | Границы диапазона | Краевые значения стоимости |
| <i>17</i> | <i>18</i> | <i>19</i> | <i>20</i> |
| 34,80 | C | 0,8...1,5 | 29,58...55,20 |
| 4,30 | B | 0,9...1,3 | 3,87...5,59 |
| 131,55 | D | 0,8...2,0 | 105,24...263,10 |
| 170,74 | B | 0,9...1,3 | 153,67...221,96 |
| 39,24 | B | 0,9...1,3 | 35,32...51,01 |
| 18,08 | B | 0,9...1,3 | 16,27...23,50 |
| 3,53 | B | 0,9...1,3 | 3,18...4,59 |
| 29,53 | B | 0,9...1,3 | 26,58...38,39 |
| 45,72 | B | 0,9...1,3 | 41,15...59,44 |

После их соединения определилась результирующая кривая нормального распределения, которая представила риск общего состава работ и позволила с достаточной степенью уверенности определить непредвиденные затраты, необ-

ходимые для успешного завершения строительства. Для головного туннеля электростанции Nyadi эти затраты составили 15 % от базовой стоимости (436,34 тыс. долл.).

Подобным же образом были определены непредвиденные расходы и для других объектов проекта. Их общая величина равнялась 20,2 % от базовой стоимости, что было на 7 % выше первоначально (без учета рисков) запланированных расходов [2–4].

В проекте строительства канализационного туннеля Fall Creek/White River, Indianapolis, Индиана (США) применялся регистр рисков, позволивший четко ограничить и идентифицировать опасности, возникающие при проходческих работах, их причины и возможные последствия. Так, в частности, на стадии предварительного выбора направления трассы туннеля оценивался риск притока подземных вод в трех вариантах маршрута и длины туннеля, которая колебалась от 12 до 17 км.

При строительстве использовались буровые туннельные машины, а в качестве постоянной крепи – монолитный бетон. Основные риски строительства включали:

- потенциальное воздействие на ближайшие существующие общественные и частные скважины водоснабжения;
- повышенное просачивание подземных вод в строящийся туннель и расходы на усиление системы водоотлива;

– истощение ресурсов водоснабжения района – природных подземных резервуаров.

Регистр рисков идентифицировал опасность притоков подземных вод с точки зрения соответствия регулирующим нормативам, контрактным документам, озабоченности акционеров, технологии и безопасности строительства.

По шкале от 5 баллов до 1 было произведено ранжирование вероятности рисков (табл. 5), а по шкале от 1 до 5 классифицировались их последствия (табл. 6).

Таблица 5

Классификация вероятности рисков

| Класс вероятности рисков | Характеристика вероятности рисков |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 5 | весьма вероятный |
| 4 | вероятный |
| 3 | случайный |
| 2 | маловероятный |
| 1 | весьма маловероятный |

Затем результаты этих оценок вводились в регистр рисков (табл. 7).

Таблица 6

Тяжесть последствий рисков

| Последствия риска | Тяжесть последствий рисков | | | | |
|--|---|--|---|--|---|
| | незначительная | существенная | серьезная | тяжелая | катастрофическая |
| Финансовые потери. Воздействие на график строительства | менее 100 тыс. долл. 1...7 дней | 100...700 тыс. долл. 7...21 дней | 750 тыс....2 млн 21...90 дней | 2 млн....10 млн 3...9 мес. | Более 10 млн долл. 9 мес....1 год и более |
| Социальная окружающая среда | Жалобы общественности | Запросы местных властей/политиков | Жалобы местных властей/политиков | Большое местное воздействие или малое национальное воздействие | Национальное или международное воздействие |
| Нормативные материалы, законы | Частичное несоблюдение | Несоблюдение с возможными претензиями третьего участника | Систематические несоблюдения с возможными штрафами или претензиями третьего участника на сумму 100000 долл. | То же с претензиями на сумму более 100000 долл. | Значительные последствия для старшего персонала, потенциально большой ущерб |
| Здоровье и безопасность | Малый травматизм или его опасность | Малый травматизм | Серьезная травма или множественные малые травмы | Множественные серьезные травмы или травмы третьего участника | Серьезная травма или смертность третьего участника |
| Окружающая природная среда | Малое кратковременное местное воздействие | Серьезное кратковременное местное воздействие | Кратковременное региональное воздействие | Долговременное местное воздействие | Долговременное региональное воздействие |

Фрагмент регистра рисков при строительстве туннеля

| Вид | Причина опасности | Возможные последствия | Вероятность риска (А) | Последствия риска (В) | | | | | | Оценка риска С = А×В |
|----------------------|---|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| | | | | Финансовые | График строительства | Социальная среда | Нормативная база | Здоровье и безопасность | Природная среда | |
| Тампонажные работы | Тампонаж воздействует на скважины водоснабжения | Скважины перекрываются тампонажем | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | | | 12 |
| Устойчивость туннеля | Ошибки подрядчика | Задержка строительства | 2 | 3 | 2 | | | | | 6 |
| | | Обрушение пород | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | | 10 |

Эта таблица представляет собой учебный фрагмент с тремя видами рисков из общего состава работ, представленного в регистре. Наконец, проводилась оценка опасности риска умножением класса вероятности риска из табл. 5 на наивысшую оценку его возможных последствий из табл. 6.

Результатом этих расчетов было зонирование опасностей рисков по категориям – низких, средних или высоких. Завершило оценку рисков применение метода Монте-Карло, который дал распределение общей вероятности вызванного рисками увеличения стоимости или срока строительства, что позволяет учесть в бюджете проекта дополнительные затраты на непредвиденные обстоятельства [5, 6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кауфман, Л. Л., Геотехнические риски подземного строительства [Текст] / Л. Л. Кауфман, Б. А. Лысиков. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 362 с.

2. Allocating the Risk of Subsurface Conditions on Underground Construction Projects [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ralaw.com/resourcess/documents/Allocating%20Risk>
3. Contract Strategies in Construction Projects [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://www.atkinson-law.com/cases/Cases Articles/Contract-Strategies.htm](http://www.atkinson-law.com/cases/Cases%20Articles/Contract-Strategies.htm)
4. Hoek, E. Geotechnical Considerations in tunnel design and contract preparation [Электрон. ресурс] / E. Hoek. – Режим доступа: <http://www.rocsience.com/hoek/references/H1982.pdf>
5. Groundwater risk register [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.indygov.org/NR/rdonlyrer/IE9E43CO-7SAO-4D18>
6. Jsaksson, I. Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel project [Электрон. ресурс] / I. Jsaksson. – Режим доступа: <http://www.diva-portal.org/kth/thesrs/abstract.xsql.dbid>

Поступила в редколлегию 11.03.2010.

Принята к печати 15.03.2010.

В. И. ЛЕЩЕНКО, Л. Г. ПОЛИТИКОВА, М. С. ХОРОЛЬСКИЙ (ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ», Днепропетровск)

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗИНОВЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ

Проведено роботи зі створення ефективних гумових ущільнювачів для герметизації стиків у підземних спорудах із збірного залізобетону та чавуну, в тому числі тунельних обкладинок метро.

Проведены работы по созданию эффективных резиновых уплотнителей для герметизации стыков подземных сооружений из сборного железобетона и чугуна, в том числе тоннельных обделок метро.

The works on creation of effective rubber sealants for hermetic sealing of joints of underground structures from modular ferro-concrete and pig-iron, including tunnel elements for the underground, are carried out.

В настоящее время изделия из резины, благодаря своим специфическим свойствам, все более широко используются в разных областях народного хозяйства.

Резина относится к эластомерным материалам с резко выраженной способностью к высокоупругому деформированию в достаточно широком интервале температур. Очень важной характеристикой резины является ее сравнительно небольшая твердость и способность к большому упругим деформациям, что позволяет ей быть одним из наиболее распространенных материалов для изготовления уплотнителей разнообразного назначения.

Изделия из резины, которые эксплуатируются в технике принято называть резинотехническими изделиями (РТИ). Среди них наиболее распространена группа уплотнителей.

В практике строительства метрополитенов, стволов шахт и тоннелей в качестве постоянной крепи – обделки, как правило, используются чугунные тубинги и железобетонные блоки. В зависимости от того, на какой глубине и в каких грунтах проходят тоннели, выбирают конструкции сооружений и материалы для них.

Ранее при строительстве метрополитенов в Украине чаще всего использовали чугунные тубинги, а герметизацию стыков между ними осуществляли уплотнителями из свинца. Но такой материал является пластичным и после того, как тоннельная обделка собрана, часто, вследствие деформирования грунтов, в том числе и от динамических нагрузок при движении тяжелых поездов, стыки соединений чугунных тубингов перестают быть герметичными, т.е. надежность таких уплотнителей является невысокой. Кроме того, свинец является дефицитным материалом, а его использование требует сложной технологии.

В Государственном предприятии «Украинский научно-исследовательский конструкторско-технологический институт эластомерных материалов и изделий» (ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ», г. Днепропетровск) ранее накоплен большой опыт разработки РТИ для сложных объектов ракетно-космического и военно-промышленного комплексов, имеющих большие надежность, сроки эксплуатации и сохранения эксплуатационных характеристик (свыше 20 лет). В связи с развитием метро и тоннелестроения в Украине возникла потребность провести научные исследования и предварительные испытания с целью использования полученного опыта создания резиновых уплотнителей для герметизации тоннельных обделок.

Преимущества использования резины для уплотнителей тоннельной обделки заключаются в следующем:

- 1) за счет упругих свойств резины повышается надежность герметизации стыков;
- 2) резина имеет значительно меньшую твердость, а это дает возможность применять железобетонные блоки вместо чугунных;
- 3) затраты на материалы для уплотнения межобделочных швов уменьшаются;
- 4) если резину защитить от старения, то срок эксплуатации уплотнителей из нее можно значительно увеличить;
- 5) резина имеет небольшой вес;
- 6) монтаж резиновых уплотнителей можно осуществлять в условиях производства железобетонных блоков, что значительно повышает комфортность и производительность труда;
- 7) сравнительная простота монтажа и экономическая безопасность.

Следовательно, резина может успешно конкурировать со свинцом для изготовления уплотнителей. При этом их конструкция должна

быть достаточно простой, чтобы обеспечить высокопроизводительную работу при изготовлении и высокое качество при монтаже.

Каждое кольцо обделки тоннеля состоит из определенного количества блоков, которое зависит от диаметра кольца и назначения. Герметизация межблочных соединений по поперечным (кольцевым) и продольным (радиальным) бортам железобетонных тубингов и блоков обеспечивается за счет точности изготовления блоков, точности их сборки, канавок для резиновых уплотнителей и самих уплотнителей. При этом резиновые уплотнители блоков, в процессе деформации между собой в тоннельном кольце фланцевой стороной, создают сплошной пояс герметизации между кольцами обделки в продольном направлении, при деформации торцевой стороной, создают пояс

герметизации в радиальном направлении. Такие пояса герметизации могут выполняться как с перевязкой швов, так и без их перевязки.

Резина склонна к старению, из-за чего срок эксплуатации изделий из нее резко уменьшается. Поэтому в ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ» на основании широкомасштабных и комплексных исследований разработаны рецептуры резин для изготовления уплотнителей с высокими эксплуатационными свойствами. Применяемые резины отвечают требованиям эксплуатации изделий и на них разработана нормативная документация.

Для изготовления уплотнителей используются два типа резины сложного состава: тип I – для профиля и тип II – для стыковки.

Данные по разработанным резинам приведены в табл. 1.

Таблица 1

| № п/п | Основные показатели резины | Единица измерения | Резина | |
|-------|---|-------------------|--------|---------------------------------|
| | | | Тип 1 | Тип 2 |
| 1 | Условная прочность при растяжении, не менее | МПа | 12,0 | 16,7 |
| 2 | Относительное удлинение при разрыве, не менее | % | 300 | 550 |
| 3 | Твердость по Шору А | Один Шор | 55±5 | 55 ⁺⁵ ₋₁₀ |
| 4 | Твердость в международных единицах (IRHD) | Единица IRHD | 65±5 | 55±5 |
| 5 | Относительная остаточная деформация после старения в воздухе при сжатии на (20±3) % в течение 24 часов при температуре плюс (70±2) °С, не более | % | | |

Как видно из таблицы, физико-механические свойства резины обоих типов обеспечивают условия изготовления эффективных уплотнителей и их монтажа в посадочные канавки блока. Достаточно большая условная прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве обеспечивают осуществление легкого монтажа и плотную их установку в канавки блока. Средняя твердость резины позволяет без больших усилий осуществлять сборку блоков в кольцо обделки и колец между собой.

Испытания по специальным методикам ускоренного определения эксплуатационных характеристик уплотнителей из разработанных резин показали, что в определенных условиях они сохраняют свои свойства до 100 лет.

Тоннельная обделка представляет собой железобетонные блоки, соединенные между собой в кольца, которые, в свою очередь, последовательно стыкуются между собой по ходу тоннеля. Количество железобетонных блоков в тоннельном кольце зависит от диаметра тоннеля. Каждый железобетонный блок выполняет оп-

ределенную функцию, поэтому размеры их разные, а это требует и разных типоразмеров уплотнителей.

Схема герметизации тоннельной обделки выбрана такой, чтобы на каждый блок монтировался свой уплотнитель в виде прямоугольной рамочной прокладки. При этом посадочные места под прокладки в сопредельных блоках должны совпадать друг с другом. Таким образом, прокладка одного блока стыкуется с прокладкой сопредельного блока по рабочей поверхности. Размеры прокладок и посадочных мест блоков рассчитаны так, что в пределах точности монтажа имеют место контактные напряжения в резине, достаточные для обеспечения герметичности в течение заданного срока эксплуатации тоннеля. Профиль прокладки выполнен в виде двух соединенных по большей стороне трапеций. На меньшей стороне выполнены продольные пазы для уменьшения объема и повышения контактных напряжений. Этой стороной осуществляется посадка прокладки на блок в специальной канавке, расположенной по

периметру блока. Для того, чтобы прокладка крепче держалась в канавке блока, она имеет несколько меньшие размеры, чем размеры канавки блока, т.е. прокладка насаживается на блок с натяжением, не превышающим 10 %. Большее натяжение недопустимо, поскольку такой механический фактор отрицательно влияет на процесс старения резины. Перед установкой прокладки на блок, подготовленное посадочное место покрывается тонкой пленкой адгезионного материала. Поэтому прокладка крепко удерживается на блоке, как в процессе транспортирования, так и в процессе монтажа.

В средней части прокладки имеются продольные цилиндрические каналы. Они расположены по отношению к пазам на меньшей стороне трапеции так, чтобы при уменьшении объема прокладки она не утратила упругих свойств, а ее элементы – устойчивость в собранном виде в кольце обделки. После монтажа прокладки должны находиться в отведенных для них посадочных местах. Причем максимальный объем прокладки с учетом допусков всегда должен быть меньше минимального объема посадочного места. В противном случае прокладка будет работать за пределами упругих деформаций, что приведет ее к разрушению, а тоннельную обделку – к потере герметичности. Если тоннельный участок прямолинейен, то все углы прокладок прямые. Для поворотов, спусков или подъемов железобетонные блоки изготавливаются с соответствующими углами. Адекватно им выполняются углы и в резиновых прокладках. В зависимости от требований к уплотнителю и свойств резины с учетом сложности конструкции профиля уплотнителя его изготовление осуществляется многостадийным методом, основные этапы которого заключаются в следующем:

1) изготовление резиновых профилей определенной конструкции соответственно их назначению и привязки к конкретным типам блоков;

2) подготовка резиновых профилей заданной длины и их торцов;

3) подготовка стыковочной резиновой смеси и стыковка профилей под заданными углами;

4) стабилизация после стыковки.

Профили изготавливаются методом экструзии на червячных прессах с помощью специально созданной экструзионной головки с регулированием давления резиновой смеси. После подготовки резиновых профилей и стабилизации осуществляется их стыковка в специальной многоугольной пресс-форме.

Все оснащение разработано и изготовлено специалистами ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ». Изготовление уплотнителей тоннельной обделки осуществляется на участке экспериментального производства. Наибольшим потребителем резиновых уплотнителей в Украине является ОАО «Киевметрострой», в котором разработана новая технология проходки тоннелей. Первые в мире в сложных инженерно-геологических условиях, включая пльвуны, были использованы резиновые уплотнители при строительстве наклонного хода (эскалаторного тоннеля) станции «Печерская» Киевского метрополитена, которая введена в эксплуатацию в декабре 1997 г. Разработанные резиновые уплотнители были применены также при сооружении наклонного хода и самой станции «Дорогожичи», которая введена в эксплуатацию в марте 2000 г., «Житомирская» и «Академгородок» – в 2004 г., «Сырецкая» – в 2006 г. На этих станциях поддерживается высокий уровень герметичности тоннельной обделки в процессе эксплуатации указанных объектов.

Разработанная технология и материалы внедряются и на других объектах Донецкого и Днепропетровского метрополитенов и стволов шахт в Донецком регионе. Поставку резиновых уплотнителей осуществляет ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ». В настоящее время созданы производственные мощности, которые обеспечивают потребности Украины, а также ведутся исследования по созданию новых материалов с более высокими свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Elastomer Joint Tapes and Profiles [Текст] // г. «Tunnel». – 1981. – № 3. – P. 194-206.
2. Збірні обкладинки компанії «Charson Tunnels» [Текст] // г. «Tunnels und Tunneling». – 1984. – v.10, № 3. – P. 44.
3. Рекламний проспект фірми «Phoenix», Німеччина [Текст]. – 1986.
4. Александров, А. Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела [Текст] / А. Я. Александров, А. Х. Ахметьянов. – М.: Наука, 1973. – 575 с.
5. Фрохт, М. М. Фотоупругость [Текст] : в 2 т. / М. М. Фрохт. – т. 1. – М.-Л.: Техтеориздат, 1948. – 432 с.
6. Экспериментальная механика [Текст] : в 2 кн. / под ред. Кобаяси. – М.: Мир, 1996. – 616 с.

Поступила в редколлегию 26.03.2010.

Принята к печати 02.04.2010.

МОДЕЛЬ «СЛАБЕЙШЕГО ЗВЕНА» И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Визначено клас задач математичного моделювання надійності будівельних конструкцій, в яких може застосовуватися модель «найслабкішої ланки». Методика використання цієї моделі розглядається на прикладі формування показників надійності сталевих резервуарів для нафтопродуктів.

Определен класс задач математического моделирования надежности строительных конструкций, в которых может применяться модель «слабейшего звена». Методика использования этой модели рассматривается на примере формирования показателей надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов.

The class of mathematical modeling tasks of building constructions reliability, wherein the model of the «weakest link» can be used, is determined. The method of using this model is examined on the example of formation of reliability indices of steel reservoirs for petroleum products.

Постановка проблеми

В настоящее время значительная часть строительных конструкций и сооружений в Украине имеют срок службы, существенно превышающий нормативный, и находятся в стадии активного физического износа. В связи с этим, в последние годы в значительной мере повысился фактический риск их отказов и, тем самым, возросла роль фактора своевременного и эффективного восстановления работоспособности в процессе эксплуатации [1, 2, 3]. Все это требует уточнения действующих нормативных документов по эксплуатации указанных объектов в части сроков ревизий технического состояния, что связано, прежде всего, с адекватным математическим описанием показателей их надежности и с разработкой новых моделей и методов управления надежностью в условиях физического износа. Соответствующие вопросы тем более актуальны применительно к объектам, относящимся к сооружениям высокой степени ответственности, для которых обеспечение надежности имеет решающее значение [4, 5].

С точки зрения надежности большинство строительных конструкций можно рассматривать после декомпозиции как систему с последовательным соединением элементов. Соответствующая структурная схема показана на рис. 1.

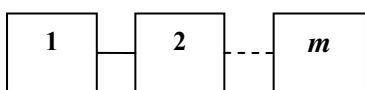


Рис. 1. Структура системы с последовательным соединением элементов

Для нормального функционирования такой системы все её элементы должны быть работоспособными. Отказ же хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Под отказом понимается переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное. В разнообразных прикладных задачах, связанных с моделированием надежности строительных конструкций, возникает проблема формирования оператора S , связывающего показатели надежности конструкции с вероятностными характеристиками её конструктивных элементов. В случае независимости отказов элементов (т.е., отсутствия причинно-следственных связей между отказами) эта проблема легко решается на основе известного правила умножения вероятностей [5]. Если же отказы отдельных элементов рассматриваемой системы статистически зависимы, то построить оператор S , адекватно отображающий зависимость показателей надежности конструкции от вероятностных характеристик её конструктивных элементов, значительно сложнее. Известный в теории вероятностей подход к построению оператора S в случае зависимых отказов основан на синтезе функций (интегральной или плотности) совместного распределения вероятностей наработок до отказа отдельных конструктивных элементов. Однако для решения практических задач такой подход крайне неудобен и при $m > 2$ фактически не используется. В данной статье применительно к моделированию надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов обсуждаются вопросы формирования оператора S на основе модели «слабейшего звена» [5, 6]. Если $P_s(t)$ – вероятность безотказной работы

всей системы, а $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента (см. рис. 1), то эту модель можно записать в виде следующего соотношения:

$$P_s(t) = \min P_i(t), \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Заметим, что модель (1) выражает в математической форме гипотезу, согласно которой, если в процессе эксплуатации причиной отказов всех элементов системы является воздействие совокупности одних и тех же факторов, то первым выходит из строя тот элемент, вероятность безотказной работы которого наименьшая на момент отказа. Прообразом этой модели является механическая цепь, состоящая из некоторого числа звеньев, когда она разрушается, если приложена нагрузка, превышающая прочность какого-либо одного звена.

Основной материал

Рассматривается стальной резервуар, который в период эксплуатации выполняет свои функции по приему, хранению и отпуску нефтепродуктов в условиях физического износа. Структурная схема такого сооружения приведена на рис. 2.

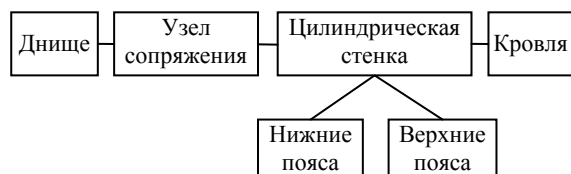


Рис. 2. Структурная схема стального резервуара для нефтепродуктов

В контексте надежности нефтяной резервуар можно рассматривать как систему, состоящую из 4-х основных конструктивных элементов (днища, узла сопряжения стенки с днищем, цилиндрической стенки и кровли), которые последовательно соединены между собой. В свою очередь, цилиндрическая стенка состоит из последовательно соединенных поясов, которые подразделяются на пояса нижние и верхние. Цилиндрическая стенка и узел сопряжения являются несущими конструкциями, днище и кровля выполняют ограждающую функцию. В соответствии с нормативными документами [7, 8], резервуар на протяжении всего времени эксплуатации должен удовлетворять требованиям прочности, устойчивости и герметичности. Заметим, что для корпуса нефтяных резервуаров не характерны эксплуатационные повреждения, приводящие к нарушению герме-

тичности. Если же такие повреждения и возникают, то в виде сквозных пор в сварных швах, что не приводит к сколько-нибудь серьезным последствиям и практически не влияет на техническое состояние резервуара, поскольку этот вид повреждений обычно своевременно обнаруживается и сравнительно легко устраняется на основе осмотровых ремонтов без вывода резервуара из эксплуатации. Поэтому можно считать, что резервуар в процессе эксплуатации находится в работоспособном состоянии, если его цилиндрическая стенка отвечает условиям прочности и устойчивости, узел сопряжения стенки с днищем – условию прочности, а днище и кровля – условию герметичности.

Статистический анализ многочисленных натурных обследований нефтяных резервуаров [3] показывает, что наработки до отказа всех их стальных конструкций являются случайными величинами, имеющими положительную корреляционную зависимость. Это объясняется следующими обстоятельствами. Основными факторами, негативно влияющими на техническое состояние нефтяных резервуаров и понижающими их эксплуатационную надежность, являются: а) коррозионный износ; б) несовершенства технологий изготовления и монтажа; в) подрастание трещиновидных дефектов под воздействием циклического заполнения резервуара нефтепродуктом; г) неравномерные осадки основания по нижнему контуру и под днищем. Если наступление отказа нефтяного резервуара рассматривать как следствие накопления в нем недопустимой совокупности дефектов и повреждений, то отказы конструктивных элементов этого сооружения не являются статистически независимыми событиями, поскольку все эти элементы в той или иной мере подвержены коррозии. Поэтому наработки до отказа резервуарных конструкций являются коррелированными (а значит, и зависимыми) случайными величинами. Покажем, что вероятность безотказной работы резервуара можно найти на основе модели «слабейшего звена».

Рассмотрим цилиндрическую стенку резервуара. Пусть $P_c^n(t)$ – вероятность ненаступления предельного состояния (ПС) цилиндрической стенки по условию прочности в течение времени t . Эта вероятность определяется вероятностью события, состоящего в том, что на протяжении времени t все пояса стенки отвечают условию прочности

$$P_c^n(t) = P(\tau_c^n > t) = P(\tau_{c1}^n > t \cap \tau_{c2}^n > t \dots \cap \tau_{cn}^n > t), \quad (2)$$

где τ_c^n – наработка цилиндрической стенки до наступления ПС по условию прочности;

τ_{ci}^n – наработка i -го пояса до наступления ПС по условию прочности, рассматриваемая далее как нормально распределенная случайная величина с математическим ожиданием μ_{ci} и среднеквадратическим отклонением σ_{ci} ;

n – количество поясов цилиндрической стенки.

Поскольку τ_{ci}^n – случайная величина, имеющая нормальный закон распределения вероятностей, то вероятность ненаступления ПС i -го пояса по условию прочности легко определяется через известную функцию Лапласа

$$P_{ci}^n(t) = \Phi(w_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_i}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $w_i = (t - \mu_{ci}) / \sigma_{ci}$; z_i – нормированная нормально распределенная случайная величина с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, равным 1:

$$z_i = \frac{\tau_{ci}^n - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}}. \quad (4)$$

Важно отметить, что функция Лапласа является монотонно убывающей. Её значения тем больше, чем меньше величина нижнего предела интегрирования. Причем $\Phi(w_i) \geq 0,5$ при $w_i \leq 0$ и $\Phi(w_i) < 0,5$ при $w_i > 0$.

Обозначим

$$w_c^* = \frac{t - \mu_{ci^*}}{\sigma_{ci^*}} = \max \frac{t - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где i^* – номер пояса, имеющего наибольшую вероятность отказа по условию прочности.

Если наработки до отказа всех поясов стенки по условию прочности $\tau_{c1}^n, \tau_{c2}^n \dots \tau_{cn}^n$ рассматривать как коррелированные случайные величины и обозначить через $\tau_{ci^*}^n$ наработку до отказа элемента, имеющего наибольшую вероятность отказа, то с учетом (4) можно записать

$$z_i \approx r_i z_{i^*}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где r_i – коэффициент корреляции τ_{ci}^n на $\tau_{ci^*}^n$.

С учетом (4)–(6) следующие три события являются эквивалентными:

$$(\tau_{ci}^n > t) \sim \left(\frac{\tau_{ci}^n - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}} > \frac{t - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}} \right) \sim (r_i z_{i^*} > w_i). \quad (7)$$

Принимая во внимание (2) и (7), можно записать следующее соотношение эквивалентности:

$$(\tau_c^n > t) \sim (z_{i^*} > \frac{w_1}{r_1}) \cap (z_{i^*} > \frac{w_2}{r_2}) \dots \cap (z_{i^*} > \frac{w_n}{r_n}). \quad (8)$$

Нефтяные резервуары относятся (в зависимости от объема) к строительным конструкциям 1-го и 2-го класса ответственности, а их эксплуатация производится в рамках действующей системы технического обслуживания и ремонтов [8, 9]. Если на протяжении всего срока службы риск отказа по условию прочности каждого пояса цилиндрической стенки не превосходит 0,5 (при правильной организации технического обслуживания этот риск в действительности значительно меньше 0,5), то все w_i в (8) можно считать неположительными величинами, из чего следует (с учетом $0 < r_i \leq 1$) эквивалентность следующих двух событий:

$$(\tau_c^n > t) \sim (z_{i^*} > w_c^*). \quad (9)$$

Это значит, что вероятность ненаступления ПС цилиндрической стенки по условию прочности на протяжении времени t может быть найдена на основе модели «слабейшего звена»

$$P_c^n(t) = \Phi(w_c^*) = \min P_{ci}^n(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Пусть τ_c^y – наработка цилиндрической стенки до наступления ПС по условию устойчивости. Если рассматривать τ_c^y как нормально распределенную случайную величину с математическим ожиданием μ_c^y и среднеквадратическим отклонением σ_c^y , то вероятность ненаступления ПС цилиндрической стенки по условию устойчивости определяется по формуле

$$P_c^y(t) = \Phi\left(\frac{t - \mu_c^y}{\sigma_c^y}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{t - \mu_c^y}{\sigma_c^y}}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (11)$$

Поскольку безотказность цилиндрической стенки в течение времени t состоит в ненаступлении ПС по условиям прочности и устойчивости, то учитывая формулы (10)–(11) и полагая, что $P_c^y(t) \geq 0,5$ и $P_c^n(t) \geq 0,5$, вероятность

безотказной работы этого конструктивного элемента можно найти по формуле:

$$P_c(t) = \Phi(w_c^{**}) = \min(P_c^n(t), P_c^y(t)), \quad (12)$$

$$\text{где } w_c^{**} = \max\left(w_c^*, \frac{t - \mu_c^y}{\sigma_c^y}\right).$$

Рассуждая аналогично и принимая во внимание формулы (2)–(12), нетрудно показать, что вероятность безотказной работы всего резервуара определяется на основе модели «слабейшего звена»:

$$P_s(t) = \Phi(w_s^*) = \min(P_c(t), P_{yc}(t), P_d(t), P_k(t)), \quad (13)$$

где $P_{yc}(t)$ – вероятность безотказной работы (ненаступления ПС по условию прочности) узла сопряжения

$$P_{yc}(t) = \Phi(w_{yc}^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_{yc}^*}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz; \quad (14)$$

$P_d(t), P_k(t)$ – вероятности безотказной работы, соответственно, днища и кровли

$$P_d(t) = \Phi(w_d^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_d^*}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz; \quad (15)$$

$$P_k(t) = \Phi(w_k^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_k^*}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz; \quad (16)$$

$$w_s^* = \max(w_c^{**}, w_{yc}^*, w_d^*, w_k^*); \quad w_{yc}^* = \frac{t - \mu_{yc}}{\sigma_{yc}};$$

$$w_d^* = \frac{t - \mu_d}{\sigma_d}; \quad w_k^* = \frac{t - \mu_k}{\sigma_k};$$

μ_{yc}, σ_{yc} – соответственно, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение наработки узла сопряжения до наступления ПС по условию прочности;

$\mu_d, \sigma_d, \mu_k, \sigma_k$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение наработки до отказа, соответственно, днища и кровли.

На основе моделей (10)–(16) легко определяются и другие важнейшие показатели надежности нефтяных резервуаров, такие как, например, среднее время безотказной работы на протяжении заданного срока службы, вероятность отказа в данном промежутке времени, интенсивность отказов в заданный момент времени и т.д. Приведем расчетные модели перечислен-

ных показателей надежности для произвольной резервуарной конструкции с вероятностью безотказной работы $P(t)$ и наработкой до отказа τ , распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием μ и среднеквадратическим отклонением σ .

Среднее время безотказной работы конструкции на протяжении срока службы T :

$$T_{cp} = \int_0^T P(t) dt; \quad (17)$$

Вероятность отказа в промежутке времени $[t_1, t_2]$:

$$P(t_1 \leq \tau \leq t_2) = P(t_1) - P(t_2). \quad (18)$$

Интенсивность отказов в момент времени t :

$$h(t) = \frac{f(w)}{\sigma P(t)}, \quad (19)$$

где $f(w)$ – плотность нормированного нормального распределения вероятностей; $w = (t - \mu) / \sigma$.

Выводы

Полученные в статье результаты показывают, что математическое моделирование надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов может производиться на основе модели «слабейшего звена». Кроме того, данная модель может использоваться при анализе надежности многих других строительных конструкций и сооружений в случае их периодического восстановления в процессе эксплуатации и положительной корреляционной зависимости наработки до отказа отдельных конструктивных элементов. Эта модель правильно отражает зависимость между показателями надежности конструкции и вероятностными характеристиками её конструктивных элементов, если вероятность отказа последних в рассматриваемом промежутке времени не превышает 0,5, что практически всегда имеет место в случае технического обслуживания конструкции в период эксплуатации. Кроме того, если коэффициенты корреляции наработок до отказа конструктивных элементов близки к 1, то модель «слабейшего звена» может быть полезной для приближенной оценки вероятности безотказной работы всей конструкции независимо от того, производится или нет её техническое обслуживание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – К: УкрНИИпроектстальконструкция, 1999. – 212 с.
2. Егоров, Е. А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации [Текст] / Е. А. Егоров. – Д.: Навчальна книга, 2002. – 95 с.
3. Егоров, Е. А. Систематизация фактора восстановления в моделях эксплуатационного состояния нефтяных резервуаров [Текст] / Е. А. Егоров, С. С. Семенец // Вісник ПДАБА. – 2006. – № 2. – С. 10-18.
4. Болотин, В. В. Ресурс машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – М: Машиностроение, 1990. – 448 с.
5. Капур, К. Надежность и проектирование систем [Текст] : [пер. с англ.] / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
6. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании [Текст] : [пер. с англ.] / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
7. СНиП 11-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
8. Резервуари вертикальні сталеві для збереження нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа [Текст] // Відомчі будівельні норми України ВБН 2.2-58.2-94. – К., 1994. – 98 с.
9. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту. Доповнення та зміни [Текст]. –К.: Укрнафтопродукт, 1997. – 297 с.

Поступила в редколлегию 09.02.2010.
Принята к печати 11.02.2010.

М. И. НИКИТЕНКО, В. А. СЕРНОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь); И. Л. БОЙКО (ЧПП «Моноракурс проект», БНТУ, Беларусь); Н. В. ЧЕРНОШЕЙ (ОАО «Буровая компания «Дельта», Беларусь)

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ

В статті викладено досвід проектування та влаштування підземних та транспортних споруд, огорожень глибоких котлованів у стислих умовах забудови міст на прикладах різних об'єктів у Республіці Білорусь.

В статье отражен опыт проектирования и устройства подземных и транспортных сооружений, ограждений глубоких котлованов в стесненных условиях городской застройки на примерах различных объектов в Республике Беларусь.

The experience of design and erecting of underground and transport structures, fencing deep excavations in cramped urban conditions on the examples of various projects in the Republic of Belarus is presented in the paper.

Проблемы проектирования и строительства подземных и транспортных сооружений приобретают особую актуальность в условиях все возрастающей интенсивности застройки городских территорий в Беларуси. Вызвано это значительным ростом количества наземного транспорта в городах, строительством новых веток метро и уплотнением существующей застройки. Такое положение потребовало применения новых конструктивных решений, современного оборудования, совершенствования методик расчета с использованием новых программных комплексов для расчетов. Трудности при проектировании и строительстве создают и сложные инженерно-геологические условия.

Проблема взаимного влияния транспортных сооружений с учетом последовательности их возведения возникла при прокладке 3-й линии метрополитена и связанной с этим реконструкцией мостового перехода через пр. Дзержинского в г. Минске. Вначале предполагалось первоочередное возведение мостового перехода, а затем проходка тоннелей метро под ним. Основанием под опоры перехода служат буронабивные сваи с отметкой острия ниже тоннелей метрополитена. На стадии проработки проектного решения потребовалось оценить величины отрицательного трения по боковой поверхности свай за счет образующейся при проходке тоннелей мульды проседания грунтового массива со снижением их несущей способности. Такая оценка выполнялась с использованием программного комплекса PLAXIS (рис. 1, 2). Для определения оптимальной последовательности возведения сооружений оце-

нивалось также влияние свайных фундаментов мостового перехода на тоннели метрополитена для случая, когда в первую очередь выполняется проходка тоннелей.

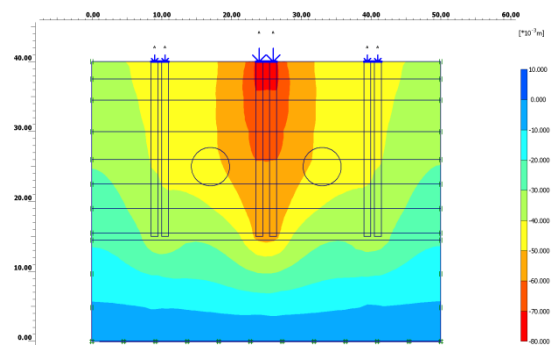


Рис. 1. Вертикальные перемещения грунта в основании фундаментов (до устройства тоннелей)

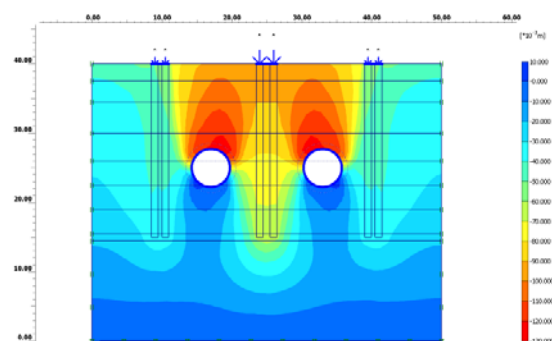


Рис. 2. Вертикальные перемещения грунта в основании фундаментов с учетом мульды проседания в процессе устройства тоннелей

Выполненные расчеты позволили установить величину взаимного влияния сооружений, оптимальную длину свай исходя из их несущей способности, а также оценить влияние свайных

фундаментов под опоры мостового перехода на обделку тоннелей метрополитена.

Реконструкция цирка в г. Минске на берегу р. Свислочь потребовала выполнить заглубленный объем под магазин сменных арен при расположении уровня подземной воды на отметке подошв существующих фундаментов, что на 3,44 м выше дна проектируемого котлована. Основание фундаментов сложено песчаными грунтами с большими коэффициентами фильтрации. Устройство водопонижения здесь могло вызвать значительные деформации фундаментов и существующих конструкций здания цирка. Положение усугублялось невозможностью использования крупногабаритной буровой техники для устройства свай в стесненных габаритах внутри здания. При научном сопровождении сотрудников кафедры «Геотехника и экология в строительстве» БНТУ разработан проект создания противофильтрационной ванны со стенами и днищем из пересекающихся свай и цилиндрических элементов соответственно, выполняемых по струйной технологии посредством высоконапорной инъекции цементного раствора (рис. 3). Сваи ограждения ванны и примыкающего котлована предусмотрены \varnothing 800 мм с длинами соответственно 9,25 и 4,0 м (рис. 4, 5). В стесненных габаритах для их армирования применены высокопрочные полые стержни с винтовой накаткой типа «Титан», соединяемые по длине секциями при помощи навинчиваемых муфт. Цилиндрические элементы водонепроницаемого днища для исключения попадания воды в котлован предусмотрено диаметрами 1000 мм с их взаимным пересечением.



Рис. 3. Устройство буроинъекционных свай для противофильтрационной ванны

Высоконапорная цементация (струйная технология) нашла применение и при строительстве канализационного коллектора «Центр» в

г. Минске. Закрепление грунтов струйной цементацией у наружной стенки колодца для входа и выхода проходческого щита выполнялось для исключения вывалов грунта.

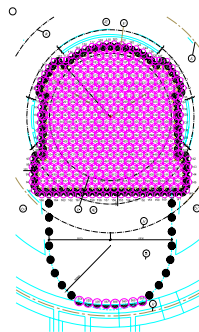


Рис. 4. Схема расположения буроинъекционных свай в составе стен и днища ванны, а также ограждения котлована для магазина сменных арен

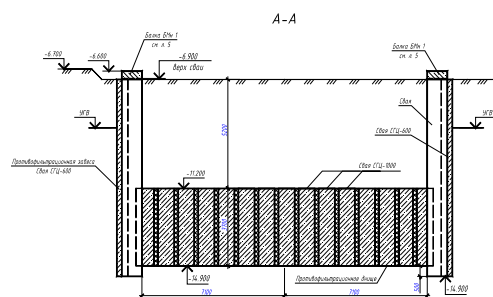


Рис. 5. Продольный разрез ванны

При выполнении глубоких котлованов для станций и перегонных тоннелей Минского метрополитена и других строительных объектов вблизи от существующих зданий и сооружений применяют различные конструктивные решения ограждений исходя из специфики инженерно-геологических и гидрогеологических условий [1]. Чаще всего обычно применяют свайно-балочный вариант (так называемое берлинское крепление). Примером может служить ограждение котлована для многоэтажного административного здания на ул. Шорной в г. Минске (рис. 6), разработанное ОДО «Моно-ракурс» [2]. Его устойчивость вблизи от окружающих строений удалось обеспечить без анкерования за счет наклонной насыпи внутри и допустимости смещений ограждения в сторону котлована.

Недостатки свайно-балочных ограждений связаны с большим расходом дефицитных стальных профилей для опор и древесины для заборки между ними, а также с вредными динамическими воздействиями на окружающие строения при забивке двутавровых балок. Снизить такие воздействия позволяет погружение

двутавров в лидерные скважины до уровня дна котлована при дальнейшей забивке или задавливании по длине заделки ниже этого уровня.



Рис. 6. Безанкерное свайно-балочное крепление глубокого котлована

Ограждения котлованов в виде траншейной или свайной стены, устраиваемые методом «стена в грунте», лишены указанных недостатков. Они могут выполнять функции ограждений котлованов, одновременно и несущих конструкций для подземных сооружений, а также и противофильтрационных при заделке в водупор. При проходке выработок для них под защитой глинистой суспензии исключаются динамические воздействия, а сами работы можно выполнять в непосредственной близости от существующих строений. К сожалению, наиболее эффективный вариант устройства траншейных стен у нас ныне утрачен в связи с несоблюдением технологических регламентов. Вместо него стали применять более трудоемкий и дорогой вариант из буронабивных свай.

В котлованах глубже 7 м устойчивость ограждающих стен при восприятии бокового распора грунта с весом пригрузки на поверхности обеспечивают посредством одного или нескольких ярусов расстрелов или анкеров, что уменьшает требуемую глубину защемления стен ниже дна котлована.

Буроинъекционная технология выполнения анкеров, свай и упрочнения грунтов в основании зданий и сооружений особо важна для крепления ограждений котлованов и обеспечения сохранности находящихся возле них строений [1, 2].

Освоение данной технологии было начато в 1980 году при анкерованиях траншейных стен по ул. Харьковской в г. Минске. За истекший с того времени период богатейший опыт ограждений глубоких котлованов накоплен на объек-

тах Минского метрополитена и ряде других сооружений. Наибольший объем анкерования применен при возведении огромного котлована глубиной до 18 м (рис. 7) для подземного общественно-торгового центра с парковкой в г. Минске [2, 3]. Он разрабатывался вблизи от зданий и сооружений, имеющих историческую ценность и социальную значимость (педагогический университет, красный костел, гостиница «Минск», дом правительства, управление капитального строительства, комитет градостроительства и архитектуры).

Грунтовые условия здесь представлены песками с разной крупностью, плотностью и мощностью (3...18 м), подстилаемыми моренными супесями твердой консистенции с гравийно-галечниковыми включениями до 30 %. Грунтовые воды по глубине котлована отсутствуют.



Рис. 7. Общий вид котлована на пл. Независимости в г. Минске с заанкеренными ограждающими стенами при возведении в нем конструкций общественно-торгового центра с парковкой

Проект временного крепления разработан ОАО «Минскметропроект» при научном сопровождении работ сотрудниками кафедры «Геотехника и экология в строительстве» БНТУ. Котлован ограждали металлическими двутаврами балками с забиркой из деревянных брусьев (рис. 8) и стенами из соприкасающихся буронабивных свай, а крепили напрягаемыми буроинъекционными анкерами с тягами на отрезках корней в геотестильных дренирующих рукавах по а.с. № 1392203 [4] (рис. 9).

Вертикальные балки из двутавров В61 погружали с шагом 1,8 м вибратором в предварительно пробуренные лидерные скважины, а далее добивали на проектные глубины до 23 м. Возле зданий УКСа, пединститута и подземных переходов ограждения выполняли из буронабивных свай.



Рис. 8. Заанкеренные свайно-балочные стены ограждения котлована

а)



б)



Рис. 9. Сборка анкерных тяг по а.с. № 1392203:
а) – на дне котлована; б) – погружение в скважину

За счет качественной опрессовки окружающего грунта при управляемом процессе закачки цементного раствора повышали несущую способность анкеров, сокращали расход цемента и сроки набора цементным камнем даже в глинистых грунтах. Для ускорения твердения инъекционного раствора применялась добавка поли-

металлического водного концентрата по СТБ 1113-98. Это позволило напрягать анкеры через 7 суток после инъекции в моренных супесях и 2,5 суток в песках. Без добавки эти сроки составляли соответственно 28 и 14 суток.

Контрольные и приемочные испытания анкеров выполняли группами по мере их изготовления и набора прочности цементным камнем корней.

Расчеты с использованием метода конечных элементов в упругопластической постановке и оптимизация крепления ограждающих стен дали возможность уменьшить количество ярусов анкеров и значительно ускорить работы. Введение в расчеты характеристик грунта, полученных испытаниями по схеме консолидированно-дренированного сдвига, позволило на 22,4 % уменьшить общее количество анкеров по сравнению с первоначальным вариантом (с 2137 до 1659 шт.).

Буроинъекционные анкеры применены в конструкции одного из фундаментов 120-метрового покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске, расположенного в котловине оврага «Гапеев ручей» (квартал улиц Ленина, Гоголя и пр. Фрунзе). Южная часть участка со стороны улицы Гоголя в зоне расположения фундамента ФМ1 имеет крутой склон высотой до 5,0 м с наклоном 30...45°.

В отечественной и мировой практике при устройстве фундаментов таких сооружений традиционно используют глубокие опоры. Вариант фундаментов на набивных сваях с инъекционной опрессовкой грунта под их острием и восприятием части горизонтального распора при помощи наклонных буроинъекционных напряженных анкеров по предложению кафедры «Геотехника и экология в строительстве» БНТУ был разработан ОДО «Моноракурс». Под каждым фундаментом устроены вертикальные Ø 630 мм и наклонные буронабивные сваи Ø 426 мм с длинами 11..12 м.

Опрессовку грунта под фундаментом выполнили инъекцией цементного раствора через устроенные в плите трубки.

При устройстве фундамента ФМ1 в качестве опалубки для него и поддержания склона выполнена стена из буронабивных свай Ø 630 мм длиной до 10 м. В целях ускорения строительства для ФМ1 применено 136 вертикальных забивных свай сечением 35x35 см с длинами по 8,0 м, а также 26 буроинъекционных анкеров. В тело ФМ1 заложены трубы (рис. 10), через которые затем бурили скважины для анкеров.



Рис. 10. Расположение труб в фундаменте ФМ1 для проходки скважин и устройства анкеров

Расчеты несущей способности, конструкции и рабочие чертежи постоянных предварительно напряженных буроинъекционных анкеров для восприятия горизонтальных распоров и уменьшения сдвиговых перемещений фундамента были выполнены ОДО «Моноракурс» под научным руководством кафедры «Геотехника и экология в строительстве» БНТУ.

Ею разработана технология сборки (рис. 11) и устройства анкеров в обводненных грунтах, проведены их испытания и выдано заключение о возможности восприятия проектных выдерживающих усилий.



Рис. 11. Сборка анкерных тяг для постоянных анкеров на стенде в условиях объекта

Поскольку некоторые из анкеров при испытаниях имели заниженную несущую способность, пришлось производить дополнительную закачку раствора между корнями и свободной частью по длине тяг по предложенной кафедрой технологии, что обеспечило возможность восприятия проектных усилий и избежать необходимости устройства дополнительных анкеров.

Примером ограждения из заанкеренных в одном уровне свайных стен служит устройство

котлована для здания ОАО «Приорбанк» во врезке на склоне между существующими зданиями по пр. Победителей в г. Минске (рис. 12). Здесь при устройстве свай и анкеров системы «Титан» применена струйная технология. При этом анкера имели трубчатые тяги из высокопрочной стали с наружным винтовым профилем для натяжных гаек. Через эти полые тяги под большим давлением закачивали цементный раствор для создания уширенных корней. Все испытанные анкера имели требуемую несущую способность по грунту.

а)



б)



Рис. 12. Ограждение котлована для здания ОАО «Приорбанк» по пр. Победителей в г. Минске:

- а) – анкерование верхнего монолитного железобетонного обвязочного пояса перед раскопкой котлована;
- б) – общий вид котлована в процессе возведения здания

Серьезные проблемы при высотном строительстве создают линзы и слои слабых, особенно водонасыщенных, грунтов в основании зданий. Ярким примером служат проблемы, возникшие при возведении на пятне снесенного кафе «Реченька» между существующим зданием магазина «Ромашка» и трассой второй линии метрополитена высотного административно-торгового центра с заглубленным свайно-

плитным фундаментом. Первоначальным проектом было предусмотрено устраивать плиту на среднем песке средней прочности в уровне дна котлована глубиной от 5,27 м до 5,8 м ниже уровня планировочной отметки. При этом ограждение котлована запроектировано в виде объединенных монолитным железобетонным поясом соприкасающихся буронабивных свай диаметром 350 мм с их заглублением на 5,7 м через толщу слабых грунтов в несущий слой из прочного водонасыщенного песка. Устойчивость ограждения нужно было обеспечить за счет одного яруса преднапряженных буронабивных анкеров с длинами по 11,5 и 12,5 м при длинах корней по 4,5 м в геотекстильных рукавах по а.с. № 1392203 [4] (рис. 13). Однако в слое торфа и обводненного грунта они оказались неработоспособными.



Рис. 13. Тяга анкера в геотекстильном рукаве по а.с. № 1392203

Грунтоцементные сваи в составе ограждения на данном объекте выполняли по струйной технологии (рис. 14) при перемешивании размываемого монитором грунта с закачиваемым под напором до 400 атм. цементного раствора. Сваи армировали по центру трубчатыми тягами типа «Титан», что не обеспечивало их работоспособности при изгибе от распора грунта, тем более что на верхних отрезках при перемешивании раствора с торфом прочность стволов была весьма низкой. Хотя стволы буронабивных свай армировали пространственными каркасами, но качество их бетонирования оказалось низким. В этой связи при отсутствии предварительного напряжения в анкерах произошло смещение ограждения со стороны магазина «Ромашка» в направлении котлована с прогибом обвязочного пояса, что вызвало деформации в стенах магазина. Положение ус-

губили динамические воздействия при устройстве в котловане вибробивных свай.



Рис. 14. Общий вид струйной установки

На втором объекте проект ограждения котлована стеной из буронабивных свай $\varnothing 1000$ мм разработан институтом «Белпромпроект». В нем предусмотрено устройство «пионерного» котлована глубиной 1,3 м от поверхности земли, с отметки низа которого выполнялись буронабивные сваи.

В ряде случаев при высоких темпах строительства приходится отказываться от анкерных креплений за счет выполнения ограждений котлованов стенами из свай большого диаметра. Для уменьшения глубины их защемления ниже дна котлована надо прибегать к цементационному упрочнению грунта перед сваями под дном с помощью закачки цементного раствора или его перемешивания с грунтом посредством высоконапорной струйной технологии.

Характерными примерами служат ограждения из буронабивных свай $\varnothing 1000$ мм для подземной станции очистки воды на Белорусском металлургическом заводе в г. Жлобине (рис. 15), а также для технологической линии по производству листового полированного стекла мощностью 780 т стекломассы в сутки с цехом приготовления шихты на ОАО «Гомельстекло» в р.п. Костюковка Гомельской обл.



Рис. 15. Ограждение котлована из буронабивных свай диаметром 1,0 м на БАЗ в г. Жлобине

В активной зоне под подошвой фундамента на небольшой глубине ($\approx 0,5 \dots 1,5$ м) залегает песок пылеватый с низкими прочностными и деформационными характеристиками ($\varphi = 14^\circ$, $C = 4$ кПа, $E = 4$ МПа).

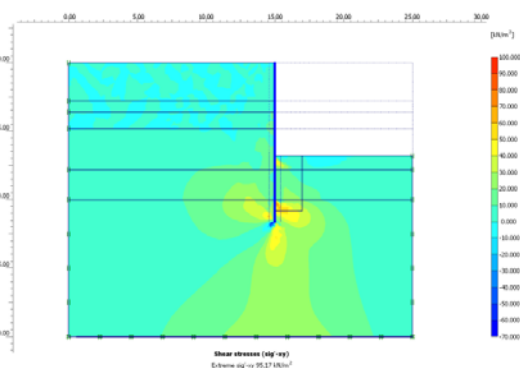
Этот слой слабого грунта находится и в активной зоне подпорной стены, воспринимая горизонтальное давление от удерживаемого откоса. Как показали расчеты, наличие слабого слоя в основании не обеспечивает надежной эксплуатации самого сооружения и удерживающей свайной стены при принятой длине свай. Для улучшения свойств грунта предусмотрено устройство армированного основания под подошвой фундаментной плиты, а вдоль свайной подпорной стены 2-х рядов упрочненных грунтоцементных столбов $\varnothing 1000$ мм с длинами по 4 м, выполненных методом струйной цементации. Такое конструктивное решение обеспечило устойчивость свободстоящей стены и позволило сократить длину свай при заглублении ниже дна котлована на 4,5 м. При анкерования диаметр свай можно уменьшить, но пришлось бы увеличить их количество, длины, время на устройство и напряжение анкеров перед раскопкой котлована, поскольку корни анкеров длительно набирают проектную прочность в моренных глинистых грунтах.

Выполненное по программе «СКАД» [2] численное моделирование по оценке устойчивости стен без анкеров при отсутствии (вариант 1) или наличии (вариант 2) упрочненных столбов ниже дна котлована (рис. 16 – 20) подтвердило эффективность проектного решения ограждения в первом варианте. При этом существенно уменьшены смещения ограждения в сторону котлована, которые нарастают нелинейно в зависимости от нагрузок (см. рис. 20).

Опыт проектирования и строительства ограждений котлованов позволяет сделать следующие выводы:

- траншейные и свайные стены весьма эффективны в качестве ограждений глубоких котлованов;
- анкерные крепления ограждающих глубокие котлованы стен позволяют уменьшать их толщины и заделку ниже дна, но увеличивают сроки выполнения работ;

а)



б)

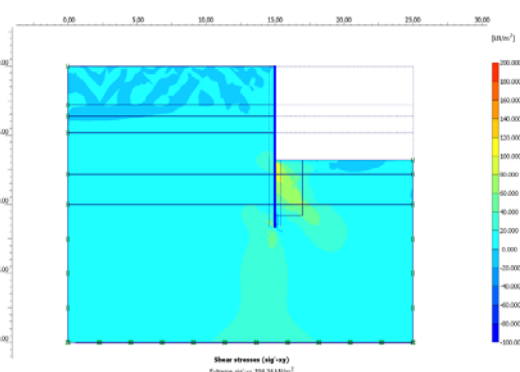


Рис. 16. Эпюры сдвиговых напряжений в основании подпорной свайной стены:
а) – вариант 1, б) – вариант 2

- в ряде случаев ускорить возведение подпорных стен позволяет использование наклонных подкосов, увеличение диаметров свай и цементационное упрочнение грунтов, особенно слабых, ниже заделки под дном котлована.

В геотехнической практике Беларуси широкое применение нашла буроинъекционная технология [1], позволяющая упрочнять грунты в основании и успешно решать ответственные задачи при строительстве и реконструкциях многих объектов.

Впервые проходка скважин размывом грунта под напором воды применена в 1982 г. при устройстве буроинъекционных свай и упрочнении рыхлых линз песка в основании фундаментов на ряде объектов.

Более совершенные приемы струйной технологии стали возможны благодаря закупке специального импортного оборудования.

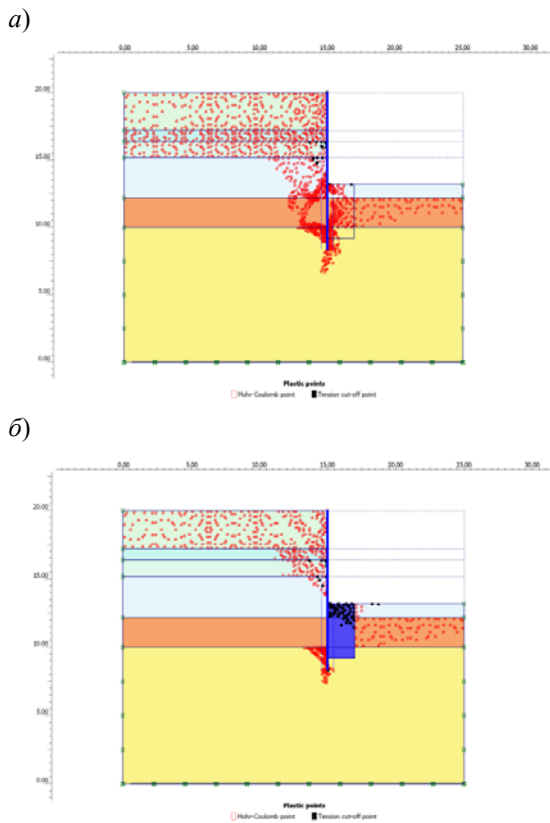


Рис. 17. Зоны развития пластических деформаций в основании подпорной свайной стены:
а) – вариант 1, б) – вариант 2

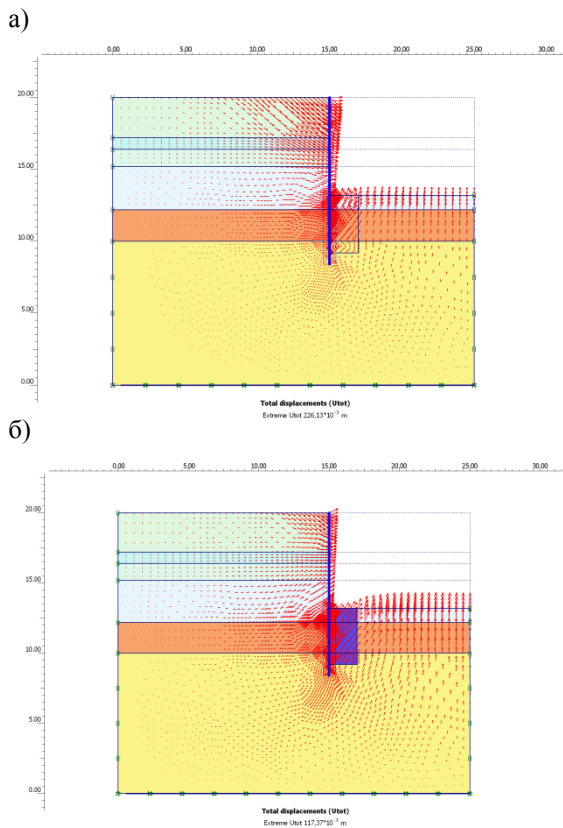


Рис. 18. Эпюры общих деформаций в основании подпорной свайной стены:
а – вариант 1, б – вариант 2

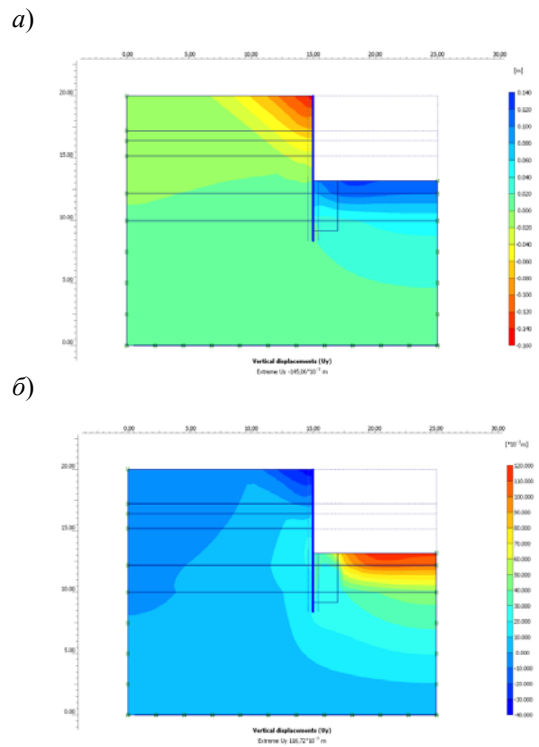


Рис. 19. Эпюры вертикальных деформаций в основании подпорной свайной стены:
а) – вариант 1; б) – вариант 2

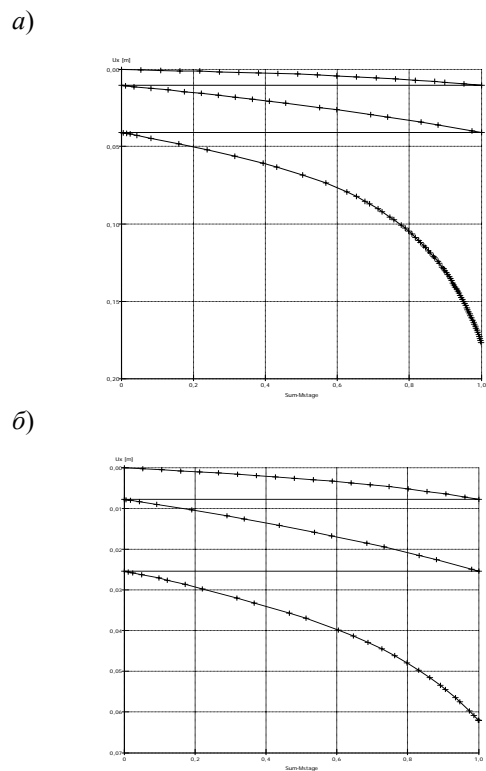


Рис. 20. Графики зависимости горизонтальных перемещений верхней точки подпорной стены от нагрузки для трех этапов отрывки котлована (нагрузки на каждой стадии даны в долях от максимальных):
а) – вариант 1; б) – вариант 2

Освоение этой технологии начато с выполнения свай диаметром до 80 см на глубину до 25 м для концевой опоры на склоне горнолыжной трассы в Силичах [3], а затем ее стали применять при решении других геотехнических задач на иных объектах.

При геотехнических реконструкциях все чаще применяется армирование грунта горизонтальными, вертикальными и наклонными армирующими элементами в виде свай. Впервые нагельное армирование грунта использовано при его раскопке ниже фундаментов здания возле котлована станции метро «Купаловская» (рис. 21).

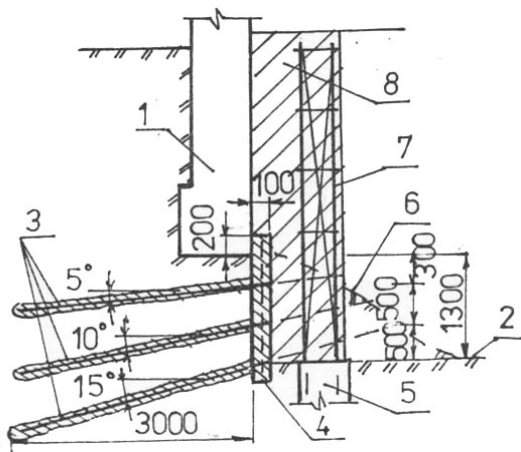


Рис. 21. Нагельные крепления под фундаментами дома возле котлована станции метро «Купаловская»

Буроинъекционные сваи применяют для предотвращения неравномерных осадок фундаментов и чрезмерных деформаций существующих сооружений от выполнения вблизи них горных работ. Отсечные свайные стены ограничивают зоны обрушения грунта у подземных выработок или котлованов возле строений (рис. 22).

Эффект таких конструкций проявляется в армировании, создании анизотропии свойств грунта и препятствий на пути волновых воздействий шума и вибрации в грунте. Они рассекают и гасят волны, особенно если в скважины добавлять отходы резины, гранулированный пенополистирол или другие вязкоупругие материалы.

Буроинъекционная технология позволяет эффективнее в сравнении с традиционными способами усиливать основания и фундаменты при геотехнических реконструкциях, обеспечивая экономичность и социальный эффект, возможность работы в стесненных условиях объектов без динамических воздействий на них, с

малым удельным расходом материалов и трудозатрат при высоких темпах строительства.

При выполнении буронабивных свай традиционными технологиями возникает образование рыхлого осадка (шлама) на забое скважин при их бурении шнеком, а также разупрочнение окружающего сваю водонасыщенного грунта под напором воды за счет разницы ее уровней снаружи и внутри скважины даже при ее проходке под защитой обсадной трубы.

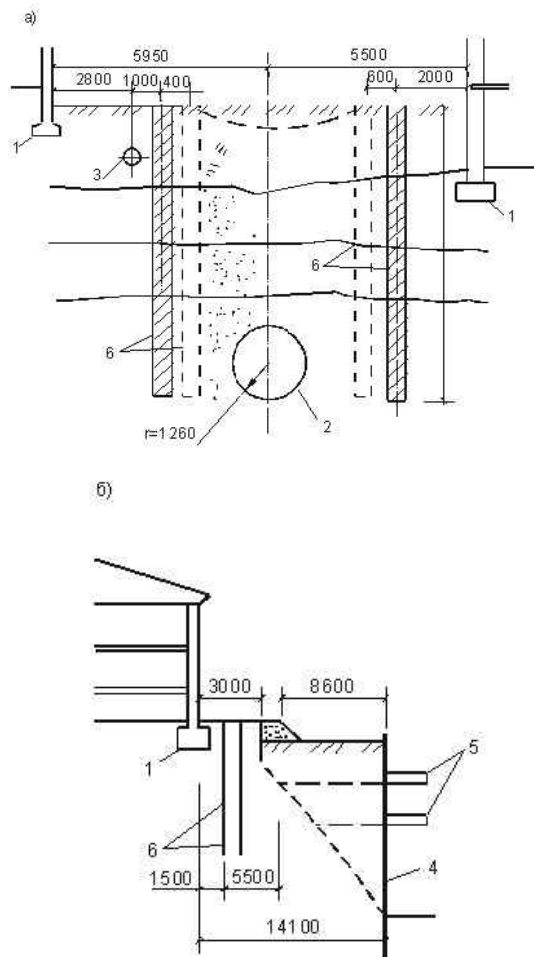


Рис. 22. Примеры устройства отсечных конструкций из свайных стен при производстве горных работ вблизи существующих зданий в Минске:

- а) – проходка тоннелей между корпусами колледжа;
- б) – возведение котлована станции метро «Октябрьская» возле музея; 1 – фундаменты; 2 – тоннель; 3 – трубопровод; 4 – ограждающая стена; 5 – трубчатые распорки; 6 – сваи отсечной конструкции

Это приводит к занижению несущей способности свай в силу малого сопротивления сжатию под нижними концами. В частности, при испытании одной из свай, выполненной в водонасыщенных грунтах по традиционной технологии в котловане под высотное здание на месте бывшего кафе «Реченька» по пр. Победи-

телей, была достигнута ее несущая способность по грунту всего 750 кН.

Усовершенствование технологии устройства свай с вибрационным погружением обсадной трубы и созданием внизу нее уплотненной песчаной пробки позволило исключить ее выдавливание и разупрочнение окружающего сваю водонасыщенного грунта. Последующее погружение внутренней трубы с заглушенным нижним торцом и образование пяты из спрессованного песка (рис. 23) позволили передать вдавливающие усилия на сваи до 2700 кН. При этом общие осадки у шести опытных свай составили от 16,5 до 24,5 мм при почти линейном их возрастании с увеличением вдавливающих нагрузок [3].



Рис. 23. Погружение внутренней трубы с заглушенным нижним торцом в обсадной трубе

При бетонировании стволов свай в обводненных грунтах весьма эффективен метод восходящего раствора проф. И. Н. Ахвердова: погруженную с теряемым башмаком обсадную трубу заполняют щебнем, в который снизу вверх закачивают цементный раствор по мере извлечения трубы.

В настоящее время ОАО «Буровая компания «Дельта» освоила и успешно применяет технологию SFA выполнения буронабивных свай большой несущей способности при помощи итальянского оборудования. При этом скважины бурят в любых, даже водонасыщенных, грунтах полым непрерывным шнеком, через который по мере его последующего подъема закачивается под избыточным давлением бетон, а в него сразу же погружается арматурный каркас. Данная технология при большой скоро-

сти устройства свай обеспечивает опрессовку грунта под давлением вдоль стволов под пятами без шламообразования (рис. 24).

а)



б)



в)



Рис. 24. Оборудование для устройства свай SFA:
 а) – буровой станок со сплошным полым шнеком;
 б) – комплект оборудования при устройстве свай;
 в) – подъем шнека с бетоном на лопастях и погружение каркаса в скважину вибратором

По данной технологии с применением указанного оборудования выполнены и испытаны опытные сваи на площадке высотной секции жилого дома жилого массива «Брилевичи» и здания штаб-квартиры Национального олимпийского комитета Республики Беларусь в г. Минске.

В связи с изменчивостью характера напластований и свойств грунтов опытные сваи имели переменные длины (7,5; 8,5 и 9,5 м) и диаметры стволов (0,7 и 0,9 м). В грунтовых условиях площадки вдавливающие нагрузки на сваи доводились от 1800 кН до 3000 кН. При осадках 24 мм значения несущих способностей от 1606 кН до 2844 кН.

Оправдали себя противооползневые удерживающие конструкции, включающие постоянные буроинъекционные анкеры вместе с лучевыми дренами [1, 3] (рис. 25).

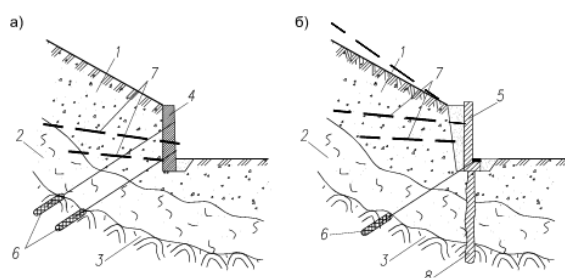


Рис. 25. Схемы заанкеренных противооползневых конструкций:

- а) – подпорная стена; б) – подпорная стена со сваями;
1 – оползневый массив; 2 – выветрелая скала;
3 – прочная скала; 4 – подпорная стена; 5 – свайный ростверк; 6 – анкеры; 7 – дренаи; 8 – сваи

Они применены на ряде объектов в Крыму, при спасении памятника архитектуры – Каложской церкви в г. Гродно возле р. Неман (рис. 26) и мемориального музея З. Азгура в г. Минске.

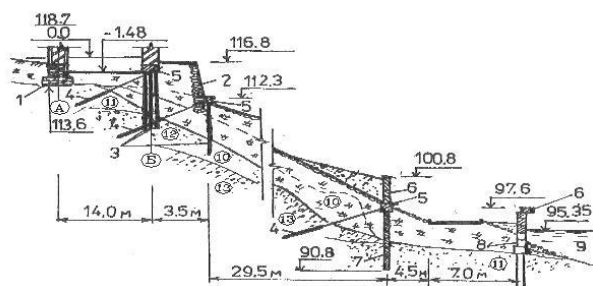


Рис. 26. Конструктивные противооползневые мероприятия по сохранению Каложской церкви в г. Гродно:

- 1 – фундаменты церкви; 2 – существующая подпорная стена; 3 – буроинъекционные сваи; 4 – анкеры; 5 – заанкеренная подпорная стена со свайным ростверком; 6 – наращиваемые блоки береговой подпорной стены; 7 – буронабивные сваи; 8 – старая стена на забивных сваях; 9 – река Неман

Совершенствование традиционных конструкций фундаментов и геотехнических технологий, а также применение новых разработок способствуют повышению эффективности и интенсификации работ нулевого цикла. Наличие в арсенале белорусских строителей современных прогрессивных технологий (метод «стена в грунте», буроинъекционная, гидроструйная, сваи вибрационные и системы SFA, упрочнение и армирование грунтов в основаниях фундаментов) и базирующиеся на них конструкции фундаментов значительно расширяют диапазон решаемых ответственных геотехнических и экологических задач в самых разнообразных геологических и гидрогеологических условиях.

Обилие перечисленных выше геотехнических технологий в строительной практике Беларуси диктуется многообразием инженерно-геологических и гидрогеологических условий при возведении и реконструкции самых различных объектов. Успешному использованию этих технологий и повышению их эффективности благоприятствуют разработанные в Беларуси национальные нормативные документы [5 – 9], которые обобщают отечественный и зарубежный производственный опыт и выполненные за последние годы исследования, в том числе при участии и под научным руководством одного из авторов. Впервые в странах СНГ разработаны документы, посвященные армированным грунтам и геотехническим реконструкциям, причем последний – с участием коллег из Словакии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитенко, М. И. Буроинъекционные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений [Текст] / М. И. Никитенко. – Мн.: БНТУ, 2007. – 580 с.
2. Опыт анкерования ограждений глубоких котлованов [Текст] / М. И. Никитенко и др. // Строительная наука и техника. – 2008. – № 3 (18). – С. 10-20.
3. Никитенко, М. И. Некоторые проблемы свайных фундаментов в геотехнической практике Беларуси [Текст] / М. И. Никитенко, В. Ю. Журавский // Строительная наука и техника. – 2008. – № 4 (19). – С. 44-51.
4. Способ выполнения буроинъекционного анкера [Текст]: а.с. 1392203 СССР, МКИ Е 01 D 5/80 / М. И. Никитенко и др.; Белор. политехн. ин-т. – № 4127194/31-33; заявл. 02.10.86; опубл. 30.04.88. Бюл. № 16 // Открытия. Изобрет. – 1988. – № 16.

5. СНБ 5.01.01-99. Основания и фундаменты зданий и сооружений [Текст]: Утв.: Приказ Минстройархитектуры РБ. – Мн., 1999. – 36 с.
6. Проектирование и устройство оснований из армированного гранта [Текст] : Пособие П 10-01 к СНБ 5.01.01-99. – Минстройархитектуры РБ. – Мн., 2002. – 44 с.
7. Геотехнические реконструкции оснований и фундаментов зданий и сооружений [Текст] : Пособие П 10-01 к СНБ 5.01.01-99. – Минстройархитектуры РБ. – Мн., 2001. – 120 с.
8. Проектирование и устройство буроинъекционных анкеров и свай [Текст] : Пособие П 18-04 к СНБ 5.01.01-99. – Минстройархитектуры РБ. – Мн., 2005. – 79 с.
9. Проектирование и устройство фундаментов из свай набивных с уплотненным основанием [Текст] : Пособие П 19-04 к СНБ 5.01.01-99. – Минстройархитектуры РБ. – Мн., 2006. – 88 с.

Поступила в редколлегию 25.03.2010.

Принята к печати 31.03.2010.

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ, СТРУКТУРИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОННОЇ СУМІШІ ТА КОНСТРУКЦІЙНОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНУ

У статті розглянуто взаємний вплив пружних та міцнісних властивостей розчинних складових керамзитобетону на його фізико-механічні характеристики.

В статье рассмотрено взаимное влияние упругих и прочностных свойств растворных составляющих керамзитобетона на его физико-механические характеристики.

In the article the aspects of mutual influence of the resilience and cohesion characteristics of the concrete mortar ingredients on its physical and mechanical properties are considered.

Актуальним в наш час є вирішення проблем екології, економіки, конкурентоспроможності продукції, які тісно пов'язані з питаннями енергозбереження. Термічний опір існуючих в Україні огорожувальних конструкцій майже у три рази нижчий, а показники питомої витрати енергії на опалення житла є вищими у порівнянні з європейськими країнами. Підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій як нових, так і існуючих споруд можливе за рахунок використання легких бетонів. За призначенням легкі бетони поділяють на конструкційні та теплоізоляційні. Із різновидів легкого бетону найбільше застосовують керамзитобетон. Відомо, що при зростанні середньої густини міцність керамзитобетону також зростає. Тобто міцність керамзитобетону порівняльна з міцністю важкого бетону. Це дає можливість за необхідності замінити виробу з важкого бетону виробами з керамзитобетону. Такі технологічні рішення особливо сприятливі для підприємств, які випускають і керамзит, і виробу збірного залізобетону. Перед заводською технологією залізобетону стає питання оптимізації структури і удосконалення методів виготовлення виробів із конструкційного керамзитобетону.

Міцність легкого бетону залежить від активності в'язучого, міцнісних і деформаційних характеристик цементного каменя і заповнювачів, концентрації їх в об'ємі матеріалу, якості контактної зони, від форми, характеру поверхні і розмірів частинок заповнювачів [1 – 4].

Проведені дослідження за визначенням міцнісних і пружних характеристик розчину і керамзитобетону (рис. 1, 2).

Аналіз взаємозв'язку між міцнісними і пружними властивостями розчинної частини бето-

ну й самого бетону, показав, що у розчину модуль пружності залежить від того, яка складова в ньому переважає. При співвідношеннях цементу до піску від 1:1 до 1:6 модуль пружності не міняється і складає $10 \cdot 10^3$ МПа. При співвідношенні 3:1 модуль розчину знижується до $5 \cdot 10^3$ МПа. Міцність розчину збільшується із збільшенням кількості в ньому цементу. При співвідношенні Ц:П більше 1:5 приріст міцності розчину складає 0,8...1,0 МПа.

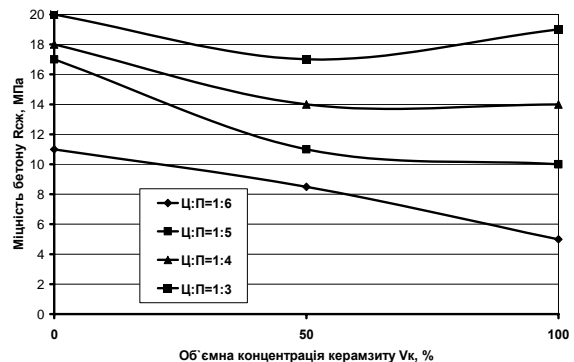


Рис. 1. Залежність міцності бетону від об'ємної концентрації керамзиту

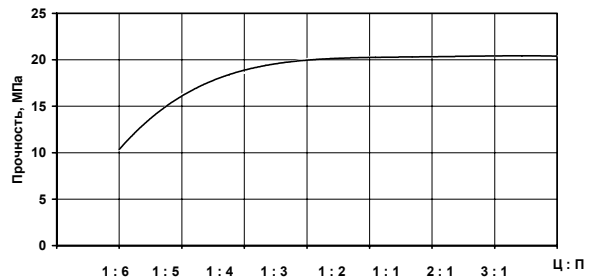


Рис. 2. Залежність міцності розчинної складової від співвідношення витрати цементу до піску

У бетоні при збільшенні вмісту крупного заповнювача збільшення співвідношення між витратою цементу і піску підвищує модуль пружності бетону.

Модуль пружності бетону в значній мірі залежить від заповнення міжзернових порожнеч піску цементним тістом. При повному заповненні міжзернових порожнеч (Ц:П складає більше 1:3) модуль пружності керамзитобетону зростає в 1,5 рази.

Міцність керамзитобетону визначається міцністю розчинної складової, яка залежить від способу ущільнення, кількості і марки цементу. Рациональні значення міцності розчинної складової отримані при співвідношенні Ц:П від 1:3 до 1:2.

Таким чином, марку керамзитобетону при однаковому ступені ущільнення можливо підвищити з 200 до 250 за рахунок збільшення активності цементу або шляхом підвищення міцності керамзиту в 4 рази.

Для підтвердження теоретичних і практичних уявлень про міцність легких бетонів запропоновано безліч формул, які можна розділити на три групи.

Перша група – формули, в яких міцність легкого бетону залежить від міцності властивостей компонентів і їх відносного вмісту (формула Ю. Е. Корниловича):

$$R_6 = R_p(1 - \varphi) + R_k \varphi, \quad (1)$$

де R_p – міцність складової розчину; R_k – міцність крупного пористого заповнювача (керамзиту); φ – об'ємна концентрація крупного заповнювача.

Друга група формул пов'язує міцність бетону з деформаційними властивостями компонентів (формула А. І. Ваганова):

$$R_6 = E_6 \cdot \varepsilon_c = \frac{1}{\mu} \cdot E_6 \cdot \varepsilon_p, \quad (2)$$

де E_6 – модуль деформації бетону у момент руйнування; ε_c – гранична стисливість заповнювача; ε_p – гранична розтяжність заповнювача; μ – коефіцієнт Пуассона.

Третя група формул враховує міцність компонентів, їх об'ємний вміст і деформаційні властивості (формула Б. Г. Скрамтаєва):

$$R_6 = R_p \cdot \left[1 + \left(\frac{E_3}{E_p - 1} \right) \cdot \varphi \right], \quad (3)$$

де E_3 і E_p – відповідно, модулі пружності заповнювача і розчину.

Істотний вплив міцності пористого заповнювача – керамзиту – приводить до меншого відносного впливу на міцність легкого бетону таких чинників як В/Ц і активність цементу.

В цілях економного використання цементу мінімальна міцність керамзитового гравію повинна складати 0,1 від необхідної міцності бетону R_6 . Оптимальну міцність керамзитового гравію призначають в межах (0,1...0,16) R_6 . Завищення міцності керамзиту приведе до збільшення об'ємної маси керамзитобетону, внаслідок чого буде втрачена його головна перевага перед звичайним важким бетоном. На міцність бетону впливає співвідношення модулів пружності керамзиту і розчинної частини. Його оптимальне значення 0,9.

Напружено-деформаційний стан бетону і залежність його зміни від пружних властивостей, об'ємної концентрації і складових дозволяє прогнозувати оптимальну структуру і його властивості. Розв'язувалося завдання вивчення за допомогою методу кінцевих елементів напружено-деформаційного стану бетону. При цьому розглянуто дві двокомпонентні системи в єдиній моделі. Перша з двокомпонентних систем в моделі – це керамзит (включення) і розчин (матриця), а друга – дрібний заповнювач у вигляді піщинки (включення) і цементний камінь (матриця). Такі складні системи дозволяють визначити вплив на напружено-деформаційний стан як пружних властивостей складових, таких як керамзит, розчин, пісок, цементний камінь, так і взаємний вплив їх залежно від розташування, концентрації складових і контактних зон крупного і дрібного заповнювачів з цементним каменем.

Вибрано три варіанти моделей. Кожна модель містить чотири гранули керамзиту і чотири або вісім піщинок. Частина контактної зони гранул керамзиту і піщинок має оболонку (плівку) з цементного каменя. Решта частини моделі зайнята розчином. Оскільки моделі відрізняються кількістю і розташуванням піщинок, то це дозволяє варіювати об'ємну концентрацію керамзиту і товщину плівки цементного каменя. У всіх трьох варіантах піщинки розташовані під гранулою керамзиту щодо навантаження, що дає можливість вивчати зону усередині моделі, включаючи спотворення, можливі у країв. При цьому розглядається і найбільш небезпечна зона з погляду максимальних розтягуючих напруг.

Варійованими факторами були модуль пружності керамзиту E_k , модуль пружності цементного каменя $E_{цк}$, об'ємна концентрація керамзиту V_k , товщина плівки цементного каменя в

зоні найменшої відстані між зернами заповнювача δ . Об'ємна концентрація виражена у вигляді відстані між зернами керамзиту L . Об'ємна концентрація керамзиту і відстань між зернами обернено пропорційні. Фактори, що вивчаються, варіювалися кожен на трьох рівнях. Товщину плівки цементного каменя змінювали в оптимальній області від 0,05 мм до 0,1 мм. Об'ємна концентрація керамзиту на максимальному рівні $V_k = 1000 \text{ л/м}^3$.

Прийняті постійними і рівними модулі пружності розчину $E_p = 1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ і піску $E_n = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$. Як величина, що оптимізується, вибраний коефіцієнт концентрації розтягуючих напруг, найбільш небезпечних для бетону.

Моделі розбиті на кінцеві трикутні елементи. Оскільки концентрація напруг очікується на межі розділу фаз, тобто в контактній зоні матриці і включення, в цих зонах було прийнято детальне розбиття на дрібні елементи. Детально вивчався напружено-деформаційний стан в області моделі, де виділені піщинки, плівка цементного каменя навколо них і гранули керамзиту. Аналіз виконаний по максимальних коефіцієнтах концентрації розтягуючих напруг для другої двокомпонентної системи, що виникають в плівці цементного каменя біля зерна піску.

Виконаний статистичний аналіз і одержана залежність максимального коефіцієнта концентрації розтягуючих напруг η_y від модуля пружності керамзиту E_k , модуля пружності цементного каменя $E_{цк}$, товщини плівки цементного каменя δ і об'ємної концентрації керамзиту V_k у вигляді полінома другого ступеня.

У вивчених межах варіювання факторів найсильніше на напружено-деформаційний стан бетону робить вплив об'ємна концентрація керамзиту. При збільшенні його концентрації від $L = 0,2 \text{ см}$ і $V_k = 760 \text{ л/м}^3$ до $L = 0,0 \text{ см}$ і $V_k = 1000 \text{ л/м}^3$ коефіцієнт концентрації напруг знижується від 1,4 до 0,3, тобто приблизно в 5 разів.

Друге місце по силі впливу займає модуль пружності керамзиту. Найсильніше знижується коефіцієнт концентрації при збільшенні модуля пружності E_k від $0,5 \cdot 10^3$ до $2,75 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

До особливостей легкобетонних сумішей, як відомо, відносять швидку розшарованість при додатку до них вібраційної дії. При відробітку нової, низькочастотної технології формування бетонних сумішей, необхідно встановити межі

параметрів вібрації залежно від легкоукладальності бетонної суміші, при яких суміш не розшарується.

У якості характеристик легкоукладальності прийняті осідання конуса і вібров'язкість. Для визначення принципу відповідності в системі «режим-склад» з метою встановлення меж вібраційної дії, при яких суміш в процесі формування не розшарується, проводили натурний експеримент. У ньому легкоукладальність варіювалася витратою цементного тіста при постійному водоцементному відношенні. Режим формування приймався низькочастотний з частотою 15 Гц, симетричний. Експеримент виконаний за планом 2^3 , тобто мав три змінних чинника на трьох рівнях. Межі варіювання в кодівих і натуральних значеннях змінних представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Межі варіювання чинників експерименту

| Коди рівнів | Натуральні значення чинників | | |
|--------------|---|----------------------|-----------------------------|
| | витрата цементу $\rho(x_1)$, кг/м ³ | прискорення $A(x_2)$ | час формування $t(x_3)$, с |
| Нижній (-I) | 250 | 1,5 | 10 |
| Середній (0) | 300 | 2,5 | 40 |
| Верхній (+I) | 350 | 3,5 | 70 |

Для кожної порції керамзитобетонної суміші відповідно до плану експерименту визначалася її удобоукладальність стандартним конусом. Потім замірялася вібров'язкість суміші для кожного запланованого варіанту складу і режиму.

Наявність розшарування і його величину встановлювали при формуванні бетонної суміші в текстолітовій формі з розмірами 15 x 15 x 30 см. При цьому через кожні дві години після формування по заданому режиму бічну стінку форми видаляли, відкриту поверхню відформованого бетону промивали водою до оголення гранул керамзиту. Заміряли загальну висоту шару бетону h і товщину шару розчину, що осів у дна Δh .

Як показник розшарування (величини, що оптимізується) використовували відношення $\frac{\Delta h}{h}$. Прийнятий відлік наявності розшарування при $\frac{\Delta h}{h} = 0,02$ і більш, оскільки до цієї межі він не змінює міцність керамзитобетону.

Виконана статистична обробка результатів і одержаний поліном другого ступеня:

$$y\left(\frac{\Delta h}{h}\right) = 0,047 - 0,015x_1 + 0,026x_2 + \\ + 0,026x_3 + 0,011x_1^2 - 0,09x_1x_2 - \\ - 0,009x_1x_3 - 0,27x_2^2 + 0,019x_2x_3 - 0,015x_3^2.$$

Середньоквадратичне відхилення експериментальних результатів від теоретичних складає $S = 0,0064$, кореляційне відношення – $0,802$.

На підставі одержаного полінома побудовано дві залежності. Із залежності вібрів'язкості від прискорення вібрації (рис. 3) видно, що для вібраційного розрідження рухомих і особливо литих сумішей прискорення від 2 до 5 є достатнім.

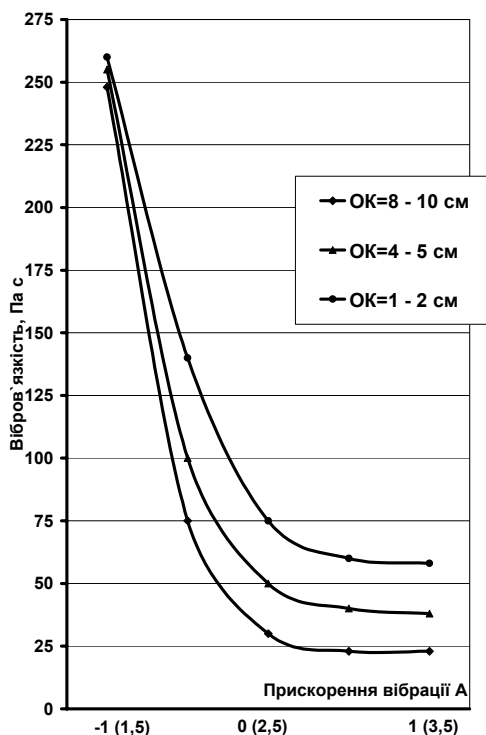


Рис. 3. Залежність вібрів'язкості від прискорення вібрації

Друга залежність є номограмою відповідності в системі «режим – склад» для отримання відформованого бетону, що не розшарується (рис. 4).

Криві номограми відповідають визначеній вібрів'язкості керамзитобетонної суміші, яка залежить як від складу, так і від режиму вібраційної дії. Номограма має загальний характер за показником вібрів'язкості, і нею можна користуватися у межах величини вібрів'язкості, одержаної при будь-яких поєднаннях складу суміші і прискорення вібраційної дії. На номограмі виділено режими, які не розшаровують і розшаровують керамзитобетонну суміш. При-

клад призначення режиму показаний для бетонної суміші з ОК = 6 см. Суміш можна формувати режимом, який дозволяє одержати вібрів'язкість $\eta = 40 \text{ Па} \cdot \text{с}$ на протязі не більше 45 с або $\eta = 50 \text{ Па} \cdot \text{с}$ на протязі не більше 55 с.

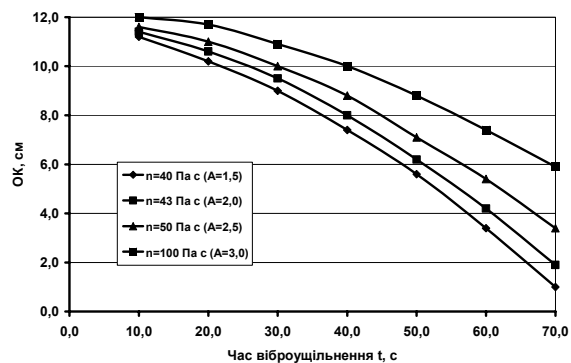


Рис. 4. Номограма відповідності в системі «режим – склад» для отримання керамзитобетону, що не розшарується

Таким чином, при низькочастотних і інших режимах вібраційної дії, відмінних від стандартних, здатність до формування керамзитобетонної суміші доцільно оцінювати за величиною її вібрів'язкості, яка є комплексною характеристикою, що відображає режим вібрації і склад бетону. Залежно від вібрів'язкості необхідно обмежувати час формування з тим, щоб не допускати розшарування. З одержаних в результаті досліджень даних виходить, що при формуванні малорухливих сумішей (ОК = 1...3 см; $\eta = 40...50 \text{ Па} \cdot \text{с}$) час формування не повинен перевищувати 60...70 с; при формуванні рухомих сумішей (ОК = 3...15 см; $\eta = 40...100 \text{ Па} \cdot \text{с}$) – 10...60 с.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дворкин, Л. И. Основы бетоноведения [Текст] / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – СПб.: ООО «Стройбетон», 2006. – 692 с.
2. Ребиндер, П. А. Поверхностно-активные вещества [Текст] / П. А. Ребиндер. – М.: Знание, 1961. – 46 с.
3. Ершов, Л. Д. Высокопрочные и быстротвердеющие цементы [Текст] / Л. Д. Ершов. – Изд-во «Будивельник», 1975. – 161 с.
4. Бизов, В. Ф. Відкриті гірничі роботи. Том XIII [Текст] : підр. для студ. ВНЗ за напрямком «Гірництво» / В. Ф. Бизов, А. Ю. Дриженко. – Кривий Ріг: Мінерал, 2004. – 341 с.

Надійшла до редколегії 10.03.2010.
Прийнята до друку 12.03.2010.

Я. М. ПАСТЕРНАК (Луцький національний технічний університет),
Г. Т. СУЛИМ (Львівський національний університет ім. І. Франка),
Й. Й. ЛУЧКО (Львівська філія ДПТУ)

МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДАМИ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ТОНКИХ АРМУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД ТА ТУНЕЛІВ

Побудовано модель тонкого армування, що враховує розтяг, зсув та згин останнього. Розроблену модель використано в методі інтегральних рівнянь при дослідженні концентрації напружень у стінці частково зміцненого тунелю. Отримано числові результати для різних значень довжини армування та його відносної жорсткості. Здійснено їх аналіз.

Построена модель тонкого армирования, которая учитывает растяжение, сдвиг и изгиб последнего. Разработанная модель использована в методе интегральных уравнений при исследовании концентрации напряжений в стенке частично подкрепленного туннеля. Получены численные результаты для различных значений длины армирования и его относительной жесткости. Произведен их анализ.

In this paper the model of thin reinforcement that takes into account its tension, shear and bending is developed. The model developed is introduced into the integral equation method for study of stress concentration in the wall of partially reinforced tunnel. The numerical results are obtained and analyzed for different values of reinforcement length and relative rigidity.

Вступ

Задачі геомеханіки та інженерної геології настільки складні і багатофакторні, що їх повного формулювання, яке б адекватно відобразило повну картину явища, годі й чекати. Однак, як зазначено у роботі [1], моделювання таких задач навіть в межах фізично й геометрично лінійної теорії пружності дає можливість зрозуміти найважливіші властивості поставленої інженерної проблеми. Зокрема, під час проектування підземних споруд, якими є, скажімо, тунелі, необхідними є методи моделювання природних та конструкційних факторів, що обумовлюють напружений стан елементів споруди. Важливим при цьому є врахування впливу на напружений стан тонких армувальних складових, що сприяє оптимізації проекту та зменшує витрати на будівництво.

На цей час склалися два основні підходи дослідження тіл із тонкими елементами: прямий [2, 3], у якому останні вважають об'єктом із певною товщиною, та спеціальний [4 – 6], де на основі застосування принципу спряження континуумів різної вимірності [7] тонкий елемент заступають розрізом уздовж його серединної поверхні із заданими на ньому певними крайовими умовами взаємодії неоднорідності з матеріалом середовища.

Для дослідження напруженого стану тіл складної форми із тонкими криволінійними армувальними елементами видається ефективним

поєднання прямих числових методів зі спеціальними підходами. Зокрема у роботі [1] для вивчення заповнених тріщин використано модель типу пружної основи Вінклера. Подібна модель введена в схему методу скінчених елементів у роботі [4] для визначення напруженого стану тіл із тонкими включеннями. Ці моделі дають можливість описувати тонкі неоднорідності з податного матеріалу, які є заповненнями, однак не можуть вважатися підкріпленнями.

Для опису армувальних елементів конструкції обов'язково необхідно враховувати їх опір поздовжньому розтягу та поперечному згину. Для тонких пружних елементів довільної жорсткості відповідний підхід [8] розроблено на основі методу інтегральних рівнянь. У цьому дослідженні розвинуто практичну реалізацію лінійчатої моделі [8] на підставі врахування опору тонкого елемента згину та обґрунтовано можливість її використання до моделювання армувальних елементів підземних споруд.

1. Формулювання задачі

У задачах інженерної геомеханіки, пов'язаних із підземними будівлями, необхідно перш за все постулювати початковий напружений стан масиву гірських порід [1]. Відповідно до підходу [1], повні напруження у довільній точці масиву можна подати як суму початкових напружень σ_{ij}^0 та зміни напружень σ'_{ij} в цій точці.

Аналогічні співвідношення записуються для переміщень: $u_i = u_i^0 + u_i'$. Як правило, початкові переміщення вважають рівними нулю, і тоді повні переміщення та додаткові переміщення збігаються.

При постановці крайових задач в додаткових напруженнях використовують як вектор заданих навантажень t_i , так і вектор початкових напружень t_i^0 . Додаткові напруження, що необхідно прикласти до межі, таким чином, дорівнюють $t_i' = t_i - t_i^0$.

Якщо початкові напруження σ_{ij}^0 є однорідними, або близькими до таких, то задачу можна звести до розгляду середовища із заданим на безмежності однорідним навантаженням $\sigma_{ij}^\infty = \sigma_{ij}^0$. Надалі будемо аналізувати лише цей найпростіший випадок. Розгляд загального випадку за відомого поля залишкових напружень не вносить принципових складностей у схему розв'язування задачі.

Розглянемо задачу про тунелі в однорідному пружному масиві за висунутих вище припущень. Вважатимемо, що матеріал внутрішньої обробки тунелю близький за своїми властивостями із матеріалом масиву. Для зміцнення між матеріалом обробки та власне породою вводяться тонкі армувальні елементи. Така задача зводиться до плоскої деформації середовища з отворами, близько до яких розташовані тонкі криволінійні включення (армування).

2. Інтегральні рівняння задачі

Створюючи лінійчатую модель підкріплення, вилучимо із розгляду армувальний елемент як геометричний об'єкт, а контактні напруження та переміщення перенесемо на його серединну поверхню Γ_C (відповідно на береги Γ_C^+ та Γ_C^- , рис. 1). Переміщення у тілі з розрізом визначаються з такої тотожності Сомільяни [6, 9]:

$$u_i(\boldsymbol{\xi}) = u_i^{\text{hom}}(\boldsymbol{\xi}) + \int_{\Gamma_C^+} U_{ij}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \Sigma t_j(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) - \int_{\Gamma_C^-} T_{ij}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \Delta u_j(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}), \quad (1)$$

де u_i , t_i – компоненти векторів переміщень та напружень; u_i^{hom} – переміщення, що відповідають однорідному полю напружень σ_{ij}^∞ ;

$\Delta u_i = u_i^+ - u_i^-$, $\Delta t_i = t_i^+ - t_i^-$, $\Sigma u_i = u_i^+ + u_i^-$, $\Sigma t_i = t_i^+ + t_i^-$; n_j^+ – компоненти вектора нормалі

до поверхні Γ_C^+ ; знаками «+» та «-» позначено величини, що стосуються поверхонь Γ_C^+ та Γ_C^- , утворених розрізом Γ_C (див. рис. 1). Індеси у позначеннях відповідають проекціям векторів на осі глобальної системи координат Ox_1x_2 . У формулах прийняте правило Айнштайна підсумовування за індексом, що повторюється. Ядра інтегральних рівнянь для плоскої задачі теорії пружності записані, зокрема в [1].

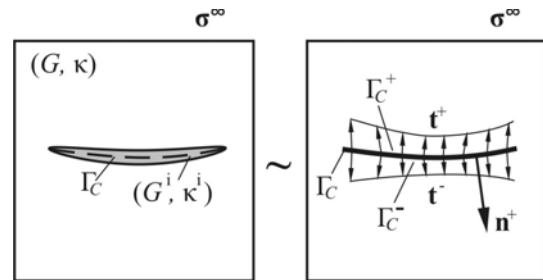


Рис. 1. Схема моделювання тонкого армування

Спрямовуючи внутрішню точку $\boldsymbol{\xi}$ до точки $\mathbf{y} \in \Gamma_C$ розрізу Γ_C та вважаючи, що в точці \mathbf{y} крива Γ_C є гладкою, аналогічно до [9] із (1) отримаємо сингулярне інтегральне рівняння стосовно переміщень:

$$\frac{1}{2} \Sigma u_i(\mathbf{y}) = u_i^{\text{hom}}(\mathbf{y}) + \text{RPV} \int_{\Gamma_C^+} U_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Sigma t_j(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) - \text{CPV} \int_{\Gamma_C^-} T_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Delta u_j(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}), \quad (2)$$

де позначення RPV означає величину невласного інтеграла (Riemann principal value); CPV – головне значення інтеграла (Cauchy principal value). При числовому моделюванні ламаних розрізів чи включень інтегральне рівняння (2) можна використовувати, забезпечивши в обчислювальній схемі умову, що точка колокації \mathbf{y} не потрапляє у точку зламу. Диференціюючи (2) за y_k , використовуючи закон Гука та враховуючи, що $n_i^+ = -n_i^-$, отримаємо

$$\frac{1}{2} \Delta t_i(\mathbf{y}) = n_j^+(\mathbf{y}) \left[\sigma_{ij}^\infty(\mathbf{y}) + \text{CPV} \int_{\Gamma_C^+} D_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Sigma t_k(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) - \text{HPV} \int_{\Gamma_C^-} S_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Delta u_k(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) \right], \quad (3)$$

де HPV – скінчена частина гіперсингулярного інтеграла (Hadamard principal value).

Отвори в масиві моделюватимемо замкненими розрізами із заданим на них розривом вектора напружень за врахування умови $u_i^+ \equiv 0$ для довільної точки межі отвору.

Модель тонкого армування повинна включати чотири лінійно незалежні рівняння типу

$$F_k(\Delta t_i, \Sigma t_i, \Delta u_i, \Sigma u_i) = 0 \quad (k=1, \dots, 4). \quad (4)$$

Тоді система рівнянь (2)–(4) є повною.

Припустимо, що модель тонкого армування (4) дає можливість знайти з її рівнянь величини Σu_i та Δt_i у явній формі:

$$\begin{aligned} \Sigma u_i &= F_i^u(\Sigma t_j, \Delta u_j), \\ \Delta t_i &= F_i^t(\Sigma t_j, \Delta u_j). \end{aligned} \quad (i, j=1, \dots, 2) \quad (5)$$

Тоді система рівнянь (2)–(4) набуде вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} & \text{RPV} \int_{\Gamma_c^+} U_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Sigma t_j(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) - \\ & - \text{CPV} \int_{\Gamma_c^+} T_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Delta u_j(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) = \\ & = \frac{F_i^u(\Sigma t_j, \Delta u_j)}{2 - u_i^{\text{hom}}(\mathbf{y})}, \\ & n_j^+(\mathbf{y}) \left[\text{CPV} \int_{\Gamma_c^+} D_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Sigma t_k(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) - \right. \\ & \left. - \text{HPV} \int_{\Gamma_c^+} S_{ijk}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Delta u_k(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) \right] = \\ & = \frac{F_i^t(\Sigma t_j, \Delta u_j)}{2 - n_j^+(\mathbf{y}) \sigma_{ij}^\infty(\mathbf{y})}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Таким чином, поставлена задача зведеться до знаходження із системи інтегральних рівнянь (6) невідомих стрибків переміщень Δu_j та напружень $\Delta \sigma_{j\tau} = \Sigma t_j$.

Систему крайових інтегральних рівнянь (6) розв'язуватимемо методом граничних елементів [9] із використанням лінійчатих розривних квадратичних елементів.

3. Модель тонкого пружного включення (армування)

Використаємо розроблену авторами модель тонкого пружного включення [8], у якій для k -го граничного елемента тонкого включення маємо такі зв'язки між крайовими функціями:

$$\begin{aligned} \Delta t_i^k &= -\alpha_{pi} \alpha_{qj} A_{pq} \Delta u_j^k; \\ \frac{1}{2} \Sigma u_i^k(\xi) &= u_i^0 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{s=1}^{k-1} \alpha_{pi}^s \alpha_{qj}^s B_{pq} J_s^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Sigma t_j^s(\zeta) d\zeta d\eta + \\ & + \alpha_{pi}^k \alpha_{qj}^k B_{pq} J_k^2 \int_{-1}^{\xi} \int_{-1}^1 \Sigma t_j^k(\zeta) d\zeta d\eta + \\ & + 2 \sum_{m=1}^{k-1} J_m \alpha_{pi}^m \alpha_{qj}^m B_{pq} \left(P_j^0 + \sum_{s=1}^{m-1} J_s \int_{-1}^1 \Sigma t_j^s(\xi) d\xi \right) + \\ & + (\xi + 1) J_k \alpha_{pi}^k \alpha_{qj}^k B_{pq} \left(P_j^0 + \sum_{s=1}^{k-1} J_s \int_{-1}^1 \Sigma t_j^s(\xi) d\xi \right), \end{aligned} \quad (7)$$

де компоненти тензора повороту \mathbf{a} дорівнюють $\alpha_{11} = n_1$, $\alpha_{12} = n_2$, $\alpha_{21} = -n_2$, $\alpha_{22} = n_1$, а компоненти тензорів \mathbf{A} та \mathbf{B} означені так:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{E^i}{h}; \quad A_{22} = \frac{G^i}{h}; \quad A_{12} = A_{21} = 0; \quad B_{11} = \frac{1}{[2hG^i]}; \\ B_{22} &= \frac{1}{[2hE^i]}; \quad B_{12} = B_{21} = 0; \quad E = \frac{G(7-k)}{2}; \end{aligned}$$

J_k – якобіан заміни змінних на k -тому граничному елементі; $P_j^0 = 2h\sigma_j^0$ – зусилля на лівому торці включення; k – стала Мусхелішвілі. Тут h – півтовщина включення, а верхнім індексом « i » позначено величини, що стосуються включення.

Додатково врахуємо у цій моделі особливо важливий для викривлених неоднорідностей згин тонкого включення. Для цього розглянемо рівновагу k -го граничного елемента включення щодо згинальних моментів. Відповідно до рис. 2, момент $M^k(\xi)$ у довільному перерізі ξ граничного елемента k включення дорівнює

$$\begin{aligned} M^k(\xi) &= -M^k(-1) - Q_n^k J_k(\xi + 1) + \\ & + J_k^2 n_j \int_{-1}^{\xi} \Sigma t_j^k(\eta) (\xi - \eta) d\eta. \end{aligned} \quad (8)$$

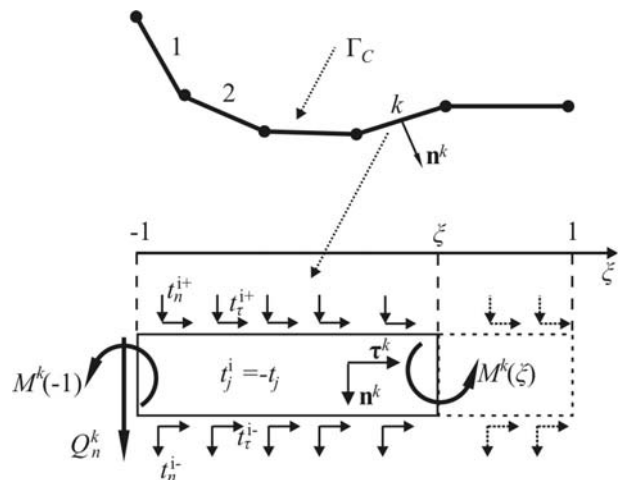


Рис. 2. Схема для запису рівнянь рівноваги моментів

Значення моменту $M^k(-1)$ на лівому торці граничного елемента k визначаються за навантаженням, прикладеним до елементів $1, (k-1)$:

$$M^k(-1) = M_0(\mathbf{x}_k) - \sum_{s=1}^{k-1} J_s^2 \left(C_j^s \int_{-1}^1 \Sigma t_j^s(\xi) d\xi - n_j^s \int_{-1}^1 \Sigma t_j^s(\xi) \xi d\xi \right), \quad (9)$$

де $C_1^s = -[x_2^s(0) - x_2^k(-1)]/J_s$;
 $C_2^s = [x_1^s(0) - x_1^k(-1)]/J_s$; $M_0(\mathbf{x}_k)$ – момент сил, зумовлений торцьовими зусиллями P_j^0 та моментом M_0 на лівому торці включення.

Подібно обчислюємо значення перерізувальної сили Q_n^k на лівому торці граничного елемента k включення:

$$Q_n^k = -n_j^k \left(P_j^0 + \sum_{s=1}^{k-1} J_s \int_{-1}^1 \Sigma t_j^s(\xi) d\xi \right). \quad (10)$$

Відповідно до [10], малий поворот $\omega = \frac{\partial u_n}{\partial x_\tau}$

(вибрано додатний напрям за стрілкою годинника) осі тонкого стрижня пов'язаний зі згинальним моментом співвідношенням Ейлера-Бернуллі

$$\frac{\partial \omega}{\partial x_\tau} = -\frac{M(x_\tau)}{D}, \quad (11)$$

де $D = \frac{16G^i h^3}{3(k^i + 1)}$ – згинальна жорсткість. Інтегруючи (11), отримаємо:

$$\begin{aligned} \omega^k(\xi) &= \omega^k(-1) - \frac{J_k}{D} \int_{-1}^{\xi} M^k(\xi) d\xi, \\ \frac{1}{2} \Sigma u_i^k(\xi) &= \frac{1}{2} \Sigma u_i^k(-1) + \\ &+ n_i^k \omega^k(-1) J_k(\xi+1) - \\ &- \frac{n_i^k J_k^2}{D} \int_{-1}^{\xi} \int_{-1}^{\eta} M^k(\zeta) d\zeta d\eta. \end{aligned} \quad (12)$$

Умова нерозривності осі включення, записана у вигляді

$$\omega^{k-1}(1) = \omega^k(-1); \quad \Sigma u_i^{k-1}(1) = \Sigma u_i^k(-1), \quad (13)$$

дає можливість виконати в (12) рекурсивну підстановку і знайти середнє значення переміщень включення у розгорнутій формі:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Sigma u_i^k(\xi) &= u_i^0 + \\ &+ \omega^0 \left[\sum_{s=1}^{k-1} 2J_s n_i^s + J_k n_i^k(\xi+1) \right] - \\ &- \frac{2}{D} \sum_{s=1}^{k-1} \sum_{m=1}^{s-1} J_s J_m n_i^s \int_{-1}^1 M^m(\xi) d\xi - \\ &- \frac{1}{D} \sum_{s=1}^{k-1} n_i^s J_s^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^{\eta} M^s(\zeta) d\zeta d\eta - \\ &- \frac{n_i^k J_k^2}{D} \int_{-1}^{\xi} \int_{-1}^{\eta} M^k(\zeta) d\zeta d\eta - \\ &- \frac{(\xi+1)}{D} J_k n_i^k \sum_{s=1}^{k-1} J_s \int_{-1}^1 M^s(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (14)$$

Об'єднуючи модель розтягу-стиску-зсуву (7) із моделлю згину (14) з урахуванням позначень (5), отримаємо рівняння математичної моделі тонкого пружного включення, придатні до впровадження у систему рівнянь (11).

Середні значення переміщень u_i^0 та повороту ω^0 лівого торця включення визначимо з рівнянь глобальної рівноваги включення:

$$\begin{aligned} 2h(\sigma_j^n - \sigma_j^0) - \int_{\Gamma_c} \Sigma t_j(\mathbf{x}) d\Gamma(\mathbf{x}) &= 0; \\ M^n(1) + M_n &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Система рівнянь (6), (7) і (14) разом із рівнянням глобальної рівноваги включення (15) є повною для сформульованої задачі.

4. Числовий аналіз

Використаємо розроблену модель тонкого включення для дослідження напруженого стану масиву поблизу тунелю за армування останнього розімкненим пружним підкріпленням. Схему конкретної задачі зображено на рис. 3.

За основний розмір прийемо радіус тунелю R . Для числового аналізу виберемо такі значення параметрів задачі: $R_1 = 1,1R$, півтовщина армування $h = 0,01R$. Пружні властивості арматури характеризуватимемо її відносною жорсткістю $k = \frac{G^i}{G}$. Сталі Мусхелішвілі для матеріалів масиву та арматури вважатимемо однаковими і рівними 1,8 (відповідно, коефіцієнти Пуассона дорівнюють 0,3).

Кругові діаграми значень безрозмірних кильцевих напружень $\frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma}$, еквівалентних у даному випадку коефіцієнту інтенсивності напружень на контурі тунелю, залежно від кута θ

для окремих значень логарифма відносної жорсткості $\lg k = [0; 1; \dots; 5]$ арматури зображено на рис. 4 ($a - \alpha = 135^\circ$; $b - \alpha = 150^\circ$; $в - \alpha = 175^\circ$). Додатними вважатимемо напруження стиску.

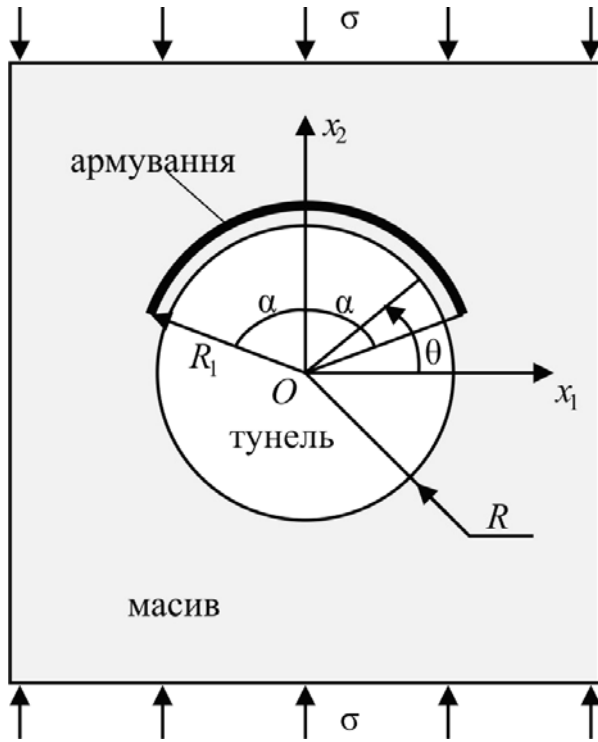


Рис. 3. Схема задачі для числового аналізу

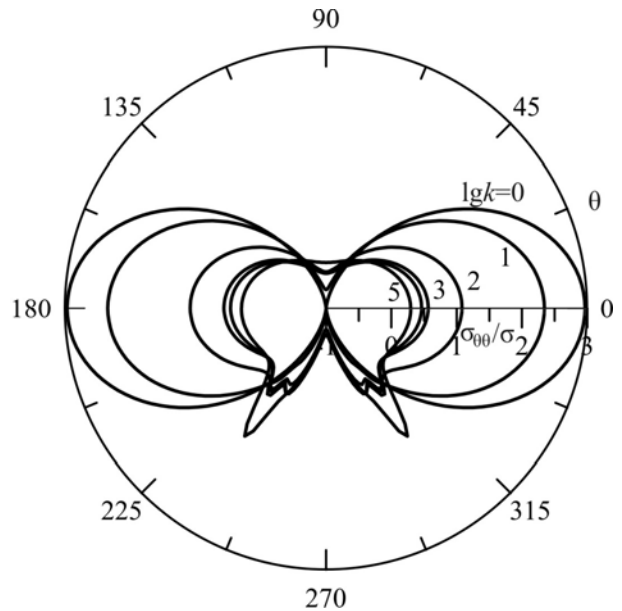


Рис. 4, б

Однорідний випадок, коли пружні властивості підкріплення ідентичні властивостям основного матеріалу (на рис. 4 лінії з позначкою « $\lg k = 0$ »), добре узгоджується з відомим розв'язком Кірша [10]. Із рис. 4 видно, що для зменшення концентрації напружень до значень, близьких до 1, необхідно вибирати армувальні елементи, жорсткість яких приблизно на два порядки більша за жорсткість масиву (за вибраної для розрахунків відносної товщини армування h).

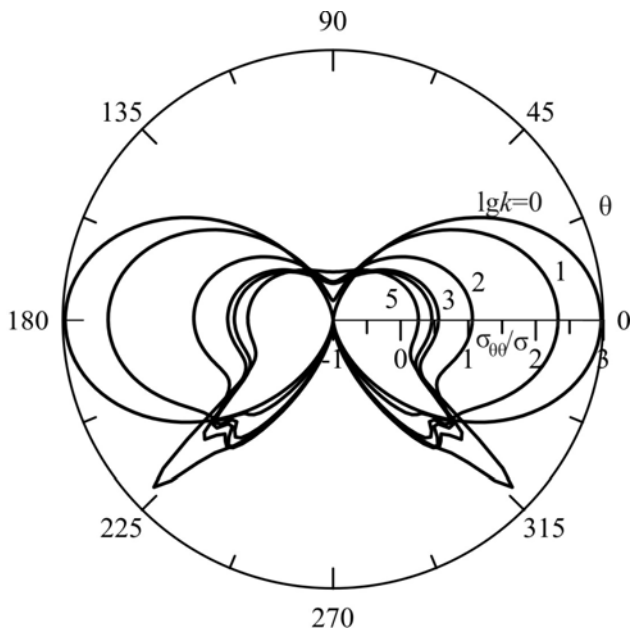


Рис. 4, а

Подальше збільшення жорсткості армування малоефективне, оскільки воно вже значно менше впливає на зміну значень концентрації напружень σ_{00} .

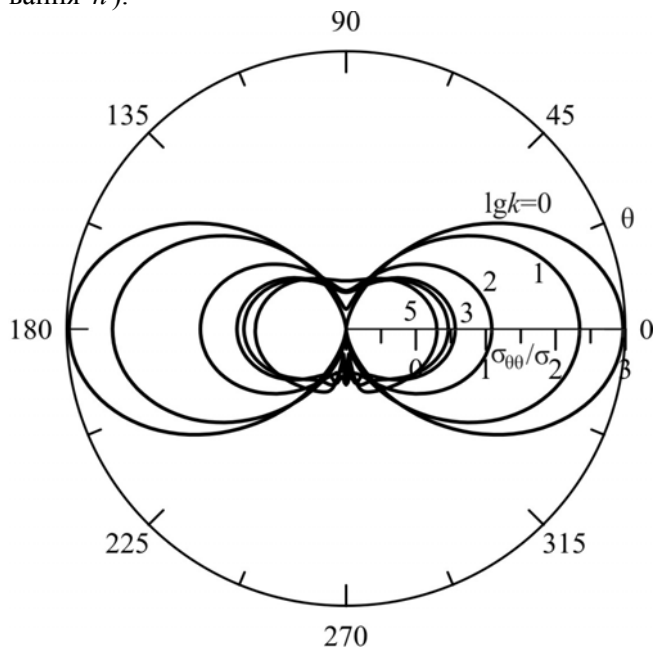


Рис. 4, в

Розімкненість армування чинить істотний вплив на збільшення концентрації напружень в околі кінців останнього. Однак зі збільшенням кута розхилу армування α цей вплив поступо-

во зменшується і, зокрема для $\alpha = 175^\circ$ вже практично не помітний. Зрозуміло також, що хоча розімкнуті підкріплення і зменшують концентрацію напружень на вільній поверхні, у цьому випадку слід зважати на можливість зародження і розвитку руйнування у безпосередній близькості до їхніх країв. Цю проблему можна вирішити на основі результатів застосування методів механіки руйнування [6].

Висновки

На основі класичної теорії згину модель тонкого викривленого включення доповнено додатковими складовими, що враховують його опір згину. Цю модель адаптовано до використання в методі граничних інтегральних рівнянь. За допомогою розробленої числової схеми розглянуто задачу про визначення концентрації напружень в частково підкріпленій тонким елементом стінці тунелю. Отримані числові результати свідчать, що найбільший ефект дає близьке до замкнутого підкріплення, відносна жорсткість якого на 2 порядки більша за відносну жорсткість матеріалу масиву.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Крауч, С. Методы граничных элементов в механике твердого тела [Текст] / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
2. Сулим, Г. Регуляризована тотожність Соміляни для задач теорії пружності з тонкостінними структурами [Текст] / Г. Сулим, Я. Пастернак // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. «Прикладна математика та інформатика». – Вип. 13. – 2007. – С. 142-150.
3. Опанасович, В. К. О двух подходах к исследованию антиплоской деформации изотропного массива с тонким упругим включением [Текст] / В. К. Опанасович // Прикл. математика и механика. – 1988. – Вып. 1. – С. 116-119.
4. Винницька, Л. Напружено-деформований стан пружного тіла з тонким включенням [Текст] / Л. Винницька, Я. Савула // Фіз.-мат. моделювання та інф. технології. – 2008. – № 7. – С. 21-29.
5. Підстригач, Я. С. Умови теплового контакту твердих тіл [Текст] / Я. С. Підстригач // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1963. – № 7. – С. 872-874.
6. Сулим, Г. Т. Основи математичної теорії термopужної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими включеннями [Текст] / Г. Т. Сулим. – Львів: дослідно-видавничий центр НТШ, 2007. – 716 с.
7. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
8. Пастернак, Я. М. Дуальний метод граничних елементів у задачах теорії тонких включень [Текст] / Я. М. Пастернак, Г. Т. Сулим // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці конференції. – Тернопіль, 2009. – С. 137-143.
9. Portela, A. The dual boundary element method: Effective implementation for crack problems [Text] / A. Portela, M. H. Aliabadi, D. P. Rooke // Int. J. Numer. Meth. Engineering. – 1992. – 33. – P. 1269-1287.
10. Тимошенко, С. П. Курс теорії упругості [Текст] / С. П. Тимошенко. – К.: Наук. думка, 1972. – 501 с.

Надійшла до редколегії 22.02.2010.

Прийнята до друку 01.03.2010.

В. Г. ПАСТУШКОВ, Г. П. ПАСТУШКОВ. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь)

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНОГО ОБЩЕСТВЕННО-ТОРГОВОГО ЦЕНТРА С ПАРКИНГОМ В г. МИНСКЕ

У роботі розглянуто деякі особливості проектування і будівництва, експериментально-теоретичних досліджень конструкцій багатофункціонального підземного комплексу – суспільно-торгового центру з паркінгом на площі Незалежності в м. Мінську.

В работе рассмотрены некоторые особенности проектирования и строительства, экспериментально-теоретических исследований конструкций многофункционального подземного комплекса – общественно-торгового центра с паркингом на площади Независимости в г. Минске.

In the article some features of designing and construction, experimental-and-theoretical researches of structures of the multifunctional underground complex (public shopping center with parking on the Independence sq. in Minsk) are considered.

Характерными признаками современных больших городов различных стран мира является стремительный рост населения, развитие транспортных магистралей, энергетики, возрастание экологической опасности. Решение этих проблем привело к усилению роли подземного строительства, увеличению номенклатуры подземных сооружений, определило необходимость в комплексном подходе к освоению подземного пространства.

Комплексная застройка подземного пространства крупных городов позволяет рационально использовать наземную территорию, содействует упорядочению транспортного обслуживания населения и повышению безопасности дорожного движения, снижает уличный шум и загрязнение воздуха выхлопными газами автомобилей, способствует повышению художественно-эстетических качеств городской среды. Подземные сооружения – неотъемлемая часть крупного города. Подземное строительство позволяет высвободить в новых районах значительную часть полезной площади.

На базе разветвленной сети метрополитена образуются важнейшие узлы городской инфраструктуры – метрополитенцентры.

Предполагается, что подземные многофункциональные комплексы должны связать в единую пространственную систему сети метрополитена, транспортных и инженерных тоннелей путем соответствующего размещения вблизи станций метрополитена железнодорожных станций и узлов пересадки и создания на раз-

личной глубине переходов между всеми звеньями системы.

Примером рационального использования подземного пространства является строительство подземного комплекса – общественно-торгового центра с паркингом на площади Независимости в г. Минске [1]. Был выполнен большой объем экспериментально-теоретических исследований при создании конструкции уникального сооружения, не имеющего аналогов в практике строительства подземных сооружений в Республике Беларусь [2].

Подземный многофункциональный комплекс представляет собой пространственное четырехъярусное сооружение с безбалочными железобетонными перекрытиями и покрытием в монолитном исполнении.

Конструкции подземного сооружения выполнены из железобетона с обычной арматурой.

Безбалочное железобетонное монолитное перекрытие представляет собой сплошную плиту толщиной 250 мм из бетона класса В30 (С 25/30), опертую непосредственно на колонны со скрытыми капителями.

Монолитные железобетонные безбалочные покрытия приняты из бетона В45 (С 35/45) толщиной 400 мм.

Класс бетона для колонн принят В45 (С 35/45).

Подземный паркинг представляет собой четырехъярусное сооружение прямоугольной формы в плане, с размерами в плане 91,3×78 м, с высотами ярусов – верхнего 4 м, всех после-

дующих 3,0 м. Сетка колонн в местах установки автомобилей 5,5×6,0 м, в проездах – 7,5×6,0 м.

По контуру сооружения безбалочная плита жестко сопряжена с несущими наружными стенами.

Подземные сооружения, сооружаемые открытым способом, работают, как правило, в режиме заданных нагрузок и отличаются более простой и определенной расчетной схемой.

Расчетная схема подземного сооружения выбрана таким образом, чтобы она в наибольшей степени соответствовала реальным условиям статической работы, отражая конструктивные особенности, материал конструкций, инженерно-геологические условия, а также способ производства работ.

Современные методы расчета позволяют использовать пространственную расчетную схему, хотя трудоемкость таких расчетов существенно возросла.

Расчетная схема сооружения принята в виде плиты на упругом основании с вышерасположенными стенами и перекрытиями. Фундаментная плита моделировалась трех- и четырехугольными плитными конечными элементами на упругом основании, а стены и перекрытия – трех- и четырехугольными конечными элементами оболочки.

Соединение стен с фундаментной плитой и перекрытиями принято жесткое. Упругое основание описывается модулем деформаций грунтов, залегающих в подошве фундаментной плиты.

Для расчета подземного комплекса принята автомобильная нагрузка в виде полос АК14 и специальной четырехосной нагрузки НК112 [3].

Расчет элементов сооружения выполнен с применением ПБК «SCAD Office» (Киев, Украина) (рис. 1) и программы «БЕТА» (ПГУ, Новополоцк, Республика Беларусь).

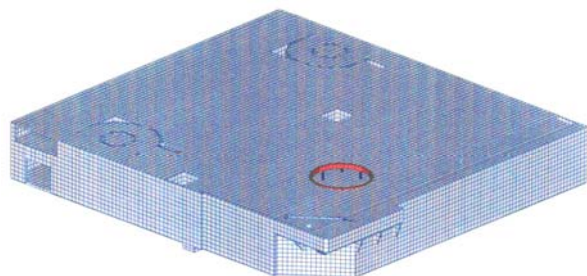


Рис. 1. Расчетная схема блока № 1 (паркинг)

Расчет сечений, нормальных к продольной оси элементов железобетонных конструкций, производился на основе общей деформационной расчетной модели с использованием расчетных диаграмм деформирования материалов, впервые введенной в СНБ 5.03.02-02 [4].

В качестве основной расчетной модели на продавливание принята хорошо зарекомендовавшая себя в проектной практике модель, принятая в СНБ 5.03.02-02.

Принято два конструктивных решения постановки вертикальной рабочей арматуры, пересекающей призму продавливания:

- для фундаментных плит большой толщины (равной 600 мм) в виде постановки рядов вертикальных каркасов;

- для плитных конструкций перекрытий и покрытий небольшой толщины – в виде установки закладных деталей, имеющих повышенную анкеровку вертикальных стержней за счет приваренных металлических пластин по концам.

Проверка правильности установленного рабочего армирования производилась по методу предельного равновесия.

Рабочие чертежи конструкций разработаны проектными институтами ОАО «Минскметрострой» и ОАО «Моноракурс».

Технология опалубочных работ при возведении монолитных железобетонных конструкций разработана институтом «БелНИИС».

Технологические карты на устройство монолитных железобетонных конструкций и на другие технологические процессы разработаны отделом технологического проектирования ОАО «Оргстрой» производственного концерна «Минскстрой».

Испытание фрагментов покрытия на действие монтажных нагрузок проведено НИЛ «Мосты и инженерные сооружения» БНТУ.

Испытание опытных образцов бетона, гидроизоляционных и других материалов проводились испытательной строительной лабораторией ОАО «Минскпромстрой» и контролировались сотрудниками БНТУ (ОНИЛ модифицированного бетона, сотрудниками кафедр «Мосты и тоннели», «Технология строительного производства», НИЛ «Мосты и инженерные сооружения» и др.) в построечных условиях.

Сооружение подземных сооружений – одна из технически сложных и трудоемких отраслей современного строительства, требующая относительно высоких материальных и финансовых затрат.

Для такого крупного подземного сооружения необходим был котлован с весьма значительными размерами сечения (рис. 2). Были применены различные способы крепления стен на отдельных участках котлована.



Рис. 2. Разработка и крепление стен котлована

Принятый при строительстве открытый способ с углубленным котлованом позволил почти все технологические операции выполнять непосредственно с земли с последующей обратной засыпкой готового сооружения. Это позволило исключить специфически трудоемкие процессы, присущие подземному строительству.

Строители имели возможность использовать высокопроизводительные машины и оборудование, применять хорошо зарекомендовавшие в наземном строительстве опалубки типа PERI и бетоноукладочное оборудование (рис. 3, 4).



Рис. 3. Использование опалубки типа PERI

На рис. 5 представлена общая панорама выполняемых работ, которая показывает практически неограниченный фронт работ на строящемся объекте, что позволило существенно повысить темпы строительных работ.

Возводимые железобетонные покрытия бетонируются отдельными сопрягаемыми между собой участками.

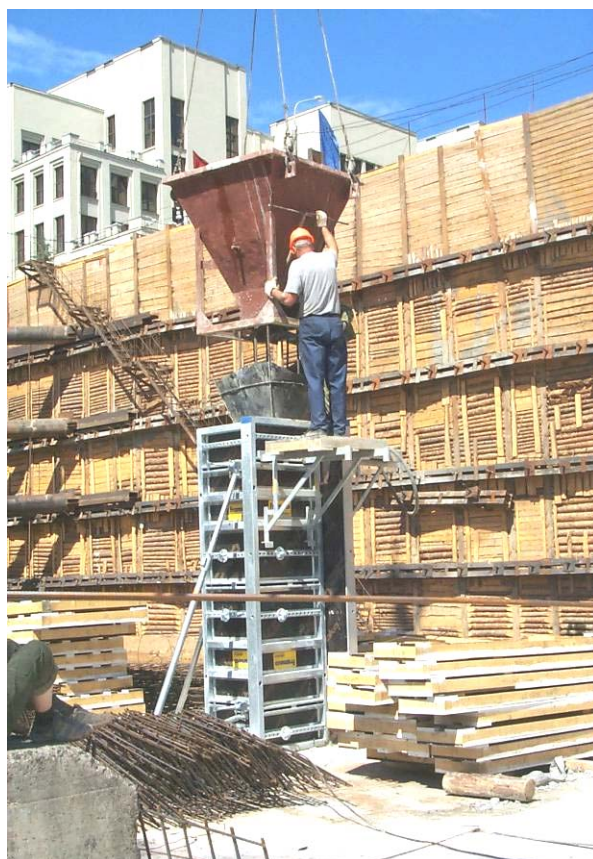


Рис. 4. Применение бетоноукладочного оборудования



Рис. 5. Общая панорама выполняемых работ

В отличие от деформационных швов, в рабочем шве должны быть исключены перемещения стыкуемых поверхностей относительно друг друга. Строго выдерживались рекомендации по величине допустимого интервала перекрытия слоев бетона до образования рабочего шва, т.к. при перерывах в бетонировании качество контактного слоя бетона ухудшается во времени из-за процесса водоотделения и по ряду других причин.

Безбалочные покрытия выполнены бескапитальными и требовали особой тщательности при их выполнении. В первую очередь, это касалось узлового сопряжения покрытия с колоннами. Особое внимание было уделено точной постановке стальных закладных деталей, обеспечивающих несущую способность при продавливании.

Особенности строительства многофункционального комплекса открытым способом позволяют применить замкнутую схему гидроизоляции сооружения (рис. 6). При монолитных конструкциях, гидроизоляцию которых выполняли с наружной стороны, между стенами конструкции и креплением котлована предусмотрено рабочее пространство шириной 1,0 м.



Рис. 6. Устройство гидроизоляции сооружения

Прототипом принятой конструкции гидроизоляции послужило решение, основанное на широком использовании геосинтетиков [5].

В соответствии с ним, конструкция гидроизоляции фундаментной плиты состоит из подкладочного слоя геотекстиля, укладываемого по бетонной подготовке, гидроизолирующей полиэтиленовой HDPE – высокого давления геомембраны и последовательно укладываемых над ней защитных слоев из геотекстиля, полиэтиленовой пленки и армированного слоя бетона толщиной 60 мм. Считается, что подкладочный слой защищает геомембрану от повреждений, служит надежным внешним фильтром для предотвращения развития суффозии в случае отдельных протечек, вызванных не выявленными в процессе строительства повреждениями геомембраны или недостаточно качественной сваркой ее полотен. Однако существует проблема обеспечения надежности гидроизоляции из геосинтетиков даже в странах, где эти материалы применяются давно и широко.

Заслуживает внимания конструктивное решение гидроизоляции из геосинтетиков, разработанная в РФ, особенность которой состоит во введении дополнительного внутреннего страховочного дренажного слоя из полиэтиленовой геосетки, обеспечивающего отвод просачивающегося незначительного объема воды в водосборные приемки системы пожаротушения и за счет собственной прочности которого достигается более надежная защита гидроизолирующей мембраны от различного рода повреждений в процессе строительства.

Для устройства подкладочного слоя использовалось иглопробивное полотно (геотекстиль) с плотностью не ниже 700...800 г/м² с укрепляющей подкладкой.



Рис. 7. Общий вид в стадии завершения строительства

При научном сопровождении проектирования, строительства и наблюдения за поведением конструкций подземного общественно-торгового центра с паркингом на пл. Независимости в г. Минске выполнены следующие работы [2]:

- создание расчетной схемы блоков сооружения;
- уточнение нагрузок, действующих на сооружение;
- уточнение расчета на продавливание;
- выполнение расчета перекрытий по методу предельного равновесия;
- согласование рабочей документации конструкций фундамента и внутренних, и наружных стен, разработанной ОАО «Минск-метропроект»;
- согласование рабочей документации, разработанной ОАО «Моноракурс»;
- анализ результатов наблюдений за проведением строительно-монтажных работ в со-

ответствии с Технологическими картами, разработанными ОАО «Оргстрой»;

– разработка возможности работы гусеничного крана на покрытии паркинга для демонтажа башенных кранов;

– исследование поведения конструкций сооружения при действии монтажной нагрузки;

– оценка основных прочностных характеристик бетона и других материалов.

Проведенные натурные экспериментальные исследования работы конструкции монолитного железобетонного безбалочного покрытия при демонтаже башенного крана гусеничным краном РДК25 общим весом 47 т показали надежную работу выполненных монолитных конструкций с небольшими значениями зафиксированных вертикальных прогибов [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подземный паркинг общественно-торгового центра на площади Независимости в Минске:

проектирование и строительство [Текст] / Г. П. Пастушков и др. // Строительная наука и техника. – Мн., 2005. – № 1. – С. 14-20.

2. Научное сопровождение проектирования, строительства и наблюдения за поведением конструкции подземного общественно-торгового центра с паркингом на пл. Независимости в Минске [Текст] : отчет о НИР / БНТУ, ПГУ; науч. рук. Т. М. Пецольд, Г. П. Пастушков. – Мн., 2004 – 2005.

3. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы [Текст] / Минстрой России. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 214 с.

4. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – Мн., 2003. – 140 с.

5. Юркевич, П. Гидроизоляция подземных сооружений с использованием геосинтетиков. Три подхода к обеспечению надежности гидроизоляции [Текст] / П. Юркевич. – М.: ТИМР, 2001. – 73 с.

Поступила в редколлегию 30.03.2010.

Принята к печати 05.04.2010.

В. И. ПЕТРЕНКО (Киевметрострой)

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОАО «КИЕВМЕТРОСТРОЙ» СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В роботі представлено результати широкого впровадження нових технологій і техніки при будівництві Київметробудом складних об'єктів.

В работе представлены результаты широкого внедрения новых технологий и техники при строительстве Киевметростроем сложных объектов.

In the article the results of wide introduction of new technologies and technique in construction of difficult objects by the Kievmetrostroy are presented.

В настоящее время в Украине строятся сложные объекты различного назначения, включая метрополитены, мосты, путепроводы, подземные комплексы и гидроаккумулирующую электростанцию. В связи с этим необходимо применять новую технику и технологии строительства, обеспечивающие высокий уровень эффективности и безопасности работ. Так за последние 2005–2009 гг. ОАО «Киевметрострой», включающее ЗАО «Метрострой», выполнены следующие виды работ:

1. технология «стена в грунте», подразделяемая на а) традиционную монолитную и б) отдельно стоящие секции – так называемые «баретты»;
2. буросекущие, буронабивные и буроинъекционные сваи;
3. анкерное крепление котлованов;
4. бурение скважин с установкой обсадных труб;
5. искусственное понижение уровня грунтовых вод;
6. разработка грунта в котлованах любой сложности;
7. щитовая проходка тоннелей;
8. строительство промышленных зданий и сооружений;
9. строительство многоэтажных жилых домов.

«Киевметрострой» и «Метрострой» способны решать сложные инженерные задачи при строительстве различных сооружений и строят весь комплекс сооружений метрополитена, горные, железнодорожные и специальные тоннели в Украине и ряде государств СНГ.

За последние годы широкое распространение получила эффективная технология строительства станций метрополитенов с приме-

нием специального способа «стена в грунте». При этом ширина стены составляет 620 и 820 мм, глубина – до 35 мм и длина секции («захватки») – 1800...4200 м.

Технология по устройству «стены в грунте» была успешно применена на таких объектах в г. Киеве как НСК «Олимпийский» протяженностью 320 пог. м и при сооружении станций Киевского метрополитена:

- ст. «Бориспольская» – 280 пог. м;
- ст. «Вырлица» – 215 пог. м;
- ст. «Красный хутор» – 230 пог. м;
- ст. «Демеевская» – 350 пог. м;
- ст. «Голосеевская» – 680 пог. м;
- ст. «Васильковская» – 1360 пог. м.

Кроме того, данная технология внедрена:

- при строительстве ТРК «Серебряный бриз» – 515 пог. м;
- при сооружении монтажно-демонтажных камер на технологических участках метрополитена – 250 пог. м;
- при сооружении монтажно-демонтажных камер главного канализационного коллектора – 180 пог. м.

Для выполнения земляных работ широкое распространение получили погрузчики фронтальные типа XG953L (емкость ковша 3,6 м³), ZL-50 (емкость ковша 4,0 м³) и XG916A (емкость ковша 2,4 м³), а также экскаваторы типа KOMATSU PC2102 (емкость ковша 0,25 м³), ISUZU (емкость ковша 0,4 м³), JCB 220 (емкость ковша 0,25 м³), JCB 8080 (емкость ковша 0,2 м³), HYUNDAI R55W-7 (емкость ковша 0,15 м³), KUBOTA KH-151 (емкость ковша 0,125 м³).

Ограждение котлованов выполняется буросекущими сваями, шпунтом Ларсена и двутавровой балкой с деревянной затяжкой.

Для создания свайных фундаментов, укрепления откосов и омоноличивания оснований котлованов применяются буронабивные сваи диаметром 250...600, 700, 800 и 1000 мм и глубиной 35 м, а также буроинъекционные сваи диаметром 620 и 820 мм и глубиной до 20 м.

Крепление стенок котлованов осуществляется с использованием стержневых и прядевых анкеров диаметром до 260 мм и глубиной бурения до 30 м. При этом их несущая способность составляет от 20 до 100 т·с. При строительстве котлованов на ряде станций Киевского метрополитена вместо их крепления растрелами были использованы анкера длиной 24...26 м. Так на станции «Демеевская» было поставлено 320 анкеров, на станции «Голосеевская» – 1080, на станции «Васильковская» – 1540.

Бурение скважин и разработка траншей при применении способа «стена в грунте» выполняются с помощью специальных буровых установок типа Casagrande С6 (микросваи, анкерное крепление и струйное закрепление грунтов), Casagrande В125 (буроинъекционные сваи, «стена в грунте» шириной 620 мм), Casagrande В250 («стена в грунте» шириной 620 и 820 мм), KLEMM 806-3, KLEMM 806-D (анкерное крепление).

Для обеспечения проходки горных выработок в неустойчивых грунтах и повышения несущей способности оснований под фундаментами зданий и сооружений применяется химическое закрепление грунтов. Для этого с помощью иньекторов в грунты производится закачка различных растворов. При необходимости повышения надёжности конструкций подземных сооружений применяется цементация разуплотнений за обделкой. Сооружение буронабивных и буроинъекционных свай предназначено для усиления оснований и фундаментов при необходимости стабилизации незагружающих осадков, а также для усиления фундаментов, кирпичных кладок и контактов фундамента с основанием при реконструкции старых зданий.

Традиционная технология щитовой проходки постоянно совершенствуется, и применяются новые тоннелепроходческие комплексы типа WIRTH TB 8-628-n-ERW с диаметром передовой машины 6,04 м и HERRENKNECHT AG-TBM-6,350 EPB диаметром 6,15 м. С помощью этих комплексов на протяжении 2005 – 2009 гг. сооружено 5,2 км перегонных тоннелей Курневско-Красноармейской линии Киевского метрополитена от ст. «Лыбидська» до ст. «Васильківська».

Важное значение при ремонте, реконструкции и усилении фундаментов существующих зданий имеет выбор эффективной технологии и техники. При этом проведение реставрационных работ по сохранению памятников архитектуры, реконструкции зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки требует применения строительных технологий, не оказывающих негативного влияния на состояние сооружений, усиливаемый фундамент и основание под ним. В этом случае наиболее рациональным способом усиления часто оказывается применение технологий устройства буроинъекционных свай малого диаметра с возможностью иньектирования слабых зон фундаментов или выполнения струйного иньектирования, а при наличии прочных фундаментов – вдавливания свай.

При производстве работ по усилению фундаментов используются малогабаритные высокопроизводительные буровые установки MINIFOR, KLEMM, HAUSHERR. Их технические параметры позволяют производить бурение под любым углом на глубину до 50 м. Кроме того, установки MINIFOR и KLEMM имеют небольшие габаритные размеры, позволяющие проводить работы из подвалов или внутренних помещений зданий.

Для предотвращения развития опасных деформаций зданий и сооружений в определённых условиях технически обоснованным и экономически целесообразным вариантом технического решения является укрепление основания, как традиционными способами (цементация, глинизация, силикатизация и др.), так и способом замены слабого грунта грунтоцементным камнем по технологии струйного иньектирования (Jet Grouting). При этом используется техника позволяет в результате выполнения струйного иньектирования создавать из грунтоцементного камня вертикальные или наклонные экраны из отдельно расположенных или взаимопересекающихся (секущих) свай (колонн) диаметром от 0,5 до 1,2 м на требуемой глубине.

Фирмы ОАО «Киевметрострой» и ЗАО «Метрострой» применяют итальянское оборудование для буроинъекционных свай диаметром от 0,6 до 1,5 м. Скорость выполнения таких свай – до 100 м³ в сутки.

Технология создания буроинъекционных свай заключается в следующем (рис. 1). При этом осуществляется бурение скважин, их обсадка, заполнение бетонной смесью, армирование и последующее извлечение труб. В грунте

не оставляются обсадные трубы, он уплотняется, облегая сваю, и отсутствуют какие-либо возмущающие воздействия в виде ударов и вибрации. При производстве свай осуществляется контроль их целостности и несущей способности.

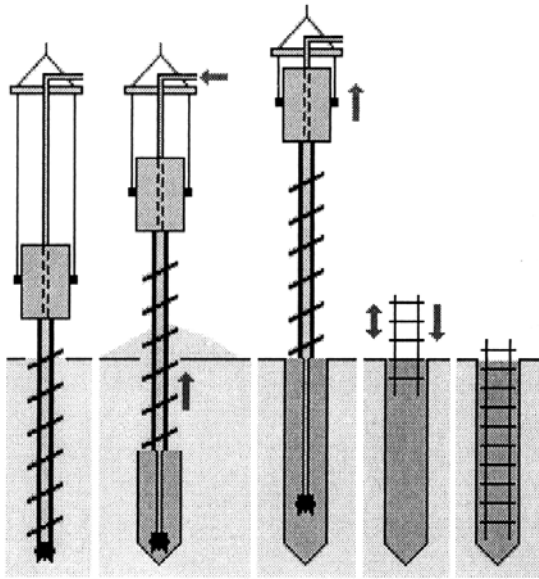


Рис. 1. Этапы технологии создания буринъекционных свай

Технология струйной цементации грунтов (Jet Grouting) появилась одновременно в трёх странах – Японии, Италии и Великобритании. Инженерная идея оказалась настолько плодотворной, что в течение последнего десятилетия технология струйной цементации широко распространилась по всему миру, позволяя не только более эффективно решать традиционные задачи, но и найти новые решения многочисленных сложных проблем в области подземного строительства.

Технология Jet Grouting заключается в использовании кинетической струи цементного раствора, направляемой на разрушение и перемешивание грунта в массиве (рис. 2 и 3).

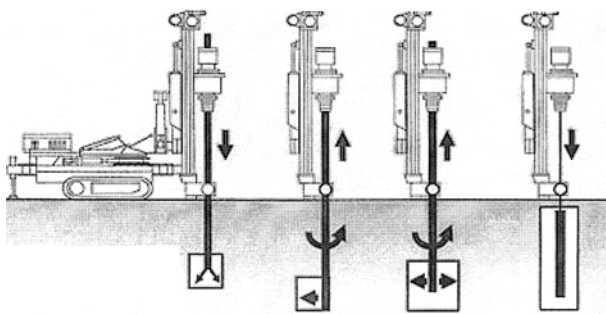


Рис. 2. Схема технологии струйной цементации

На первом этапе специально оборудованной под данную технологию буровой установкой

бурится лидерная (пилотная) скважина диаметром 73...120 мм.

Бурение производится до расчётной глубины, определяемой проектом, с предварительной промывкой водным раствором под давлением, не превышающим 5 МПа.

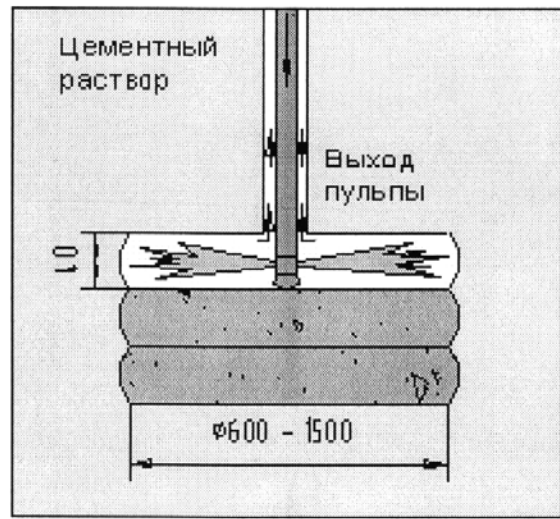


Рис. 3. Схема нагнетания цементного раствора

Вода подаётся непосредственно на режущий инструмент. На следующем этапе насосом высокого давления подаётся водоцементный раствор под давлением 40...50 МПа. Таким высоким давлением перекрывается канал орошения и открываются два отверстия, в которых установлены сопла диаметром 0,8...3,0 мм. При медленном вращении (10...25 об/мин) и медленном подъёме буровой колонны происходит разрезание и перемешивание грунта высокой кинетической энергией струи, которая истекает из вышеуказанных сопел. Изготовленные по этой технологии сваи могут армироваться (рис. 4).

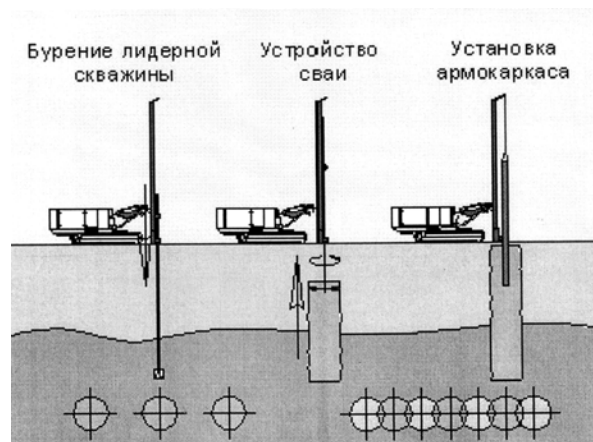


Рис. 4. Порядок армирования свай

По сравнению с традиционными технологиями инъекционного закрепления грунтов,

струйная цементация позволяет укреплять практически весь диапазон грунтов – от гравийных отложений до мелкодисперсных глин и илов. Ориентировочные прочности свай представлены на рис. 5.

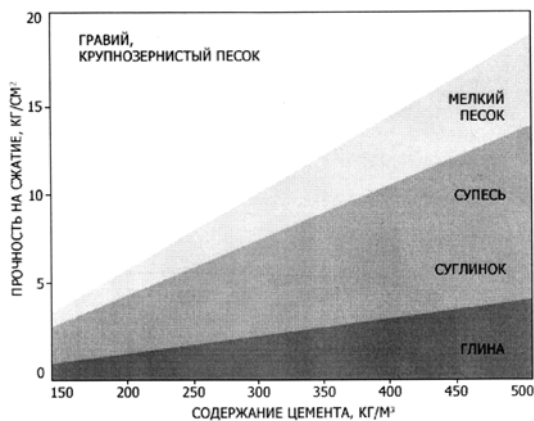


Рис. 5. Зависимость прочности свай на сжатие от содержания цемента в различных грунтах

Другим возможным преимуществом технологии является чрезвычайно высокая предсказуемость результатов укрепления грунтов. Это даёт возможность достаточно точно рассчитать геометрические и прочностные характеристики создаваемой подземной конструкции (свая, участок подпорной стенки, основание котлована строящейся станции и т.д.) и, соответственно, – трудозатраты, материалы и стоимость работ.

Область применения грунтоцементных свай включает в себя следующие практические приложения технологии:

- устройство одиночных свайных фундаментов;
- устройство ленточных фундаментов и сплошных фундаментных плит из взаимопересекающихся грунтоцементных свай;
- сооружение подпорных стен для повышения устойчивости склонов и откосов;
- закрепление слабых и обводненных грунтов вокруг строящихся городских подземных сооружений (колодцев, коллекторов, тоннелей);
- сооружение противодиффузионных завес.

Преимущества данной технологии заключаются в следующем:

- высокая скорость сооружения грунтоцементных свай;
- возможность работы в стеснённых условиях – в подвальных помещениях, вблизи существующих зданий, на откосах и т.д.; в этом случае на объекте устанавливается только ма-

логабаритная буровая установка, а весь инъекционный комплекс располагается на более удобной удалённой площадке;

- отсутствие ударных нагрузок, т.к., в отличие от забивания железобетонных свай, устройство грунтоцементных свай не сопровождается негативным ударным воздействием на фундаменты близко расположенных зданий и сооружений.

Инъекционное закрепление песчаных водонасыщенных грунтов осуществлялось ОАО «Киевметрострой» по трассе строительства перегонных тоннелей от ст. «Харьковская» до ст. «Бориспольская», а также при укреплении слабых грунтов основания котлована ст. «Демеевская» Куреневско-Червоноармейской линии.

Разнообразные варианты строительства объектов различного назначения, в том числе и подземных, требуют создания новых технологий, к числу которых относится технология укрепления оснований грунтовыми анкерами (рис. 6).

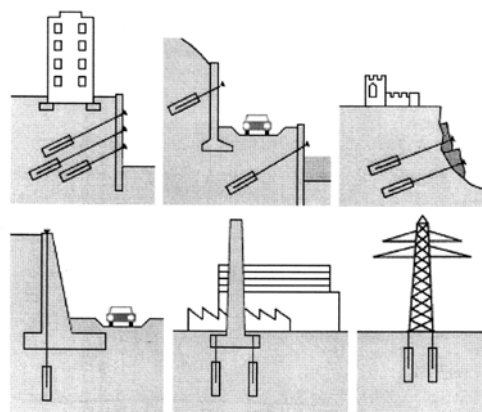


Рис. 6. Некоторые варианты применения анкеров

При этом для восприятия внешних выдёргивающих усилий при возведении различных сооружений и строительных конструкций применяют заглубленные в грунт анкерные устройства, различающиеся по назначению, конструкции, технологии устройства и применяемым материалам. Грунтовые анкера находят широкое применение в тех случаях, когда возникает необходимость в устройстве глубоких котлованов в непосредственной близости от существующих зданий и сооружений и обеспечении устойчивости оползнеопасных склонов, высоких подпорных стен.

В арсенале ОАО «Киевметрострой» имеются различные технологические решения по устройству грунтовых анкеров от буроинъекционных до механических с различными расчётны-

ми нагрузками. В практике выполнения работ ЗАО «Метрострой» широкое распространение получили буроинъекционные грунтовые анкера, изготавливаемые по технологии французской фирмы «Soletanche-Bachy» и выдерживающие нагрузку 70 т·с и более.

Таким образом, в современных условиях созданы и нашли широкое применение в Украине новые технологии и техника, позволяющие решать сложные задачи строительства и реконструкции важных подземных и поверхностных объектов различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петренко, В. И. Строительство подземных сооружений метрополитена на Украине в слож-

ных горнотехнических и гидрогеологических условиях [Текст] / В. И. Петренко // Тр. междунар. конф. «Подземный город: Геотехнология и архитектура» (Санкт-Петербург, 8-10 сентября 1998 г.) – СПб.: Тема, 1998. – С. 308-309.

2. Петренко, В. И. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Д.: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
3. Петренко, В. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкін. – Д.: Наука і освіта, 2005. – 252 с.

Поступила в редколлегию 19.03.2010.

Принята к печати 26.03.2010.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРУ ПІДСИЛЕННЯ НА НДС ЗАЛІЗНИЧНОГО НАСИПУ ПРИ ПІД'ЇЗДІ ДО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ

В роботі представлено результати впливу деформаційних характеристик шару підсилення на напружено-деформований стан залізничного насипу. Порівняльний МСЕ-аналіз дозволив з'ясувати, що такий тип підсилення не має позитивного впливу.

В работе представлены результаты влияния деформационных характеристик слоя усиления на напряженно-деформированное состояние железнодорожной насыпи. Сравнительный МКЭ-анализ позволил выявить, что такой тип усиления не имеет положительного влияния.

In the article the results of influence of deformation descriptions of strengthening layer on the tensed-and-deformed state of railway embankment are presented. The comparative FEM-analysis has allowed finding out that such type of strengthening has no positive effect.

Багаточисленні типи підсилюючих елементів земляного насипу, полотна та основи, які базуються на зміні фізико-механічних властивостей ґрунту, хоча і мають розроблені конструкції, але не мають детальних досліджень їх впливу на напружено-деформований стан (НДС) земляного полотна [1, 2]. Ці дослідження повинні виконуватися для того, щоб з'ясувати, який варіант підсилення є найбільш оптимальним. Ця задача є актуальною з цієї позиції ще й тому, що вплив підсилюючих елементів не є однозначним і відомим.

Розроблені варіанти підсилення конструкції насипу та земляного полотна відрізняються наявністю в його тілі шарів із меншими деформаційними характеристиками. Це дозволяє зменшити вертикальні та горизонтальні переміщення верхньої будови колії (ВБК) і, таким чином, збільшити міжремонтні терміни і подовжити його нормальну експлуатацію.

Але з позиції НДС земляного полотна та насипу вплив цих елементів досліджено недостатньо, оскільки розрахунок неоднорідного насипу із зміною деформаційних характеристик

представляє деякі труднощі математичного характеру.

Для того, щоб науково обґрунтувати варіанти підсилення конструкції земляного полотна, проведено серію їх числових розрахунків з метою з'ясувати варіант із найбільш оптимальними характеристиками та найбільшою стійкістю, міцністю та стабільністю, які пов'язані із загальним напружено-деформованим станом (НДС) залізничного насипу.

Розрахунок НДС конструкцій насипу проводиться із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) за допомогою розрахункового комплексу Structure CAD for Windows, version 7.31 R. 4 (SCAD).

Модель для розрахунку для більшого врахування реальних характеристик об'єкту, що досліджується, прийнята просторовою на основі об'ємних скінченних елементів (СЕ). Всі геометричні та деформаційні характеристики земляного полотна узяті із нормативних документів. На рис. 1 показана розрахункова схема земляного полотна, яка змодельована у комплексі SCAD.

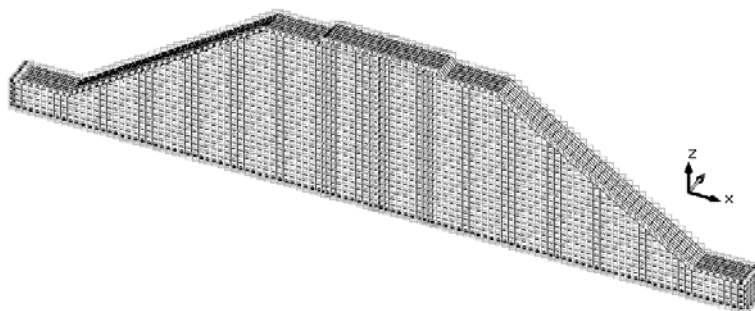


Рис. 1. Розрахункова схема земляного полотна високого насипу

Загальна кількість вузлів схеми – 19940 шт. (біля 60 тисяч ступенів вільності), кількість скінчених елементів – 17073 шт. СЕ у схемі прийняті сумісними, тобто всі вузли сусідніх елементів співпадають, що позитивно впливає на точність рішення. Розміри моделі: довжина (основа) – 55,7 м, ширина – 2,28 м, висота – 12,5 м (з яких висота земполотна – 10 м).

Розміри СЕ коливаються у межах $0,30 \times 0,5 \times 0,25$, $0,35 \times 0,5 \times 0,25$ до $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ м, тобто СЕ-сітка адекватна розмірам представленої моделі, оскільки вважається, що основний розмір СЕ не повинен перевищувати $1/20$ від характерного розміру моделі. У схемі застосовані як призматичні СЕ із трикутною основою (у моделюванні відкосу), так і паралелепіпеди (у моделюванні земполотна та основи). Призматичні СЕ із трикутною основою перевірені на умови вироджених та «голчастих» елементів, кути трикутника не менше 45° [3].

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всім трьом осях X , Y та Z , по боках основи – заборона по осях X та Y , по поперечних сторонах моделі – заборона по осі Y (умова плоскої деформації). Верх та відкоси моделі вільні від граничних умов. Деформаційні характеристики обрані у відповідності із дослідженими грунтами земляного полотна:

Жорсткість 1 – суглинок щільний, питома вага $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 30000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$;

Жорсткість 2 – щебінь, питома вага $\gamma = 23,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 100000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$;

Жорсткість 3 – залізобетонні шпали, питома вага $\gamma = 25,0 \text{ кН/м}^3$, приведений модуль пружності $E = 3,51 \cdot 10^7 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

У ролі навантаження моделі було прийнято локомотивне, тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від локомотиву ($P = 25 \text{ т}$) із урахуванням коефіцієнту динамічності $\mu = 1,25$ (рис. 2).



Рис. 2. Схема поїзного навантаження

На рис. 3 показано розташування навантажень 1-ої схеми на головній площадці насипу. Навантаження на ось локомотиву розподілене по ширині шпали, на яку воно приходиться, причому воно розподілене по 12-ти вузлах СЕ, які входять до геометричного місця розміщення шпали і складає $20,83 \text{ кН}$.

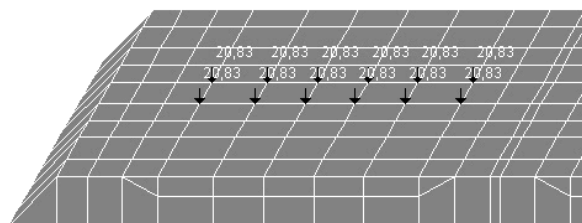


Рис. 3. Розташування навантажень на верхню будову колії (ВБК)

Було прийнято дві схеми завантаження СЕ-моделі:

1 схема – локомотив без додатку власної ваги земляного полотна;

2 схема – навантаження схеми лише власною вагою.

2-а схема навантаження надається для контролю переміщень та напружень в моделі, які викликані власною вагою земполотна, та тих же факторів від поїздного навантаження. Схема завантаження моделі на двох коліях не застосовувалася, оскільки на ділянці, що досліджується, випадків одночасного переміщення двох потягів не відбувається.

Усі геометричні розміри та загальні навантаження на модель зберігаються та контролюються у ході виконання розрахунку, що можливе у застосованому розрахунковому комплексі. Надана розроблена модель приймається як базовий контрольний варіант (Варіант 0), з яким в подальшому порівнюються інші варіанти розрахунків із зміненою конструкцією земляного полотна.

При розрахунку МСЕ застосовувався мультифронтальний метод розкладення матриці жорсткості із автоматичною оптимізацією ширини стрічки, як найбільш прогресивний метод роботи із матрицями, який застосовано у комплексі SCAD.

Результатами розрахунку є загальні переміщення та напруження моделі по осях X та Z , причому нижченаведені результати показують характерну картину їх розподілення у земляному полотні.

На рис. 4 наведені результати розрахунку МСЕ земляного полотна із поїзним навантаженням (Варіант 0).

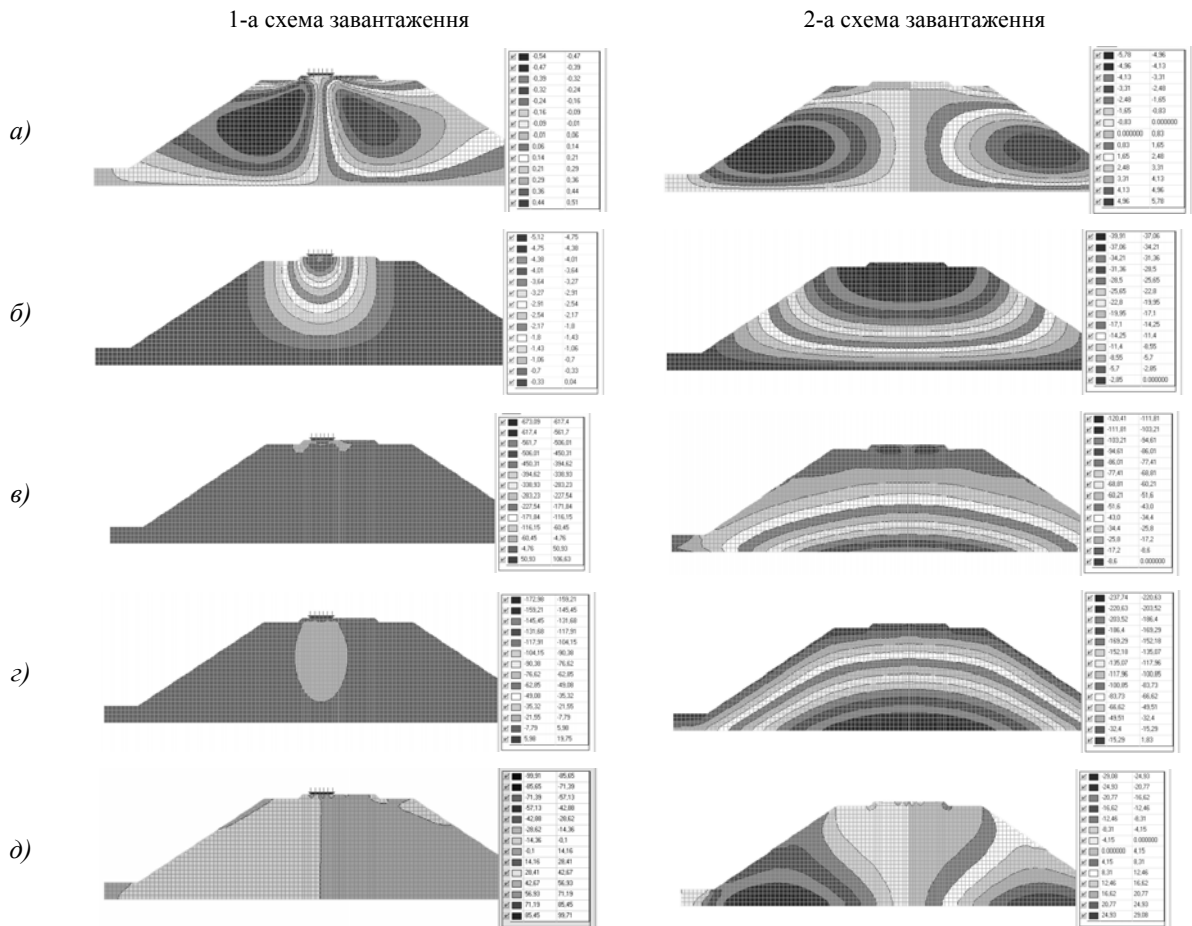


Рис. 4. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 0:

a) – переміщення по осі X (горизонтальна); *б)* – переміщення по осі Z (вертикальна); *в)* – нормальні напруження по осі X (горизонтальна); *з)* – нормальні напруження по осі Z (вертикальна); *д)* – дотичні напруження в площині XZ

В якості першого варіанту для дослідження взято варіант зміни конструкції земляного полотна із розміщенням в ньому шару з більшими деформаційними

характеристиками, наприклад, щебеню із бітумним просочуванням, конструкція земляного полотна показана на рис. 5, *a*.

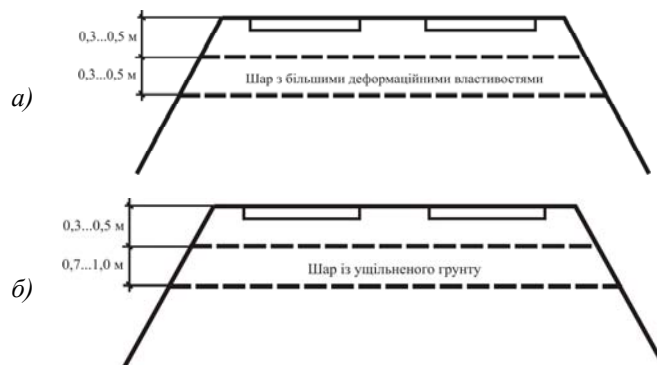


Рис. 5. Схема земляного полотна із шаром із збільшеними деформаційними характеристиками: *a)* – щебень, просочений бітумом; *б)* – шар із збільшеними деформаційними характеристиками

Для дослідження Варіанту 1 базова модель (Варіант 0) була змінена у відповідності до деформаційних властивостей земляного полотна із збільшеними деформаційними властивостями. Відповідно до жорсткостей Варіанту 0 додалася жорсткість 4 – щебень, просочений біту-

мом (товщина шару – 0,5 м): питома вага $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 80000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$. Всі інші характеристики моделі (граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними.

В якості другого варіанту для дослідження узятю варіант зміни конструкції земляного полотна із розміщенням в ньому шару із ущільненого та більш міцного ґрунту з більшими деформаційними характеристиками, конструкція земляного полотна показана на рис. 5, б.

Для дослідження Варіанту 2 базова модель (Варіант 0) була змінена у відповідності до деформаційних властивостей земляного полотна із збільшеними деформаційними властивостями.

Відповідно до жорсткостей Варіанту 0 додалася жорсткість 4 – ущільнений ґрунт (товщина шару – 1 м): питома вага $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$, модуль пружності $E = 40000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$; Всі інші характеристики моделі (граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними. На рис. 6 наведені результати розрахунку моделі Варіанту 2.

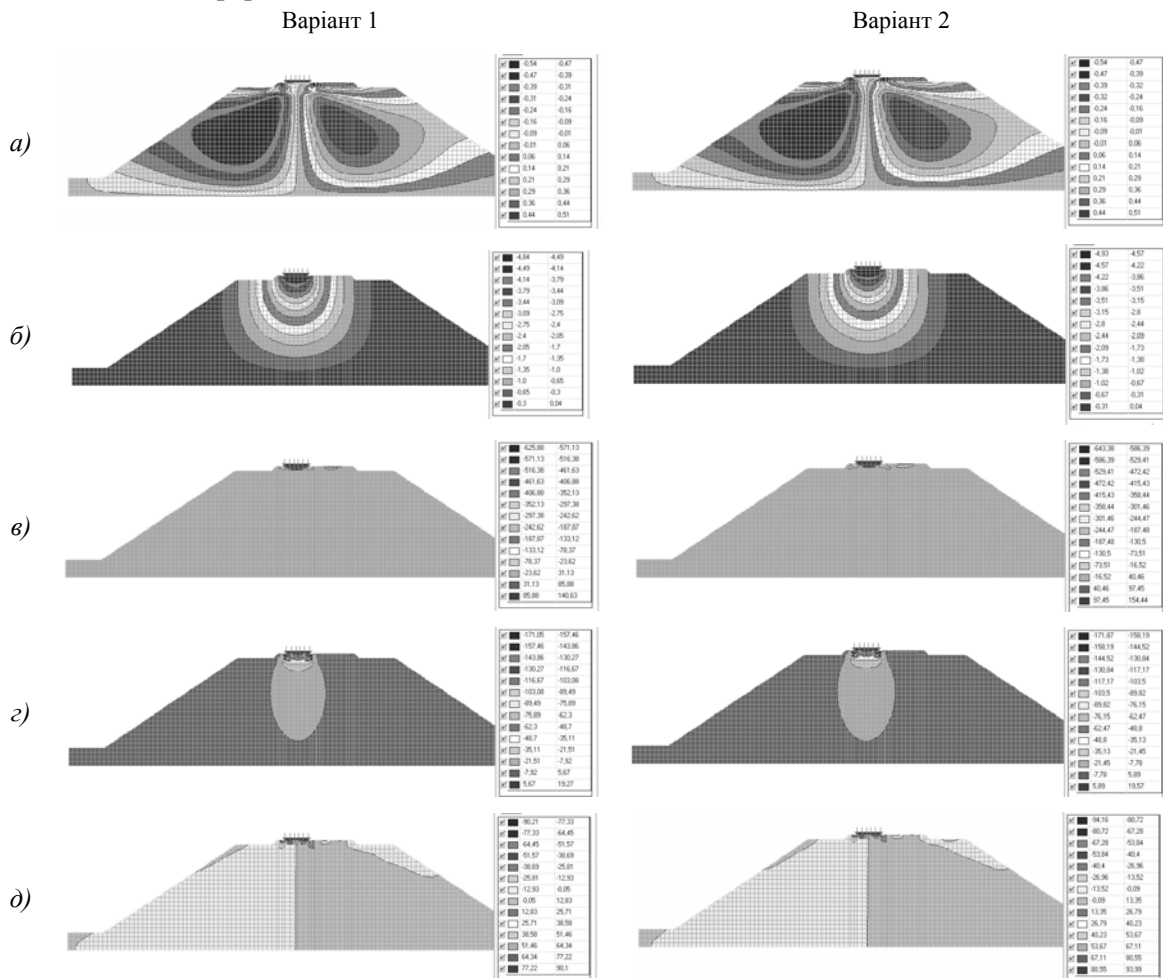


Рис. 6. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень 1-а схема завантаження:

а) – переміщення по осі X (горизонтальна); б) – переміщення по осі Z (вертикальна); в) – нормальні напруження по осі X (горизонтальна); з) – нормальні напруження по осі Z (вертикальна); д) – дотичні напруження в площині XZ

Таким чином, після проведених розрахунків трьох варіантів конструкції насипу, проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану Варіантів 1 і 2 з Варіантом 0, метою якого є з'ясування впливу конструктивних рішень підсилення конструкції земляного полотна на загальну поведінку насипу.

Із проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз НДС насипу з однорідного матеріалу у випадку 2-ої схеми завантаження (власна вага насипу) свідчить про те, що розподіл ізополів та ізоліній переміщень (рис. 4, а і б, 2-а

схема завантаження) і напружень (рис. 4, в-д, 2-а схема завантаження) близький до аналітичного, і це підтверджує вірність розробленої СЕ-моделі та її адекватність аналітичним рішенням. Відповідно до уявлень про деформування шаруватих середовищ із різними за величиною деформаційними характеристиками (зокрема, модулем пружності E), на границі шарів щебеню баластної призми та суглинку тіла насипу відмічаються зони невеликої концентрації напружень та якісної зміни їх ізополів (рис. 4, в, 2-а схема завантаження) – ізополе із значенням напруження – $8,6 \text{ кН/м}^2$ ($0,0086$

МПа) та рис. 4, з, 2-а схема завантаження – викривлення ізополія із значенням напруження – $15,29 \text{ кН/м}^2$ ($0,0153 \text{ МПа}$) на межі розділу шарів щебеню та суглинку). Загальний напружений стан насипу при дії власної ваги позначений невеликим рівнем напружень (максимальні напруження – $0,12 \dots 0,2 \text{ МПа}$ (рис. 4, в, з), а максимальне переміщення верху моделі складає $39,9 \text{ мм}$ (рис. 4, а). Таким чином, аналіз НДС насипу при дії власної ваги свідчить про те, що розроблена модель відповідає вимогам до скінченно-елементних моделей і надає можливість отримання результатів розрахунку достатньої точності.

2. Порівняльний аналіз НДС Варіантів 0 та 1 свідчить про те, що введення в тіло насипу шару з більшими на відміну від матеріалу земляного полотна деформаційними характеристиками змінює картину вертикальних переміщень, дещо їх зменшуючи. Це виходить із аналізу вертикальних переміщень, максимальне значення яких у Варіанті 0 складало $5,12 \text{ мм}$ (рис. 4, б), а у Варіанті 1 – $4,84 \text{ мм}$ (рис. 6, б), тобто зменшення переміщень незначне (в $1,05$ разу), причому горизонтальні переміщення в двох варіантах не змінилися. Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 1, слід відмітити характерне викривлення ізоліній на межі шарів (рис. 6, б) – ізополія під шпалою. Напружений стан Варіанту 1 на відміну від Варіанту 0 дещо покращився: так, горизонтальні напруження дещо зменшилися (з $673,09 \text{ кН/м}^2$ ($0,673 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $625,88 \text{ кН/м}^2$ ($0,625 \text{ МПа}$) у Варіанті 1) та в Варіанті 1 зменшилася площа їх розповсюдження (лише в області баластної призми, рис. 6, в). Також відмічається незначне зменшення вертикальних та дотичних напружень (рис. 6, з, д). Картина розподілу вертикальних напружень якісно майже однакова у двох варіантах (рис. 4 та 6, б), а зменшення напружень незначне ($1,02 \dots 1,05$ разу).

3. Порівняльний аналіз НДС Варіантів 0 та 2 свідчить про те, що введення в тіло насипу шару ущільненого ґрунту змінює картину вертикальних переміщень, також дещо їх зменшуючи, як і у Варіанті 1. Максимальне значення вертикальних переміщень у Варіанті 0 складало $5,12 \text{ мм}$ (рис. 4, б), а у Варіанті 1 – $4,93 \text{ мм}$ (рис. 6, б), тобто зменшення переміщень незначне, горизонтальні переміщення в двох варіантах не змінилися, як і у Варіанті 1. Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 2, також слід відмітити характерне викривлення ізоліній на межі шарів (рис. 6, б). Напружений стан Ва-

ріанту 2 на відміну від Варіанту 0 дещо покращився: так горизонтальні напруження дещо зменшилися (з $673,09 \text{ кН/м}^2$ ($0,673 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $643,38 \text{ кН/м}^2$ ($0,643 \text{ МПа}$) у Варіанті 2) та в Варіанті 2, як і у Варіанті 1, зменшилася площа їх розповсюдження (лише в області баластної призми, рис. 6, в). Також відмічається незначне зменшення вертикальних та дотичних напружень (рис. 6, з, д) в $1,02$ разу в середньому). Картина розподілу вертикальних напружень якісно майже однакова у двох варіантах (рис. 4 та 6, б), а зменшення напружень незначне ($1,01 \dots 1,03$ разу).

Після проведеного порівняльного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена просторова СЕ-модель насипу дозволила провести ряд числових розрахунків, результати яких після порівняльного аналізу дали змогу свідчити про вплив на загальний НДС земляного полотна при зміні конструкції для його підсилення.

2. Порівняльний аналіз варіантів підсилення шляхом розміщення в тілі насипу шарів з більшими на відміну від матеріалу земляного полотна деформаційними характеристиками (Варіант 1) або шару ущільненого ґрунту (Варіант 2) свідчить про те, що така зміна незначно покращує загальний НДС насипу, дещо зменшуючи вертикальні переміщення та компоненти напружень, але це зменшення незначне ($1,02 \dots 1,05$ разу).

3. Аналіз Варіанту 1 свідчить, що його впровадження більш ефективно на відміну від Варіанту 2, оскільки зменшення переміщень та напружень для цього варіанту більше, хоча в абсолютних величинах все ж незначне (максимальне $1,05$ разу).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії [Текст] : ЦЮ 25.12.2008 р., реєстр. номер ЦП-0204 / В. Д. Петренко та ін. – К.: Укрзалізниця. Гол. упр. колійного госп., 2009. – 44 с.
2. Правила і технологія виконання робіт при поточному утриманні залізничної колії [Текст] : ЦП/0084. – К., 2002. – 156 с.
3. SCAD для користувача [Текст] / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.

Надійшла до редколегії 26.02.2010.

Прийнята до друку 03.03.2010.

ОРГАНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА МЕГАПОЛИСОВ

Розглянуто проблему прогнозу тенденцій урбанізації, основних факторів, що впливають на сучасні способи організації освоєння підземного будівництва мегаполісів, при обґрунтуванні області комплексного використання і складу організаційно-технологічних схем освоєння підземного простору.

Рассмотрена проблема прогноза тенденций урбанизации, основных факторов, влияющих на современные способы организации освоения подземного строительства мегаполисов, при обосновании области комплексного использования и состава организационно-технологических схем освоения подземного пространства.

The problem of forecasting the trends of urbanization, the main factors influencing the modern methods of organization of development of the underground construction of mega-cities, during the substantiation of field of integrated use and composition of organizational-and-technological schemes of development of underground space, is considered.

Актуальность проблемы

Освоение подземного пространства мегаполисов стало важнейшей частью нашей цивилизации и культуры. Глубина освоения устойчиво перешагнула отметку 100 м. Крайне усложнились методы организации освоения подземного пространства и способы подземного строительства. Успех строительства подземных сооружений нового поколения зависит уже не только от нетрадиционных проектных решений, но и в значительной степени от технических и организационных возможностей строителей и заказчиков, а также от схем инвестирования строительства и наличия средств.

В данном аспекте большое значение имеет повышение инвестиционной привлекательности подземных объектов. Одним из путей решения этой задачи является комплексное, заранее спланированное освоение подземного пространства, то есть последовательное, рациональное объединение в единую инфраструктуру подземных сооружений различного назначения. Комплексное использование подземного пространства в больших городах позволяет связать сооружения метрополитена с многофункциональными подземными и наземными объектами в единую систему жизнеобеспечения.

В этих условиях важное значение приобретает организация освоения подземного пространства, стремящаяся обобщить огромное количество накопленных фактов и внести вклад в создание общей теории проектирования освоения недр. Научные основы органи-

зации освоения подземного пространства позволяют конструировать современные системы подземных сооружений на основе сочетания новых строительных технологий, планировочных, архитектурных и конструктивных решений и использования свойств массива горных пород, достижений строительной геотехнологии и менеджмента.

Постановка задачи

В связи с поставленной научной проблемой необходимо решить следующие задания:

- систематизировать понятия, подходы и опыт освоения подземного пространства мегаполисов;
- исследовать закономерности и определить порядок освоения недр.

Изложения материала и результаты.

Главная цель подземной урбанистики состоит в обеспечении оптимальных условий труда, быта, отдыха и передвижения городского населения, увеличения площади открытых озелененных пространств на поверхности, формирования здоровой, удобной и эстетически привлекательной городской среды.

Объектами изучения строительной геотехнологии являются подземные сооружения горнодобывающих предприятий и энергетических комплексов, транспортные, гидротехнические, коммунальные тоннели, метрополитены, инженерные сооружения в подземном пространстве городов и другие подземные сооружения различного назначения.

По функциональному назначению подземные объекты (рис. 1) можно разделить на четыре группы:

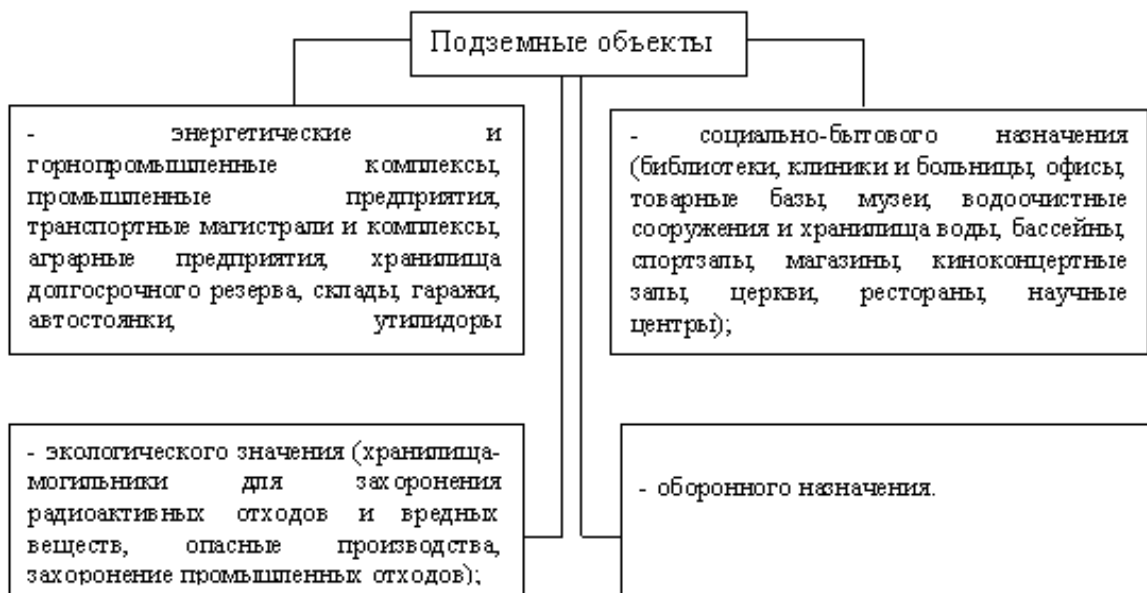


Рис. 1. Подземные объекты по функциональному назначению

Растущий интерес к освоению подземного пространства в значительной мере обусловлен положительными качествами подземных сооружений. Использование подземного пространства для размещения объектов различного назначения, помимо повышения эффективности использования недр и экономии территории, позволяет существенно уменьшить затраты энергии на отопление и охлаждение помещений, сократить эксплуатационные расходы по сравнению с альтернативными объектами на поверхности, резко снизить влияние внешних климатических условий на внутреннюю среду помещений и др. Подземные объекты надежно защищены от прямого воздействия климатических факторов (температурных условий наружного воздуха, солнечной радиации, осадков, ветров, тайфунов, смерчей, экстремальных нагрузок и т.д.). Благодаря теплофизическим свойствам породного массива, в нем с глубиной резко уменьшается амплитуда температурных колебаний наружного воздуха, что обуславливает существенное уменьшение теплопотерь подземных сооружений, а также теплопоступления из окружающей среды. Создаваемые при этом внутренние условия весьма благоприятны для размещения в подземных горных выработках складов продовольствия, винохранилищ, сейфов, кладовых кинофотоматериалов и документов, а также производств, требующих термостатных условий внутренней среды (радиоэлектроника, прецизионное машиностроение и др.). В связи с изоляцией от прямого воздействия климатических факторов умень-

шаются затраты на текущий ремонт и отопление.[1].

Объекты, размещаемые в подземных горных выработках, характеризуются повышенной виброустойчивостью и акустической изоляцией по сравнению с наземными сооружениями. Уникальные акустические характеристики подземных объектов обеспечиваются за счет резкого затухания амплитуды звуковых волн, проходящих через породную толщу. Эти свойства особенно благоприятны для размещения в подземном пространстве объектов, требующих полной акустической изоляции от внешней среды (станции геофизических наблюдений, студии звукозаписи, радио и телевидение, лаборатории и др.). Виброустойчивость подземных сооружений позволяет организовывать в подземных горных выработках производственные процессы, требующие полного отсутствия вибрации несущих и ограждающих конструкций. Высокая способность породного массива защищать от внешних воздействий позволяет широко использовать подземные сооружения для укрытия людей от средств массового поражения и защиты от катастроф и стихийных бедствий. В подземных горных выработках соляных шахт лечат хронический бронхит, астму и другие заболевания людей. В недрах и пещерах размещают театры, церкви и концертные залы, выращивают саженцы деревьев, размещают кафе и рестораны, кинотеатры, гостиницы и т.п.

Расширение практики использования подземного пространства для хозяйственных целей в значительной мере связано с процессом урба-

низации, защитой окружающей среды от отрицательных воздействий транспортных инженерных систем и потенциально опасных производств, а также с целью сохранения энергии и захоронения вредных отходов ряда отраслей промышленности.

Особого внимания заслуживают подземные объекты для целей водоснабжения, хранения нефти, нефтепродуктов и различных видов горючего газа.

В современных условиях перспективным является строительство подземных атомных электрических станций как одного из направлений развития энергетики и обеспечения безопасности ядерной энергии.

О перспективности размещения в подземном пространстве объектов энергетики (тепловых, атомных, гидро- и пневмоаккумулирующих электростанций) свидетельствует уже то, что такие их структурно-технологические элементы, как шлакоотстойники, системы очистки и переработки газопылевых и водных отходов, гидро- и пневмоаккумуляторы, можно разместить в подземном пространстве так же, как и аналогичные элементы вредных производств и объектов нефтехимической промышленности. Размещение под землей энергетических блоков АЭС и ТЭС (реакторов, котлов и т.д.) с позиций охраны окружающей среды вполне целесообразно, а по инженерно-геологическим и геомеханическим условиям возможно даже в массивах менее прочных, чем массивы гранитов или базальтов.

Во многих странах интенсивно развиваются прогрессивные направления подземного строительства. Так, например, подземные железные дороги, подземные скоростные трамваи и метрополитены позволяют уменьшить последствия перенаселенности больших городов, высвободить площади для жилой застройки на поверхности земли и пропустить большие грузопотоки людей. Глубокие подземные тоннели инженерных систем больших городов позволяют использовать их для многоцелевого использования (канализации, водопровода, ливневых вод, транспорта) и на этой основе обеспечить современную систему жизнеобеспечения при освоении подземного пространства городов.

Крупнейшие подземные станции по очистке сточных вод, расположенные в Стокгольме и Хельсинки, позволяют осуществить централизованно сбор, очистку и контроль вредных выбросов и сохранить исторические ландшафты. Дорожные тоннели на магистральных автодорогах и в городах позволяют сохранить жилые

массивы, ликвидировать транспортные заторы и могут служить убежищем для укрытия населения на военный период.

Построены подземные транспортные тоннели под акваториями, крупнейший из них – комплекс подземных тоннелей под проливом Ла-Манш; проектируются комплексы под Беринговым и Гибралтарским проливами.

Подземное хранение продуктов питания в подземных хранилищах и холодильниках широко применяется во многих странах. Подземные хранилища средней и малой емкости целесообразно размещать для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции во всех регионах Украины.

Заслуживают внимания также подземные сооружения для хранения питьевой воды и аккумуляции воды, нагреваемой в солнечных установках на поверхности Земли.

Эффективность использования подземного пространства с точки зрения экономии энергозатрат подтверждается данными, приводимыми западными учеными. Приводя цифры огромных затрат на отопление современных высотных зданий они, например, отмечают, что 25...30 % всей энергии, потребляемой в Канаде, расходуется на отопление и охлаждение зданий. В то же время на подземных объектах энергетические затраты на 80...90 % ниже, чем на наземных. Экономия за счет этого фактора составляет от 6 до 12 долл./м². На завод точного приборостроения в г. Канзас-Сити после перевода его в горные выработки потребность в энергии на отопление снизилась в 3 раза, а на охлаждение – в 10 раз. Весьма близкие расчеты сделаны и европейскими специалистами.

По данным норвежских специалистов, максимальные значения установленной мощности в подземном спортивном зале и подземном плавательном бассейне, сооруженных в скальном массиве, составили 61 и 44 % от наземного, а расход энергии за год – 70 и 44 %. Экономия теплоэнергии на существующих подземных объектах в Финляндии составляет 74 % в холодильниках, 20 % в спортивных бассейнах, 31 % в спортивных залах. Потребление теплоэнергии в подземных складах и хранилищах более чем на 32 % ниже, чем в соответствующих наземных сооружениях.

Основой освоения подземного пространства является принцип использования недр и их сохранения как видоизменяемого ресурса. Этот принцип предполагает, что извлечение того или иного ресурса недр необходимо планировать с учетом возможности создания условий возник-

новения иных ресурсов, использование которых позволит не только компенсировать первоначальные затраты, но и получить дополнительный хозяйственный, экономический или социальный эффект [2].

В связи с этим параметры проектируемых объектов, технологий их строительства и эксплуатации выбираются с учетом этого принци-

па при обеспечении экологического равновесия окружающей среды.

Для того чтобы рационально решать поставленную задачу необходимо использовать такой подход, который позволяет полнее и многограннее обосновать приоритеты в освоении подземного пространства (табл. 1).

Таблица 1

Структура последовательности комплексного освоения недр

| № п/п | Раздел | Пути решения |
|-------|---|--|
| 1 | Тенденции урбанизации | исследования в области изучения тенденций изменения численности населения в городах, рост энергопотребления, усложнения инфраструктуры |
| 2 | Проектирование подземных сооружений | исследования и обоснование социально-экономической целесообразности, технической возможности и экологической безопасности строительства подземных сооружений, его формы и размеров, в зависимости от функционального назначения, горно-геологических условий строительства, технологии строительных работ и т.п.; горно-геологических условий строительства, технологии строительных работ и т.п.; стратегию и методы освоения природных и техногенных подземных пространств, стратегию и методы освоения природных и техногенных подземных пространств |
| 3 | Механика подземных сооружений | оценка устойчивости подземных сооружений, исследование процессов взаимодействия инженерных конструкций с породными массивами и установление качественных и количественных характеристик их напряженно-деформированного состояния, изучение закономерностей формирования нагрузок с учетом влияния горного и гидростатического давления, сейсмического и геодинамического воздействия, температуры окружающей среды, влияния технологии ведения горно-строительных работ и т.п., обоснование новых материалов, рациональных типов и конструкций крепей и обделок, разработка новых методов расчета инженерных конструкций (крепи, обделки, породные конструкции, армирование), оценка их прочности, устойчивости и долговечности |
| 4 | Обоснование технологии строительства, реконструкции и восстановления подземных горных выработок | исследования взаимосвязей элементов технологии горно-строительных работ, установление качественных и количественных параметров, определяющих выбор способов, техники и технологии строительства с учетом влияния природных и техногенных факторов на ее технико-экономические показатели, методов организации и управления работами по строительству одиночных горных выработок, комплексов подземных сооружений обычными и специальными способами, а также горнотехнических зданий и сооружений на поверхности; исследования и обоснование схем и способов технологии ремонта, реконструкции и восстановления подземных сооружений с целью увеличения срока их службы или повторного использования с новым функциональным назначением |
| 5 | Управление состоянием породного массива | исследования и обоснование способов и технологических параметров процессов замораживания, химического укрепления, тампонажа, водопонижения, осушения, разупрочнения пород и др., при строительстве, реконструкции и восстановлении подземных сооружений в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях |

Из таблицы становится понятным, что успешное освоение подземного пространства предполагает использование системных представлений о взаимосвязанности природных и техногенных процессов, динамических харак-

теристик геологических структур земли, закономерностях проявлений различных физических полей, достижениях в технологиях подземного строительства и т. п.

Выводы

Освоение подземного пространства стало условием жизни и развития городов. Наивысшие достижения архитектуры в освоении подземного пространства воплощены в подземных сооружениях нового поколения, в том числе в многоуровневых и многофункциональных комплексах.

Комплексное освоение подземного пространства крупных городов осуществляется на основе применения различных архитектурных, объемно-планировочных и конструктивных решений и позволяет рационально использовать наземную территорию, содействует упорядочению транспортного обслуживания населения и повышению безопасности дорожного движения, снижает уличный шум и загрязнение воз-

духа, способствует повышению уровня жизни людей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пустовойтенко, В. П. Геотехнічне забезпечення підземного будівництва в Україні [Текст] / В. П. Пустовойтенко. – К., 1999. – 257 с.
2. Шашенко, А. Н. Расчет несущих элементов подземных сооружений [Текст] / А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко. – К.: Наук. думка, 2001. – 167 с.
3. Организация освоения подземного пространства. Сверхшения и надежды [Текст] : учеб. пособие / А. Н. Левченко и др.; под ред. акад. АГН Е. В. Петренко. – М.: Высш. шк., 2002. – 403 с.

Поступила в редколлегию 16.03.2010.

Принята к печати 22.03.2010.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ К ДИНАМИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ СЕТОК И МЕМБРАН

Досліджено можливості застосування скінченних автоматів та асоційованих матриць до розрахунку коливань сіток і мембран з безперервним розподіленням мас та різноманітними граничними умовами.

Исследованы возможности применения конечных автоматов и ассоциированных матриц к расчету колебаний сеток и мембран с непрерывным распределением масс и различными граничными условиями.

The possibilities of application of the terminal automatic devices and associated matrices to modeling the grid and membrane vibrations with continuous mass distribution and different boundary conditions are examined.

Сетка представляется системой пересекающихся стержней (струн) с пренебрежительно малой жесткостью на изгиб и находится в одной плоскости xu под действием равномерного натяжения на контуре [1]. Оси стержней одного направления параллельны между собой и расположены, в общем случае, на различных расстояниях друг от друга. Условия закрепления концевых сечений также могут быть различными. Каждая струна состоит из кусочно-непрерывных участков длиной l_k ($k = 1, 2, \dots, p$), погонной массой μ_k и растянута осевым усилием N_k . Предполагается, что натяжение струн достаточно велико, что позволяет пренебречь его изменениями, вызванными малыми прогибами при колебаниях. В этом случае можно использовать решения для систем пересекающихся балок, полученные автором с помощью графов и автоматов в работе [2].

Предварительно рассматривается структура частотного уравнения для универсальной, по отношению к общей расчетной схеме, типовой j -й подсистемы с различным количеством «входов-выходов», которые характеризуют состояния крайних и промежуточных подсистем. Затем, используя принцип ортогональности, составляется уравнение для всей системы. Так, для изгибных колебаний сетки в направлении оси z уравнение частот имеет вид

$$V(G_{z1}) \prod_{j=2}^{m-2} \Phi_{zj} \tilde{V}(G_{zm-1}) = 0, \quad (1)$$

где $V(G_{z1})$ – одномерная матрица (матрица-строка) с характеристиками стержней первой ($j = 1$) подсистемы; Φ_{zj} – двумерная матрица второго порядка, характеризующая состояния промежуточных подсистем ($j = 2, 3, \dots, m - 2$);

$\tilde{V}(G_{zm-1})$ – матрица-столбец с характеристиками стержней подсистемы $m - 1$.

Для формирования матриц каждой из подсистем удобно пользоваться кодированной ассоциированной матрицей участка струны, которая содержит совокупность значений всех выходов автомата A . Входные последовательности всех значений булевых функций начальных (НП) и конечных (КП) граничных параметров струны могут быть реализованы на множестве $\{0, 1\}$. Поэтому возможные состояния струны, определяемые комбинациями граничных условий из одного фиксированного и произвольного НП, КП (всего 4 состояния), будут характеризоваться частотными определителями из миноров 1-го порядка матрицы влияния начальных параметров B_{ik} [3, 4], построенной по технической теории изгибных колебаний. Располагая элементы матрицы B_{ik} в соответствии с входными параметрами $\{u_z, q_z\}$ и кодами НП/КП, обозначив частотный параметр $\lambda_{zk}^2 = \mu_k \omega_i^2 l_k^2 / N_k$, получим ассоциированную матрицу M_{zk}

$$M_{zk} = \begin{array}{c|cc} & \begin{array}{c} \text{КП} \\ \text{НП} \end{array} & \\ \hline \begin{array}{c} \text{НП} \\ \text{КП} \end{array} & \begin{array}{cc} 01 & 10 \\ \hline \cos \lambda_{zk} & -\frac{\lambda_{zk}}{l_k} \sin \lambda_{zk} \\ \hline l_k \sin \lambda_{zk} & \cos \lambda_{zk} \end{array} \end{array}. \quad (2)$$

Если в k -м сечении струны расположены дискретная упругая опора относительно вертикальных перемещений в плоскости xz жесткостью c_k , а также сосредоточенный груз массой m_k , то выражение для ассоциированной матрицы Y_{zk} примет вид:

$$Y_{zk} = \begin{array}{c|cc} & \text{КП} & \\ \hline \text{НП} & & \\ \hline 10 & \cos \lambda_{zk} + \frac{\tilde{c}_k l_k}{\lambda_{zk}} \sin \lambda_{zk} & -\frac{\lambda_{zk}}{l_k} \sin \lambda_{zk} + \tilde{c}_k \cos \lambda_{zk} \\ \hline 01 & \frac{l_k}{\lambda_{zk}} \sin \lambda_{zk} & \cos \lambda_{zk} \\ \hline \end{array} \quad (3)$$

или в сокращенной форме с учетом принятых ранее обозначений [5]

$$Y_{zk} = M_{zk} + \tilde{c}_k M_{01}^{(1)}, \quad (4)$$

где $\tilde{c}_k = c_k - m_k \omega_i^2$.

Матрицу упругой связи I_{ck} получим из матрицы Y_{zk} , если принять $l_k \rightarrow 0$. Т.к. рассматриваемое сечение находится слева от упругой связи, то матрицу Y_{zk} k -го участка струны с непрерывно-дискретными параметрами можно также представить в следующем виде:

$$I_{ck} = \begin{array}{c|c} 1 & \tilde{c}_k \\ \hline 0 & 1 \end{array}; \quad Y_{zk} = I_{ck} M_{zk}. \quad (5)$$

Рассмотрим простой пример для свободных изгибных колебаний из плоскости xu двух опертых по концам струн постоянного сечения, пересекающихся в центрах пролетов. Используем основные соотношения, полученные в работе [6] для совместных колебаний двумерных стержневых систем. В этом случае $i = j = 1$; $n = m = 2$; $l_{s1} = l_{s2} = l_s$; $\mu_{s1} = \mu_{s2} = \mu_s$; $\lambda_{zs1} = \lambda_{zs2} = \lambda_{zs}$; $s = 1, 2$ для струн, расположенных соответственно вдоль осей x, y .

Следуя [6], данная система представляется в виде связного графа G_z , а также подграфов 1G_z и 2G_z , получающихся в результате рассеивания связей между параметрами u_{z1}, u_{z2} и q_{z1}, q_{z2} . Состояния I, II подграфов ${}^1G_z, {}^2G_z$ показаны на рис. 1, а, б.

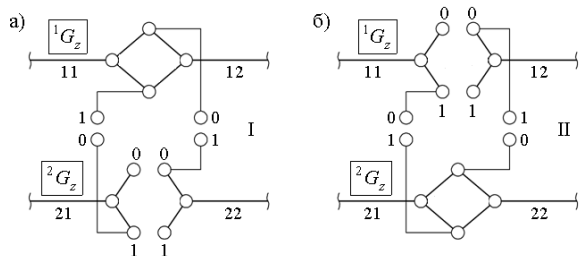


Рис. 1. Состояния подграфов ${}^1G_z, {}^2G_z$

Значения характеристических функций автомата определим с помощью таблицы переходов (табл. 1), в которой сопрягаемые параметры обозначены одинаковыми буквенными символами.

Таблица переходов A_z

| | | s_v | | | | | | | |
|-------|---|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| | | I | | | | II | | | |
| x_v | | 11 | 12 | 21 | 22 | 11 | 12 | 21 | 22 |
| | | НП | К | 0 | a | 0 | 0 | 0 | 0 |
| С | 1 | | b | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | d |
| КП | К | a | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | c | 0 |
| | С | b | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | d | 1 |

Уравнение частот в данном случае представляется в форме ортогональности двух векторов с характеристиками участков 11, 12, 21, 22

$$V({}^1G_z) \tilde{V}({}^2G_z) = 0, \quad (6)$$

где

$$V({}^1G_z) = \|v_{11} v_{12} \quad v'_{11} v'_{12}\|; \quad \tilde{V}({}^2G_z) = \left\| \begin{array}{c} v_{21} v_{22} \\ v'_{21} v'_{22} \end{array} \right\|. \quad (7)$$

Далее, используя алгоритм [6] для нахождения характеристических функций f_z из матрицы M_{zk} (2) в соответствии с кодами НП, КП участков системы для каждого из состояний подграфов ${}^1G_z, {}^2G_z$ (табл. 1), несложно определить значения элементов векторов, входящих в (7). К примеру, для $v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}$ можно записать:

$$v_{11} = \left\| \begin{array}{c} l_1 \sin \lambda_{z1} \\ \lambda_{z1} \cos \lambda_{z1} \end{array} \right\|;$$

$$v_{12} = \left\{ \cos \lambda_{z1} \quad \frac{l_1 \sin \lambda_{z1}}{\lambda_{z1}} \right\};$$

$$v_{21} = v_{22} = \frac{l_2 \sin \lambda_{z2}}{\lambda_{z2}}. \quad (8)$$

Выражения для $v'_{11}, v'_{12}, v'_{21}, v'_{22}$ определяются совершенно аналогично. Подставляя в (7) значения (8), после преобразований приходим к уравнению

$$\operatorname{tg} \lambda_{z1} + \sqrt{\frac{\mu_1 N_2}{\mu_2 N_1}} \operatorname{tg} \lambda_{z2} = 0. \quad (9)$$

Нахождение решений для других сочетаний граничных условий закрепления струн не представляет затруднений и сводится лишь к выборке соответствующих кодам НП и КП участков элементов строк или столбцов матрицы M_{zk} .

Для сетки с бесконечно малыми размерами ячеек, т.е. при $l_1, l_2 \rightarrow 0$ и $n, m \rightarrow \infty$ осуществляется предельный переход к прямоугольной мембране. Наиболее простое решение получаем

ется для мембраны с неподвижным закреплением ее по контуру. Для этого достаточно воспользоваться решением для пересекающихся балок на сплошном упругом основании с учетом действия статических продольных сил в балках обоих направлений [7].

Топологическая модель круговой мембраны с кусочно-непрерывными p участками, в пределах которых интенсивность массы μ_k ($k=1, 2, \dots, p$) считается постоянной, представлена на рис. 2.

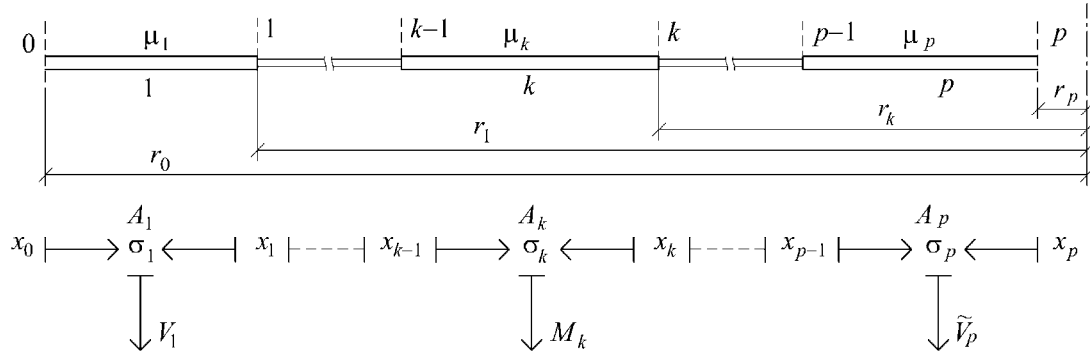


Рис. 2. Топологическая модель круговой мембраны

Воспользуемся переходной матрицей [3], полученной методом начальных параметров для k -го кольцевого участка, ограниченного окружностями с радиусами r_k, r_{k-1} . Соответствующая кодированная ассоциированная матрица R_k может быть представлена в следующей форме

$$R_k = \begin{array}{c|cc} & \begin{array}{c} \text{КП} \\ \text{НП} \end{array} & \begin{array}{c} 01 \\ 10 \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 10 \\ 01 \end{array} & \begin{array}{cc} a_{11} & \alpha \lambda_k a_{12} \\ \frac{1}{\alpha \lambda_k} a_{21} & a_{22} \end{array} & \beta \end{array} \quad (10)$$

где $\lambda_k^2 = \frac{\mu_k \omega^2 r_k^2}{N}$; $\alpha = \frac{N}{r_k}$; $\beta = \frac{\pi \lambda_{k-1}}{2}$.

В состав элементов матрицы R_k входят также цилиндрические функции (функции Бесселя) первого и второго рода $J_n(\lambda), Y_n(\lambda)$ порядка n [3, 8]

$$\left. \begin{array}{l} a_{11} = Y'_n(\lambda_{k-1})J_n(\lambda_k) - J'_n(\lambda_{k-1})Y_n(\lambda_k); \\ a_{12} = J'_n(\lambda_{k-1})Y'_n(\lambda_k) - Y'_n(\lambda_{k-1})J'_n(\lambda_k); \\ a_{21} = Y_n(\lambda_{k-1})J_n(\lambda_k) - J_n(\lambda_{k-1})Y_n(\lambda_k); \\ a_{22} = J_n(\lambda_{k-1})Y'_n(\lambda_k) - Y_n(\lambda_{k-1})J'_n(\lambda_k). \end{array} \right\} \quad (11)$$

Если в k -м круговом сечении мембраны по окружности радиуса r_k расположены упругие опоры жесткостью c_k , а также равномерно распределенная масса интенсивностью m_k , то, как и в предыдущем случае, выражение для ассоциированной матрицы Z_k можно представить в форме:

$$Z_k = R_k + (c_k - m_k \omega_i^2) R_{01}^{(1)}, \quad (12)$$

или, по аналогии с (5), структура матрицы Z_k с учетом матрицы упругой связи I'_k примет вид

$$Z_k = I'_k R_k; \quad I'_k = \begin{vmatrix} 1 & c_k - m_k \omega_i^2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Выражения (10)–(13) дают возможность в простой форме получить уравнения частот для поперечных колебаний мембраны со ступенчатым изменением толщины и плотности, различными граничными условиями, дополнительными упругими связями и сосредоточенными включениями в интенсивность массы.

В результате разбиения множества состояний автомата A на p частей получим набор подмножеств состояний π , характеризуемых матрицами выходов $V_1, R_2, \dots, R_{p-1}, \tilde{V}_p$. В этом случае уравнение частот представляется в ортогональной форме и выражает основную теорему декомпозиции [9] в виде суммы произведений характеристических функций f_{zk} каждого подавтомата A_k при каждом возможном состоянии s_v в момент времени t_v :

$$\prod_{k=1}^p \pi_k = 0; \quad \sum_{v=1}^s \left(\prod_{k=1}^p f_{zk} \right) = 0. \quad (14)$$

Для регулярных и квазирегулярных систем уравнение частот преобразуется к виду:

$$V_1 R_k^{p-2} \tilde{V}_p = 0, \quad (15)$$

где векторы V_1 и \tilde{V}_p характеризуют условия закрепления мембраны по ее внутреннему и наружному контурам и соответствуют строкам или столбцам матрицы (10).

Для описания колебаний регулярных сеток и мембран следует использовать эквивалентные автоматы, а также их минимальные (сокращенные) формы [10], что упрощает расчет, делая его также минимальным.

Топологическая модель системы для определения форм собственных колебаний по сравнению с моделью, принятой для построения частотных уравнений, остается без изменений. Решение включает обращение матриц, в которых исключены одна строка и один столбец, при условии, что одна из искомым компонент вектора НП принимается равной единице. Это дает значительную экономию времени по нахождению остальных $n-1$ неизвестных начальных параметров и позволяет выполнять решение задачи о формах собственных колебаний по принципу алгоритма на основе представлений системы в виде графов и автоматов.

Для расчета установившихся вынужденных колебаний сеток и мембран возможно также использовать топологическую информацию о системе и соответствующие методы конечно-автоматного моделирования [11]. Графы, изоморфные данной системе, совершающей свободные и вынужденные колебания, будут идентичны. Вершины, которые представляли бы прилагаемые нагрузки, не связаны с топологической структурой графа и в самом графе не отражены. Различными являются лишь состояния граничных параметров и топологические коды графа G . Решение задачи Коши дополняется вектором P_k внешнего гармонического возмущения.

Совокупность значений всех выходов z_v автомата A определяется выходами его подавтоматов, представленными ассоциированными матрицами $V_1, M_2, \dots, M_{p-1}, \tilde{V}_p$, описывающими свободные колебания системы, и ассоциированными матрицами $W_1, T_2, \dots, T_{p-1}, \tilde{W}_p$, учитывающими воздействие внешних сил. Неизвестные начальные параметры x_k вычисляются по правилу Крамера в виде отношения определителей D_{zk} и D_z , равных последовательному произведению соответствующих ассоциированных матриц каждого из p участков системы

$$x_k = \frac{D_{zk}}{D_z}; \quad D_{zk} = W_1 \prod_{k=2}^{p-1} T_k \tilde{W}_p;$$

$$D_z = V_1 \prod_{k=2}^{p-1} M_k \tilde{V}_p. \quad (16)$$

Алгоритм динамического расчета сеток и мембран при гармоническом возбуждении колебаний включает этапы декомпозиции систе-

мы на подсистемы, построения графа системы с отнесением вершин к зависимым, независимым и нулевым граничным параметрам, составления таблицы переходов состояний конечного автомата, определения функций предикатов, формирования матричного выражения определителей D_z и D_{zk} , нахождения неизвестных начальных параметров подсистем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет сооружений на импульсные воздействия [Текст] / под ред. И. М. Рабиновича. - М.: Стройиздат, 1970. - 304 с.
2. Распопов, А. С. Расчет многокомпонентных стержневых систем методом декомпозиции [Текст] / А. С. Распопов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2008. - Вип. 25. - Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. - С. 105-109.
3. Ивович, В. А. Переходные матрицы в динамике упругих систем [Текст] : справочник / В. А. Ивович. - М.: Машиностроение, 1981. - 183 с.
4. Распопов, А. С. Конечно-автоматное моделирование пространственных колебаний стержневых и балочных конструкций [Текст] / А. С. Распопов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2007. - Вип. 19. - Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. - С. 125-133.
5. Распопов, А. С. Колебания регулярных балочных конструкций с непрерывно-дискретными параметрами [Текст] / А. С. Распопов, О. О. Рубан, С. А. Чернышенко // Техн. механіка. - 2008. - № 1. - С. 131-139.
6. Распопов, А. С. Применение топологических методов к расчету пространственных колебаний двух- и трехмерных стержневых систем [Текст] / А. С. Распопов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - 2008. - Вип. 22. - Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. - С. 117-124.
7. Распопов, А. С. К расчету поперечных колебаний пересекающихся балок с распределенными параметрами [Текст] / А. С. Распопов // Вопр. динамики мостов и теор. колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТа. - 1993. - С. 90-94.
8. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. - 720 с.
9. Кунцманн, Й. Булева алгебра и конечные автоматы [Текст] / Й. Кунцманн, П. Наслин. - М.: Мир, 1969. - 294 с.
10. Гилл, А. Введение в теорию конечных автоматов [Текст] / А. Гилл. - М.: Наука, 1966. - 272 с.
11. Распопов, О. С. Особливості моделювання вимушених коливань нерозрізних конструкцій в системі скінченних автоматів [Текст] / О. С. Распопов // Дороги і мости : зб. наук. пр. - К.: ДерждорНДІ. - 2008. - Вип. 8. - С. 229-236.

Поступила в редколлегию 19.01.2010.
Принята к печати 22.01.2010.

Н. В. САВИЦКИЙ, О. Г. ЗИНКЕВИЧ (ПГАСА, Днепропетровск),
А. Н. ЗИНКЕВИЧ (ДИИТ)

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ОБШИВКИ НА РАСЧЕТНУЮ ДЛИНУ СЖАТОЙ СТОЙКИ КАРКАСА ИЗ ЛСТК МЕЖДУ УЗЛАМИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Розглянуто вплив жорсткості обшивки каркасу з легких сталевих конструкцій на розрахункову довжину елементів між вузлами закріплення при розрахунку стійкості в площині меншої жорсткості.

Рассмотрено влияние жесткости обшивки каркаса из легких стальных конструкций на расчетную длину элементов между узлами закрепления при расчете на устойчивость в плоскости меньшей жесткости.

The sheathing stiffness of lightweight cold-formed steel framing influence for stud elements buckling checked in the weak-axis between fasteners is considered.

Введение

В настоящее время для возведения малоэтажных зданий и надстройки существующих зданий при их реконструкции все большее применение находят каркасные технологии, в частности каркасы, выполненные из тонкостенных стальных профилей. Преимущество такой технологии – малый собственный вес конструкций и высокие темпы монтажа.

Расчет сжатых элементов каркасов из легких стальных конструкций (ЛСТК) на устойчивость может производиться без учета раскрепления обшивкой и с учетом работы листов обшивки, обеспечивающих поддержку стойки в узлах соединения при потере устойчивости в плоскости меньшей жесткости. Учет участия обшивки в работе стойки приводит к усложнению расчета, но в тоже время, позволяет более рационально использовать сечения элементов.

Постановка проблемы

В [1] учет жесткости листов обшивки производится при расчете на общую устойчивость сжатой стойки стены в плоскости меньшей жесткости совместно с вовлеченной полосой листа обшивки (рис. 1). В то же время, жесткость обшивки не учитывается при расчете на устойчивость стойки в плоскости меньшей жесткости между узлами крепления к листам обшивки. Расчетная длина элемента принимается равной двум расстояниям между узлами крепления, учитывая возможность отказа одного промежуточного крепления.

Поскольку некоторые материалы, применяемые в качестве обшивок для каркасов из ЛСТК, имеют относительно малую жесткость,

необходимо рассмотреть влияние узлов крепления стойки как упругих опор с определенной жесткостью на расчетную длину элементов.

Цель работы

Цель данной работы заключалась в оценке влияния податливости узлов крепления сжатых стоек каркаса к листам обшивки на расчетную длину элементов между узлами крепления при расчете на устойчивость в плоскости меньшей жесткости. На первом этапе выполнялась оценка податливости связей – жесткости упругих опор, далее определялись коэффициенты расчетной длины.

В данной работе рассмотрена стойка каркаса из холодногнутого профиля [2], обшитого листами гипсокартона (ГКЛ) или ориентированной стружечной плитой (ОСП). Шаг узлов крепления принят 300 мм, шаг стоек 600 мм. Как и в [1] учтен отказ одного промежуточного крепления – рассматривается фрагмент стойки длиной 600 мм (рис. 1).

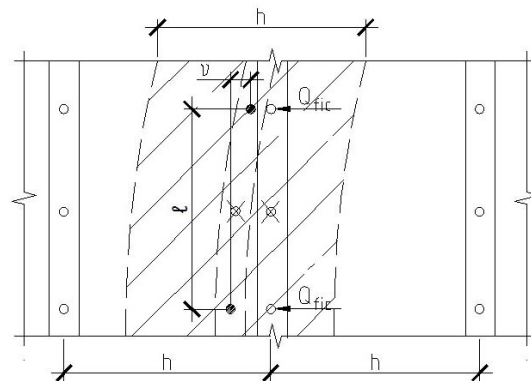


Рис. 1. Рассматриваемый фрагмент стойки каркаса

Оценка податливости связей

Расчетная оценка жесткости упругой опоры производилась по величине относительного смещения v фрагмента листа обшивки между рассматриваемыми узлами крепления при воздействии условной поперечной силы (рис. 1). Высота фрагмента листа, включаемого в работу элемента каркаса, принимается равной шагу фахверковых элементов [1].

Смещение v , вызываемое касательными напряжениями, для включенного участка обшивки определяется как для пластины согласно [3]:

$$\frac{v}{\ell} = \frac{\chi Q}{GA}, \quad (1)$$

где v – относительное перемещение между рассматриваемыми сечениями под действием касательных напряжений, расположенными на расстоянии ℓ ; χ – коэффициент распределения сдвига, для прямоугольного сечения принимается $\chi = 1,2$; Q – значение поперечной силы; G – сдвиговая жесткость материала; A – площадь сечения, воспринимающего касательные напряжения.

Из (1) жесткость упругой опоры для сжатого стержня, соединенного с листами обшивки, можно выразить, приравняв величину смещения между соседними упругими опорами к единичной $v = 1$ (мм, см).

Отсюда, находится жесткость упругой опоры (кН/см):

$$v = \frac{Q}{v} = \frac{GA}{\chi \ell}, \quad (2)$$

где v – единичное линейное перемещение упругой опоры.

Приведенная расчетная оценка жесткости упругой опоры не учитывает влияния на податливость узла местных деформаций полки профиля стойки, соединительного элемента (винта) и местного смятия материала обшивки. Для сопоставления в табл. 1 приведены результаты экспериментального определения жесткости упругих опор [4].

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных оценки жесткости упругих опор (узлов соединения стойки с листами обшивки) показывает, что преобладающее влияние на податливость узла имеют местные деформации полки профиля стойки, соединительного элемента (винта) и местное смятие

материала обшивки сравнительно с деформациями сдвига материала листа обшивки.

Таблица 1

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных оценки жесткости упругих опор для сжатой стойки

| Материал листа обшивки | Толщина листа, мм | Диаметр винта, мм | Жесткость упругой опоры v (k^*), кН/см (для одного листа) | |
|------------------------|-------------------|-------------------|---|--------------------------------|
| | | | расчетная оценка | экспериментальные данные [4]** |
| гипсокартон | 9,5 | 3,51 (№ 6) | 60 | 1,36...2,66 |
| | 12,5 | 3,51 (№ 6) | 80 | 1,49...4,54 |
| | 16 | 3,51 (№ 6) | 106,7 | 1,7...5,57 |
| | 12,5 | 4,17 (№ 8) | 80 | 1,97...10,03 |
| ОСП | 9 | 4,17 (№ 8) | 37,5 | 4,1...12,69 |

Примечания: * в [4] жесткость упругой опоры обозначена k .

** диапазон изменения величин жесткости упругой опоры, приведенных в [4].

Исходя из приведенных в табл. 1 данных, расчетная длина элемента между узлами соединения при расчете на устойчивость в плоскости меньшей жесткости должна определяться с учетом значений жесткости упругих опор, определенных экспериментально.

Определение коэффициента расчетной длины

Задача определения коэффициента свободной длины для неразрезного сжатого стержня на упругих опорах рассмотрена в [5]. Расчетная схема стержня приведена на рис. 2.

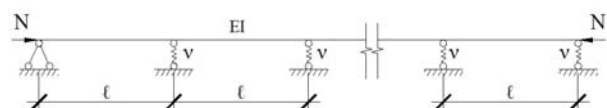


Рис. 2. Расчетная схема сжатого стержня на упругих опорах

Расчетная длина сжатого элемента l_{ef} связана с его геометрической длиной l зависимостью

$$l_{ef} = \mu l, \quad (3)$$

где μ – коэффициент расчетной (свободной) длины элемента.

Значение коэффициента расчетной длины μ устанавливается с учетом коэффициента жесткости m , который для данной задачи определяется

$$m = \frac{v\ell^3}{EI}, \quad (4)$$

где v – усилие, соответствующее единичному линейному перемещению упругой опоры, кН/см; ℓ – расстояние между упругими опорами (узлами крепления); EI – изгибная жесткость элемента.

Зависимость коэффициента расчетной длины μ от коэффициента жесткости m для рассматриваемой расчетной схемы приведена на рис. 3.

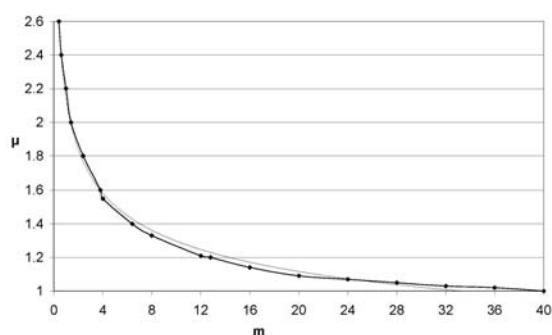


Рис. 3. Зависимость коэффициента расчетной длины μ от коэффициента жесткости m для неразрезного сжатого стержня на упругих опорах [5]

Значение коэффициента жесткости m ограничивается предельным m_0 , и в случае $m \geq m_0$ коэффициент расчетной длины принимается $\mu = 1$.

Результаты определения коэффициента расчетной длины для фрагмента стержня между узлами крепления к листам обшивки при расчете на устойчивость в плоскости меньшей жесткости приведены в табл. 2.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов расчетных длин, рассчитанные с учетом минимальных значений жесткостей упругих опор из диапазона экспериментальных данных [4], представленных в табл. 1.

Коэффициенты расчетной длины

| Профиль | Коэффициент расчетной длины μ при характеристиках обшивки и диаметре соединяющих винтов | | | | |
|-------------|---|-----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|
| | ГКЛ 9,5мм Ø3,51мм | ГКЛ 12,5мм Ø3,51мм | ГКЛ 16мм Ø3,51мм | ГКЛ 12,5мм Ø4,17мм | ОСП 9мм Ø4,17мм |
| КСЦ 90-0.8 | 1,21 | 1,187 | 1,153 | 1,117 | 1 |
| КСЦ 90-1.2 | 1,37 | 1,342 | 1,305 | 1,264 | 1,08 |
| КСЦ 140-0.8 | 1,24 | 1,215 | 1,181 | 1,144 | 1 |
| КСЦ 140-1.2 | 1,375 | 1,35 | 1,31 | 1,269 | 1,08 |

Выводы

1. При расчете сжатых элементов каркасов из ЛСТК на устойчивость между узлами крепления с листами обшивки в плоскости меньшей жесткости необходимо учитывать податливость связей, которая может иметь значительное влияние на расчетную длину элемента.

2. Расчетная длина элемента между узлами соединения с обшивкой должна определяться с учетом значений жесткости упругих опор, определенных экспериментально, учитывающих влияние на податливость узла местных деформаций полки профиля, соединительного элемента (винта), местного смятия материала обшивки и деформаций сдвига материала листа обшивки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yu, W. W. Cold-form steel design [Текст]. – 3rd ed. / W. W. Yu. – 2000. – 767 p.
2. Испытание металлических профилей фирмы «Bade celik» [Текст] / Н. В. Савицкий и др. // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вып. № 43. – Д.: ПГАСА, 2007. – С. 449-458.
3. Пёшль, Т. Сопроотивление материалов [Текст] / Т. Пёшль. – М.: ОГИЗ, 1948. – 380 с.
4. Iuorio, O. Compilation of k values [Электрон. ресурс] / O. Iuorio, B. W. Schafer; Johns Hopkins University. – 2008. – Режим доступа: <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/sheathedwalls>.
5. Лейтес, С. Д. Справочник по определению свободных длин элементов стальных конструкций [Текст] / С. Д. Лейтес. – М., 1963. – 161 с.

Поступила в редколлегию 19.03.2010.

Принята к печати 30.03.2010.

С. Н. СВИРИДОВИЧ, Д. В. ЖИХАРЕВ, А. Е. ЧЕРЕШКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь)

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ МОНОЛИТНОЙ СТЕНКИ ВОДОПРИЕМНОЙ КАМЕРЫ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ЗАГЛУБЛЕНИЯ В ГРУНТ

У статті викладено опис конструкції водоприймальної камери, розрахунок несучої здатності її стінок, цілі використання споруди.

В статье изложено описание конструкции водоприемной камеры, расчет несущей способности ее стенок, цели использования сооружения.

The article is dealt with the description of the water reception chamber, load capacity calculation of its walls, and purposes of use of the construction.

Водоприемная камера является составной частью ливневого коллектора общей длиной 160 м, проложенного под одной из улиц в г. Минске. Уровень низа днища камеры находится на глубине 4,94 м.

Конструкция водоприемной камеры представляет собой замкнутый прямоугольный в плане короб размерами 3,5×2,5 м, состоящий из боковых монолитных железобетонных стенок толщиной 16 см и железобетонной плиты перекрытия, опертой на боковые стенки. В стенках и плите имеются отверстия, в которые заведены конструкции водопроводящих труб с обеспечением герметичности стыков данных конструкций.

В связи с тем, что в ходе работ по сооружению водоприемной камеры глубина ее расположения оказалась больше проектной, возникла необходимость в дополнительном определении прочности отдельных конструктивных элементов камеры.

Расчету подвергнута боковая стенка с высотой 2,45 м и шириной (пролетом) 1,05 м. Расчетная схема стенки представляет собой плиту, свободно опертую по трем сторонам и испытывающую воздействие горизонтальной составляющей от давления толщи грунта высотой, численно равной 4,94 м – от подошвы фундамента стенки до поверхности земли. При данной схеме нагружения стенка рассчитывалась на действие изгибающего момента от совместного воздействия вертикального и горизонтального давлений грунта. Грунт насыпной, неоднородный, из супеси, песка и гравия, со значительным присутствием битого кирпича и щебня, что является обычным для городских

условий. Объемный вес грунта с учетом данных факторов составил $\gamma = 15,68$ кН/м³. Соответственно угол внутреннего трения был принят $\varphi = 35^\circ$.

Высота грунта, оказывающего горизонтальное давление $H_{гр} = 2,45$ м, оказывающего вертикальное давление $H_{пр} = 4,94$ м.

Распределение бокового давления грунта принималось трапециевидным, при этом верхняя и нижняя ординаты соответствующей эпюры рассчитывались по следующим зависимостям:

$$q_b = n \cdot b \cdot \gamma \cdot H_{пр} \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 35,24 \text{ кН/м}^2;$$

$$q_n = n \cdot b \cdot \gamma \cdot (H_{гр} + H_{пр}) \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 52,72 \text{ кН/м}^2.$$

Максимальный момент, действующий у наиболее загруженного края стенки:

$$M_{sd} = 0,078 \cdot q_b \cdot (1,05)^2 + 0,025 \cdot q_n \cdot (1,05)^2 = 4,484 \text{ кНм}.$$

Расчетное сопротивление изгибу стенки определялось исходя из параметров прочности монолитного бетона С16/20, $f_{cd} = 10,67$ МПа и рабочей арматуры класса S240, $f_{yd} = 218$ МПа с учетом поправочных коэффициентов, введенных согласно п.п. 6.1.2.11 и 6.2.1.3 СНБ 5.03.01-02, соответственно.

Указанные расчетные параметры были определены на основании данных исполнительной документации по возведению водоприемной камеры (исполнительные рабочие чертежи, акты на скрытые работы).

$$M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5 \cdot x_{eff}) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - c_1) = 31,12 \text{ кНм.}$$

Таким образом, прочность железобетонной монолитной стенки водоприемной камеры ливневого коллектора обеспечивается при значительной глубине залегания (около 5 м) и насыпных грунтах со значительными примесями строительных обломков.

Запас прочности стенки может быть использован при учете влияния временных нагрузок, т.е. ориентированно под проезжей частью улиц и примыкающих к ним тротуаров, поскольку объект исследования располагается в новом микрорайоне г. Минска, интенсивно развивающемся в плане транспортной инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строительные нормы Республики Беларусь. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст] : СНБ 5.03.01-02. – МАиС РБ, 2004.

Поступила в редколлегию 06.04.2010.

Принята к печати 19.04.2010.

В. И. СОКОЛОВСКИЙ, С. В. БОРЩЕВСКИЙ, В. В. ГОНЧАРЕНКО (Донецкий национальный технический университет)

К ВОПРОСУ О ГЕОМЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ И УКРЕПЛЕНИЯ ПОРОД ВОКРУГ НАКЛОННЫХ СТВОЛОВ

Наведено підсумки шахтних досліджень руйнування порід навколо стволів вугільних шахт та обґрунтовано параметри їх зміцнення в'язкопластичними розчинами.

Приведены итоги шахтных исследований разрушения пород вокруг стволов угольных шахт и обоснованы параметры их укрепления вязкопластичными растворами.

The results of mine explorations of destruction of rocks around the shafts of coal mines are presented and the parameters of strengthening them by viscoplastic mortars are substantiated.

Ряд угольных шахт Донбасса еще ведут разработку запасов угля с использованием наклонных стволов. В качестве примера можно привести шахту им. 60-летия Великой Октябрьской Социалистической революции (ВОСР), № 22 «Коммунарская» ш/у «Донбасс», шахты «Донпромбизнес», «Юзов», «Эксимэнерго» и др. Учитывая, что горные работы ведутся на глубинах 300...800 м при угле наклона стволов 8...15 градусов, их протяженность достаточно большая и достигает 1400...3058 м (шахта им. 60-летия ВОСР).

Оценивая литолого-геомеханические особенности эксплуатации стволов, надо указать на такие особенности:

1) вмещающие породы характеризуются высокой степенью сложности с преимущественным наличием пород на глинистых цемен-тах;

2) механическая неоднородность породного массива проявляется в большой вариации прочности пород на сжатие и растяжение: $50 < \sigma_{сж} < 110$ МПа; $3,8 < \sigma_{p^*} < 10,7$ МПа; $2,4 < \sigma_{p^+} < 4,1$ МПа;

3) величина коэффициента размокания пород около 0,8, а форма разрушения первая;

4) породы непосредственной кровли по устойчивости относятся к категории $B_1...B_4$;

5) основная кровля по обрушаемости относится к категории A_2 ;

6) породы почвы сложены «кучерявчиком», сланцами и песчаником.

Оценивая геотехническое состояние наклонных стволов, следует указать, что несоответствие паспорту крепления на отдельных участках различное. В среднем по протяженно-

сти паспорта не соответствует 4,6...5,8 %. Протягиваются отдельные участки, где имеет место существенное деформирование крепи (2,3...3,7 %), что требует ее ремонта. В таких случаях имеет место расслоение пород над стволом, иногда наблюдается разрушение затяжки обрушившимися породами.

Для изучения особенностей разрушения породного массива над наклонным стволом проведены электрометрические измерения с использованием аппаратуры и методики, изложенной в [1]. Профилирование по шпурам проведено зондом на глубину до 3,0 м. Поскольку глубина проникновения низкочастотного электрического поля в породный массив составляет 0,3...0,4 м, что значительно больше диаметра шпура и меньше расстояния от зонда до металлокрепки, то обеспечивается достаточная помехоустойчивость диагностирования. Шпуры бурили по своду ствола с различным шагом расположения. Результаты электрометрических измерений приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 даны значения сопротивления по длине наклонного ствола (фрагмент показан для 200 м). Анализ результатов позволил установить следующую особенность: по длине ствола на каждые 100 м проявляется одна депрессия (аномалия) по величине значения сопротивления. Это участки большего расслоения пород. Анализ данных на рис. 2 показывает другую особенность: вглубь массива отмечается две зоны повышенного сопротивления – одна в пределах 0,4...0,6 м и другая на удалении 1,6...1,9 м от контура выработки. Следовательно, вокруг ствола формируется две круговые аномальные зоны по расслоению пород.

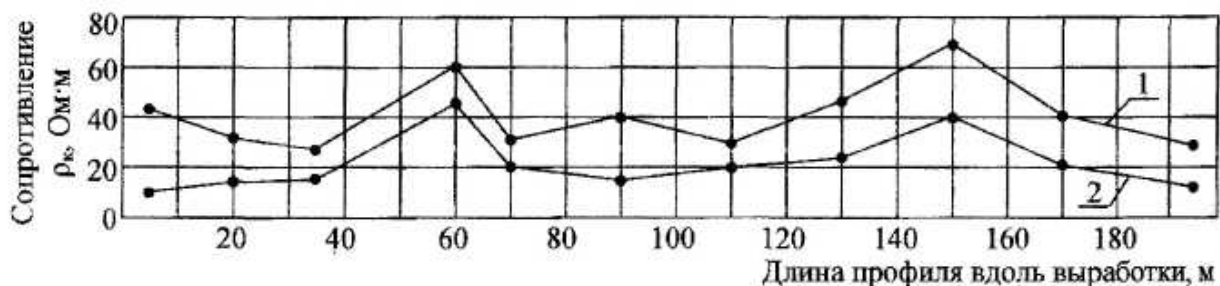


Рис. 1. Данные шпуровой электрометрии по кровле вдоль наклонного ствола шахты 60-летия ВОСР: 1 – на глубине 1,0 м; 2 – на глубине 3,0 м

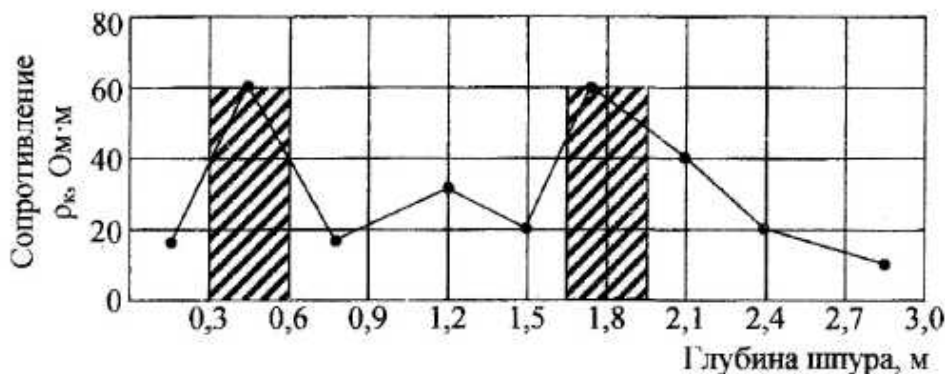


Рис. 2. Данные электрометрии по шпуру в своде ствола

По результатам измерений были вычислены коэффициенты трещиноватости породного массива, значения которых приведены в табл. 1. Придерживаясь терминологии согласно [2], такой массив можно рассматри-

вать как связнонарушенный, а по величине коэффициента трещиноватости – как содержащий две трещинные зоны, опоясывающие ствол в среднем на удалении 0,5 м и 1,75 м.

Таблица 1

Изменение коэффициента разрыхления пород в кровле ствола вглубь массива

| Номера шпуров | Глубина диагностирования, м | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,5 | 0,7 | 1,2 | 1,5 | 1,7 | 2,1 | 2,4 | 2,8 |
| 1 | 1,16 | 1,10 | 1,12 | 1,11 | 1,15 | 1,13 | 1,09 | 1,08 |
| 2 | 1,14 | 1,09 | 1,11 | 1,10 | 1,13 | 1,11 | 1,10 | 1,07 |
| 3 | 1,13 | 1,08 | 1,10 | 1,09 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,08 |

Резюмируя изложенное, можно заключить, что геомеханика разрушения пород над наклонными стволами связана в первую очередь, с расслоением пород в сводовой части выработки. Отсюда вытекает практический вывод: повышение устойчивости стволов может быть достигнуто цементационно-тампонажным упрочнением породного массива. Исходя из этой предпосылки, будут обоснованы параметры тампонажа породного массива вокруг ствола вязкопластическими растворами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булат, А. Ф. Методическое пособие по комплексной геофизической диагностике породного массива и подземных геотехнических систем [Текст] / А. Ф. Булат, Б. М. Усаченко, В. Н. Соколовский. – Д.: ИГТМ НАН Украины, 2004. – 75 с.
2. Виноградов, В. В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок [Текст] / В. В. Виноградов. – К.: Наук, думка, 1989. – 192 с.

Поступила в редколлегию 15.03.2010.
Принята к печати 22.03.2010.

МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОЛОННОЇ СТАНЦІЇ ІЗ ВРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПРИЄДНАНИХ МАС ОТОЧУЮЧОГО МАСИВУ

В роботі представлено результати модального аналізу колонної станції з урахуванням нелінійних властивостей ґрунту та приєднаних мас оточуючого масиву.

В работе представлены результаты модального анализа колонной станции с учётом нелинейных свойств грунта и присоединенных масс окружающего массива.

In the article the results of modal analysis of the columnar station taking into account nonlinear properties of soil and the added masses of surrounding massif are presented.

Специфічною особливістю роботи станцій метрополітену, в тому числі і мілкого закладення, є сприйняття ними динамічних дій від рухомого транспорту, як представленого рухомим складом метропоїзду, так і зовнішньою дією наземного транспорту [1]. Такі дії в сукупності з різноманітністю місць їх прикладення на транспортну споруду істотно ускладнюють розрахунки його напружено-деформованого стану (НДС), зважаючи на необхідність обов'язкового обліку не тільки силової, але і інерційної складової [2 – 4].

Слід зазначити, що складність поведінки споруд станцій і ґрунтового масиву при динамічних навантаженнях істотно вище, ніж при статичних, причому в розрахунках НДС цієї системи вимагається оцінювати вплив багатьох чинників, які не враховуються в статичних розрахунках. Існуючі аналітичні положення розділяють область динамічних розрахунків на динаміку споруд і динаміку ґрунтів [5, 6]. Але більш продуктивним є сумісний розгляд системи «обробка станції – оточуючий масив». Сумісний розгляд і аналіз цієї системи, як єдино вірний підхід до дослідження реальної споруди і підстави відзначало багато дослідників.

Коректне завдання в'язкого тертя (демпфірування) дуже важливе для одержання адекватного відгуку конструкції, тому що ефекти демпфірування важко визначити кількісно, величини часто обчислюють, базуючись на результатах динамічних тестів. Слід також зазначити, що при описі демпфірування часто виправдані прості наближення, оскільки значення демпфірування найчастіше невисокі.

Сила в'язкого демпфірування f_v пропорційна швидкості \dot{u} й визначається рівнянням

вільних коливань системи із в'язким тертям

$$f_v = b\dot{u}, \quad (1)$$

де b – коефіцієнт в'язкого демпфірування.

Отже, при наявності в'язкого тертя, рух маси описується неперіодичним законом. Однак, цей рух називають періодично загасаючими коливаннями. Для конструкції станції слід задати значення логарифмічного декременту $\delta=0,3$ (залізобетонні споруди). Зв'язок між логарифмічним декрементом δ і коефіцієнтом

непружного опору y як $\delta = \pi y$, звідки $y = \frac{\delta}{\pi}$ і

для залізобетонних споруд $y = 0,0955$.

При перевірці через коефіцієнт втрат $\eta = 0,0957$, що відповідає середньому значенню $\eta = 0,089 \dots 0,091$ для залізобетонних конструкцій [7].

При сталих вимушених коливаннях логарифмічний декремент виражається через коефіцієнт поглинання

$$\psi = \frac{E^*}{E}, \quad (2)$$

де E^* й E – відповідно, поглинена й потенційна енергія системи.

Неврахування в'язкого тертя в СЕ-моделі приводить до того, що коливання стають незатухаючими, що не відповідає реальній картині коливань станційних конструкцій.

Для проведення модального аналізу станційної конструкції із урахуванням приєднаних мас оточуючого ґрунту застосуємо СЕ-модель на основі об'ємних елементів (рис. 1).

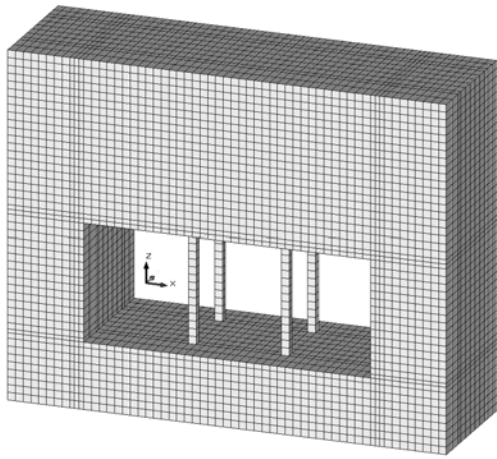


Рис. 1. Модель для проведення модального аналізу

На відміну від статичного аналізу, СЕ-модель для динамічних розрахунків має дещо зменшену розмірність (кількість СЕ – 10935, кількість вузлів – 14152), оскільки модальний аналіз моделей із великою кількістю СЕ неможливий з причини обмеження оперативної пам'яті та частоти процесору.

В моделі для динамічного аналізу відтворено частину станційної конструкції, яка повторюється, і результати розрахунків мають високу точність.

Після проведеного модального аналізу його результатами є форми і частоти власних коливань, причому наведений лише фрагмент станційної конструкції в колонній частині (рис. 2).

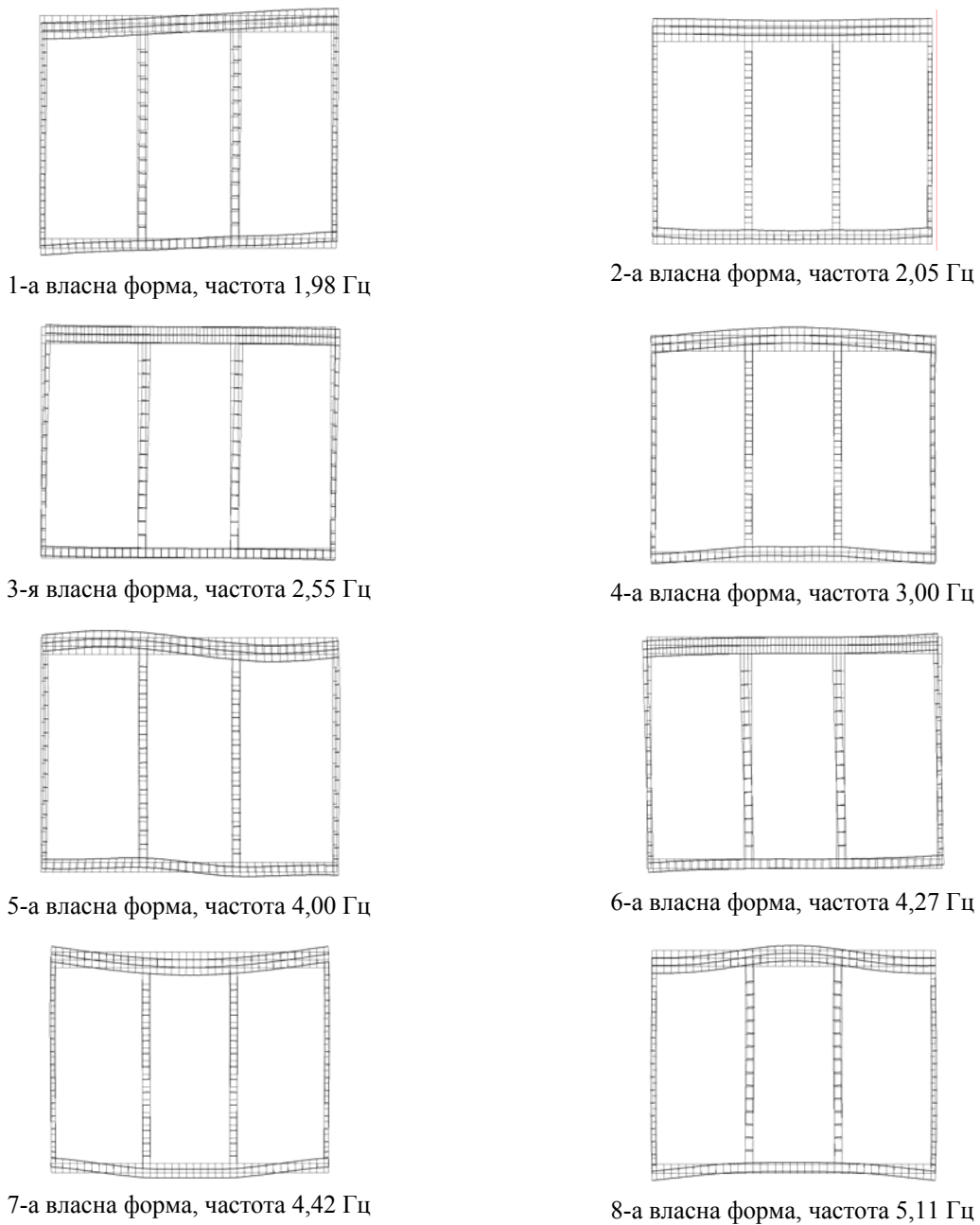


Рис. 2. Власні форми і відповідні їм частоти СЕ-моделі

Насамперед слід відмітити, що в подальшому будуть наводитися перші три-чотири власні форми із відповідними частотами, як характеристики найбільш вірогідних коливань, які виникають при резонансі. Як видно із аналізу (рис. 2), діапазон частот власних коливань для перших восьми форм знаходиться в діапазоні 1,98...5,11 Гц, що відповідає низькочастотним коливанням. Така ситуація цілком нормальна для важкої та жорсткої станційної конструкції, яка взаємодіє із приєднаними масами оточуючого ґрунту. Можливим процесом, який може спричинити резонансні явища в станційній конструкції, є землетрус, коливання якого знаходяться в межах від 1 до 30 Гц. Всі інші частоти вище 30 Гц спричиняють станційній конструкції локального впливу, який не є руйнуючим.

Аналіз форм власних коливань свідчить про те, що форми 4...8 є згинальними, причому конструкція станції працює як одне ціле; форми 2 і 3 (дві важливі форми власних коливань) є зсуваючими конструкцію паралельно початковому стану статичної рівноваги: 2-а форма –

вздовж вертикальної осі, 3-а форма – вздовж горизонтальної осі; 1-а форма (основний тон власних коливань) – є крутильною, тобто конструкція на цій частоті повертається навколо свого центру, дещо згинаючись.

Цікавим фактом є те, що форми 1 та 5 є косиметричними, тобто при застосуванні СЕ-моделі половини станційної конструкції вони б випали із модального аналізу, і основним тоном конструкції була б частота 2,05 Гц. Форма 5 також цікаво характеризує конструкцію, яка при частоті 4,0 Гц згиналася б нерівномірно – ліва колона уходила б вздовж вертикальної осі вгору, права – вниз.

Важливу задачу при динамічному аналізі становить з'ясування впливу приєднаних мас оточуючого масиву, які значно зменшують частоту власних коливань станційної конструкції. Для цього дослідження розроблені ще п'ять СЕ-моделей, в яких поступово по 2 метри забирається шар ґрунту над склепінням, причому в останній моделі станційна конструкція стоїть на основі без верхніх та бокових приєднаних мас ґрунту (рис. 3).

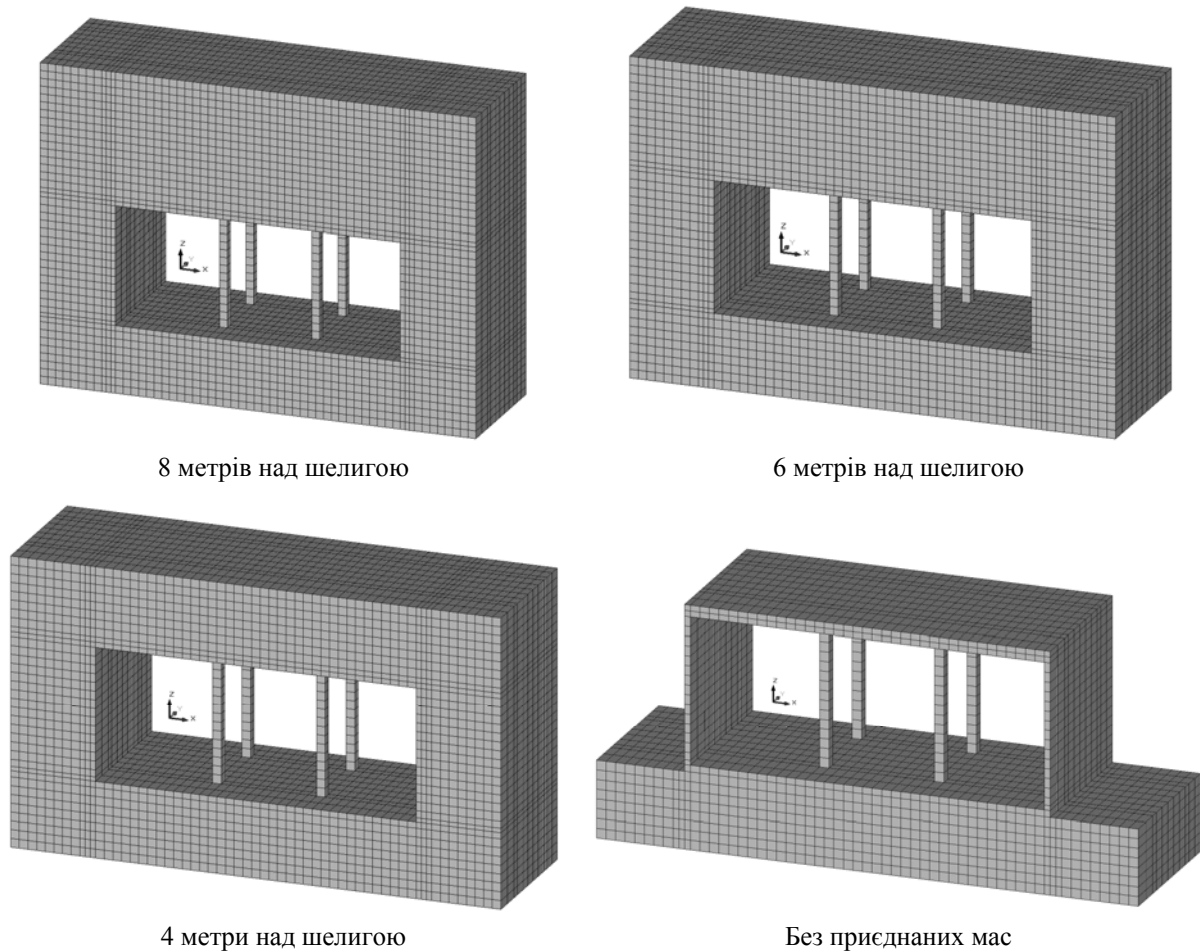


Рис. 3. СЕ-моделі станційної конструкції із зміною приєднаних мас над склепінням (моделі без 2 метрів над шелигою та без ґрунту над шелигою не наведені)

На рис. 4 надані форми власних коливань за основним тоном для всіх шістьох моделей.

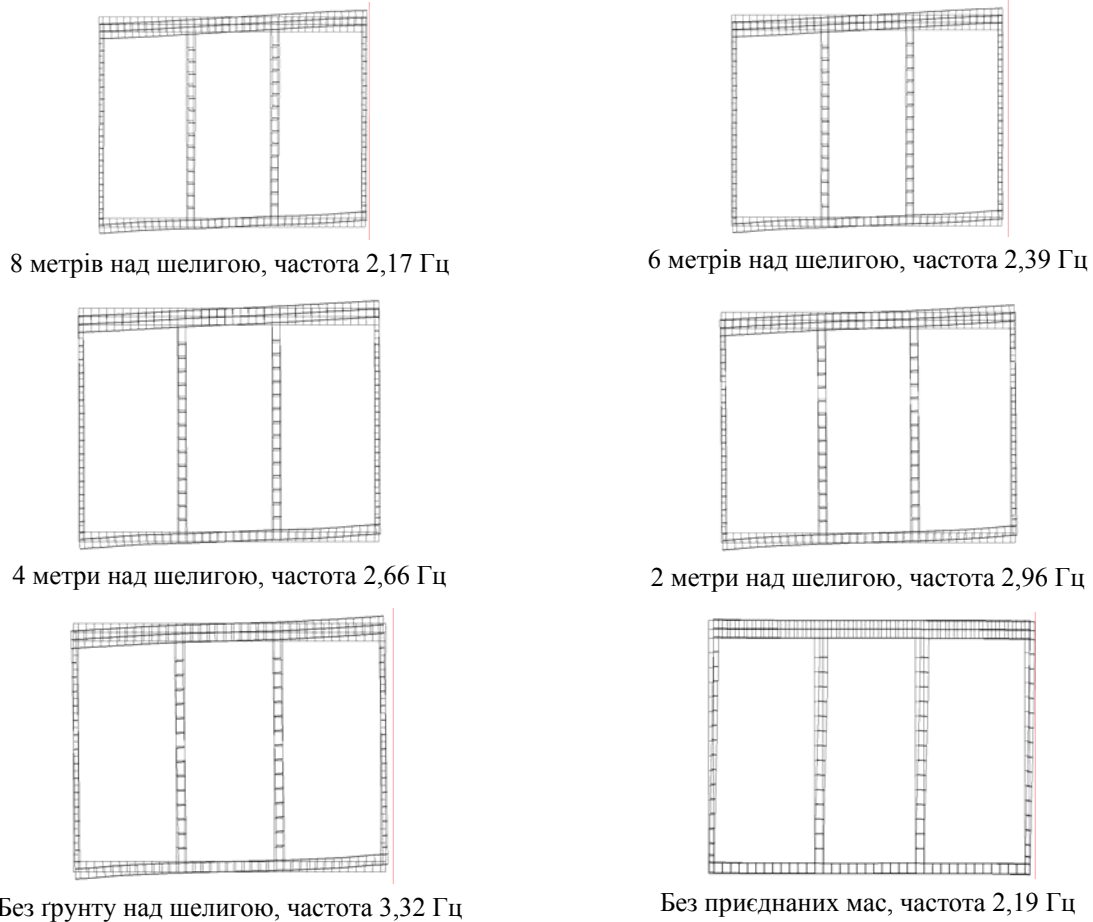


Рис. 4. Власна форма SE-моделей (рис. 3) за основним тоном і відповідна їй частота

Як видно із рис. 4, форми за основним тоном всіх SE-моделей, окрім моделі без приєднаних мас, якісно практично ідентичні, причому кількісно змінюється лише частота. Із цього можна зробити висновок, що наявність приєднаних мас з боків станційної конструкції впливає на форму власних коливань, а наявність приєднаних мас зверху над шелигою склепіння впливає на частоту цих коливань.

Бокові приєднані маси при зміні шару ґрунту над станцією зберігають форму коливань, що видно із значної зміни кососиметричних коливань всіх моделей із боковими масами на відміну від симетричних коливань моделі без приєднаних мас, в якій, після збільшення частоти в залежності від ґрунту над склепінням, вона зменшилася до значення в 2,19 Гц.

Для більш детального аналізу впливу приєднаних мас на частоти власних коливань станційної конструкції проаналізуємо перші чотири частоти у вигляді табл. 1. Для того, щоб вивести закономірності впливу приєднаних мас на зміну частот станційної конструкції, побудовано графік (рис. 5).

Таблиця 1

Частоти власних коливань SE-моделей

| SE-модель | Частоти, Гц | | | |
|------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1-а форма | 2-а форма | 3-а форма | 4-а форма |
| 10 метрів над шелигою | 1,98 | 2,05 | 2,55 | 3,00 |
| 8 метрів над шелигою | 2,17 | 2,29 | 2,68 | 3,27 |
| 6 метрів над шелигою | 2,39 | 2,55 | 2,850 | 3,60 |
| 4 метри над шелигою | 2,66 | 2,82 | 3,16 | 4,15 |
| 2 метри над шелигою | 2,96 | 3,14 | 3,72 | 5,11 |
| Без ґрунту над шелигою | 3,32 | 3,60 | 5,07 | 5,80 |
| Без приєднаних мас | 2,19 | 4,96 | 6,45 | 6,80 |

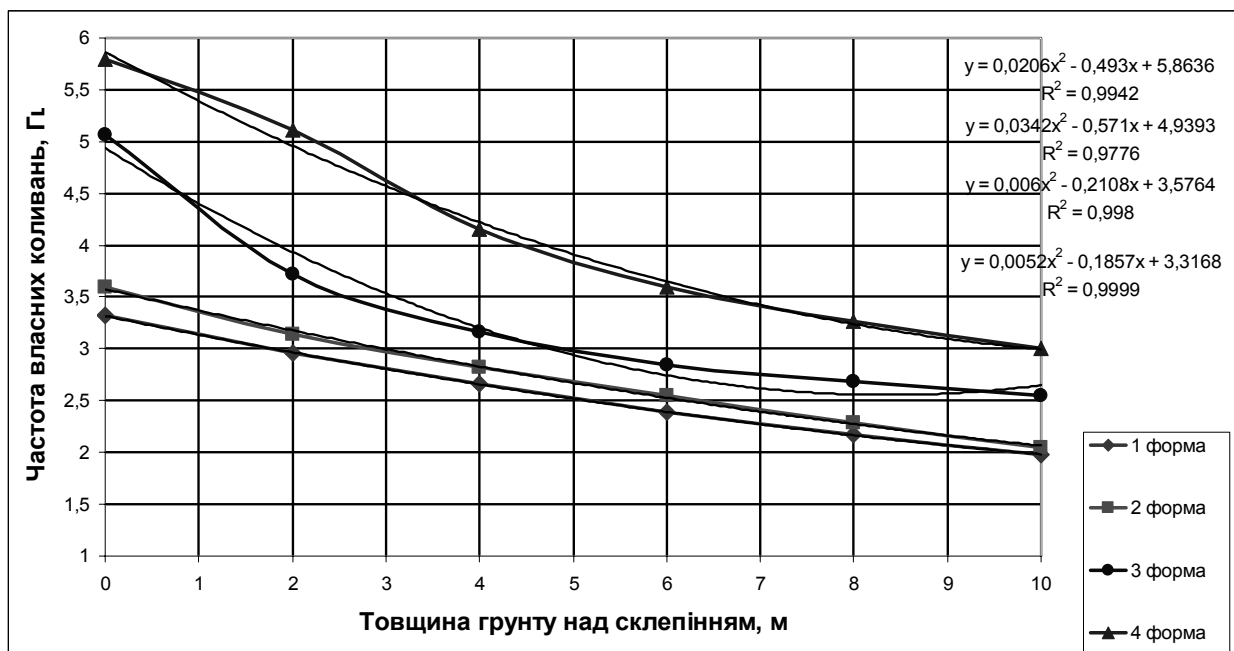


Рис. 5. Графік залежності частот від приєднаних мас над шелигою склепіння

Як видно із аналізу графіка, всі апроксимовані залежності форм власних коливань від товщини ґрунту над склепінням мають характер поліному другого порядку. Але це не доводить, що всі форми власних коливань мають між собою якусь єдину закономірність, оскільки, за законом ортогональності форм власних коливань, їх між собою порівнювати не можна. Отримані закономірності можна побудувати і для інших форм, але вже проаналізовані графіки дають змогу свідчити, що частоти власних коливань в залежності від товщини ґрунту над склепінням станційної конструкції змінюються за поліномом другого порядку, а ступінь апроксимації R^2 практично дорівнює одиниці ($R^2 = 0,977...0,999$), тобто отримані залежності є функціональними.

Подальший розвиток надана робота отримає в послідовному розрахунку конкретних колонних станцій мілкого закладення і, таким чином, створення детальної бази даних частот і форм власних коливань підземних конструкцій з урахуванням нелінійних властивостей ґрунту оточуючого масиву та приєднаних мас ґрунту, що дозволить на стадії проектування більш обґрунтовано обирати геометричні параметри станційних конструкцій.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДБН В.2.3-7-2003. Метрополітени [Текст]. – К.: Держбуд України, 2003. – 300 с.
2. Бакиров, Р. О. Динамический расчет и оптимальное проектирование подземных сооружений [Текст] : учеб. пособие для вузов / Р. О. Бакиров, Ф. В. Лой. – М.: Стройиздат, 2002. – 464 с.
3. Вознесенский, Е. А. Поведение грунтов при динамических нагрузках [Текст] / Е. А. Вознесенский. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 286 с.
4. Дашевский, М. А. Распространение волн при колебании тоннелей метро [Текст] / М. А. Дашевский. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – № 5. – С. 29-34.
5. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками [Текст]. – М.: Стройиздат, 1988. – 31 с.
6. Справочник по механике и динамике грунтов [Текст] / под ред. В. Б. Швеца. – К.: Будівельник, 1987. – 232 с.
7. Динамический расчет зданий и сооружений [Текст] : справочник проектировщика / под ред. Б. Г. Коренева и И. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.

Надійшла до редколегії 26.02.2010.
Прийнята до друку 03.03.2010.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОСНОВАНИЕМ

У статті викладено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану скінченно-елементних моделей системи «пальовий фундамент – ґрунтовий масив».

В статье представлен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния конечно-элементных расчетных моделей системы «свайный фундамент – грунтовый массив».

In this article the comparative analysis of the tensed-and-deformed state of the finite-element models of «pile foundation – soil massif» system is presented.

В последние годы выполнен значительный объем экспериментальных и теоретических исследований по свайным фундаментам, что позволило существенно усовершенствовать нормы их проектирования. Выполнен значительный объем работ по совершенствованию методов расчета свай, используя физико-механические характеристики грунтов и данные статического и динамического зондирования. Принятый в Нормах метод определения несущей способности свай обеспечивает получение надежных результатов, более надежных, чем тех же результатов, полученных по зарубежным методам (коэффициенты надежности и коэффициенты запаса в отечественных нормах принимаются от 1 до 1,4, в зарубежных нормах – от 1,5 до 2,5).

Однако за последние 15 лет нормативные значения расчетных сопротивлений под нижними концами свай увеличились на 7...29 %, а несущая способность свай – в 1,3...1,5 раза. Также следует отметить, что применение свайных фундаментов не всегда согласуется с инженерно-геологическими условиями строительных площадок и экономически целесообразно. Нередки случаи завышения, а иногда и занижения несущей способности свай и несоответствия технологии погружения [1].

В зависимости от характера работы в грунте различают два основных вида свай: свай-стойки и висячие сваи [2]. В данной работе были исследованы свай-стойки, взаимодействующие с массивом грунта, который представляет собой однородную замкнутую область с заданными физическими характеристиками.

Тип свайного фундамента, длину и сечения свай выбирают в зависимости от геологических и гидрогеологических условий строительной

площадки, конструктивных особенностей и размеров сооружения, величины нагрузок, передаваемых на грунтовое основание, опыта строительства и производственных возможностей строительной организации. Окончательное решение о типе свай выносят на основании технико-экономического сравнения возможных вариантов [3].

Под действием передаваемых сооружением вертикальных или наклонных сил в массиве основания возникают нормальные и касательные напряжения, приводящие к деформации грунтов. Кроме того, грунт испытывает напряжения от собственного веса. Деформации от собственного веса грунта завершаются, как правило, в процессе образования и диагенеза грунтов. Напряжения, возникающие от усилий, передаваемых сооружением, приводят к дополнительной деформации грунтов.

Основными исходными данными при проектировании свайных фундаментов являются внешние нагрузки, действующие в строительный и эксплуатационный периоды. К ним относятся постоянная нагрузка от собственного веса конструкций с учетом коэффициентов перегрузок, полезные эксплуатационные нагрузки, крановые нагрузки, снег, ветер. Кроме того, учитываются собственный вес ростверков и грунта над их обрезами [4].

Наиболее часто имеют место деформации уплотнения грунтов под действием нормальных напряжений, реже – деформации сдвигов грунтов, вызываемые касательными напряжениями [5; 6]. В данной работе рассматривалось действие нормальных сил, воздействующих на ростверк. Задачей эксперимента ставилось определение величины действия вертикальных нагрузок на окружающий грунт через сваи.

Широко применявшийся ранее метод расчета фундаментов предполагал раздельный расчет его элементов (например, ростверка и сваи) [3]. На современном этапе развития необходимо учитывать совместную работу всех элементов фундамента. Это стало возможным благодаря широкому применению ЭВМ и инженерных программ, включая комплексы, оперирующие методом конечных элементов.

Таким образом, существует актуальная задача развития более детальных расчетов свайных фундаментов с учетом взаимодействия окружающего грунтового массива, которые не регламентированы существующими нормами, опирающиеся на механику грунтов. В механике грунтов грунт рассматривается как линейно-деформируемая среда. И для расчета используются в основном две расчетные схемы:

1) упругое линейно-деформируемое тело (основные параметры – модули упругости или деформации E и коэффициент Пуассона μ);

2) упругое основание типа Фусса-Винклера (основной параметр – коэффициент постели C).

Рассмотрим некоторые особенности этих схем. Основной недостаток первой схемы – модуль упругости является постоянным, хотя при больших глубинах он зависит от степени сжимаемости грунта. Кроме того, в данной схеме не учитывается работа грунта, расположенного выше подошвы плиты ростверка, одновременное взаимодействие нескольких свай с грунтом и взаимодействие столба с грунтом одновременно по боковой поверхности и подошве. Таким образом, можно свидетельствовать, что данная схема применима только для упругого полупространства и упругой полуплоскости.

По второму варианту справедливо утверждение, что перемещения каждой точки упругого основания линейно связаны с интенсивностями нагрузок и не зависят от нагрузок, действующих на остальные точки поверхности. Отсюда следует, что за пределами загружаемой поверхности перемещения точек равны нулю, что на самом деле не соответствует действительности.

Для учета взаимодействия системы «свайный фундамент – грунтовой массив» необходимо максимально точно создать расчетную модель, которая должна учитывать как геометрические характеристики конструкции фундамента, так и деформационные свойства грунта или грунтов, в случае если грунтовой массив представлен несколькими видами грунтов.

Расчетная модель чаще всего создается на основе методов расчета, реализованных на ЭВМ, либо так называемых «ручных расчетов». Методы расчетов, базирующиеся на ЭВМ, представлены в виде программных расчетных комплексов, например, на основе метода конечных элементов, таких как SCAD, ЛИРА, NASTRAN, PLAXIS и других. Для выполнения «ручных» расчетов используются проверенные опытом и временем методики СНиПов и ДБНов.

Решение задачи взаимодействия грунта и фундамента может быть представлено несколькими вариантами, т.е. следует разделить задачи в пространственной и плоской постановке (квазипространственные). Необходимо отметить, что задачи в пространственной постановке крайне сложны для применения расчетов с помощью нормативных норм и правил, т.к. использование такой постановки подразумевает оперирование напряжениями, а расчет по ДБН требует получения моментов и нормальных сил [7]. Во многих случаях, например, большая площадь ростверка, неоднородность грунтового массива, также крайне сложно свести пространственную задачу к квазипространственной.

На основе конструкции свайного фундамента необходимо рассмотреть все возможные варианты моделей и провести их сравнительный анализ. Рассматриваются следующие варианты:

- вариант № 1 – модель полностью создана на основе пластин;
- вариант № 2 – модель пластинчатая, сваи заданы стержнями;
- вариант № 3 – ростверк создан на основе пластин, сваи и окружающий их грунт – стержни;
- вариант № 4 – ростверк и сваи – пластины, грунт задан в виде стержней;
- вариант № 5 – модель полностью создана на основе стержней;
- вариант № 6 – ростверк и сваи созданы из стержней, окружающий их грунт – пластины;
- вариант № 7 – ростверк создан из стержней, сваи и окружающий их грунт – пластины;
- вариант № 8 – ростверк и грунт – из стержней, сваи – пластины;
- вариант № 9 – модель полностью создана на основе объемных элементов (не рассчитывалась в рамках данной работы).

До начала математического моделирования можно указать на некоторые недостатки буду-

щих моделей. Основной сложностью является задание характеристик грунта для конечного элемента [8]. Проблема в том, что реальные инженерно-геологические условия отличаются высоким уровнем сложности, что обозначено наличием слоистости и неоднородности, т.е. все модели отмечены высокой степенью идеализации, и во многих случаях невозможно использовать значения результатов расчета для практического применения.

Важно отметить, что на современных мощных ЭВМ практически не существует проблемы большого числа конечных элементов, вследствие чего можно применять элементы уменьшенных геометрических размеров. Однако следует отметить, что мелкая сетка также не всегда приводит к точности расчетной модели, т.к. нет необходимости использовать элементы порядка менее 0,1 м. Для типовых задач ис-

пользуются конечные элементы в среднем 0,3...0,5 м.

В качестве исходных данных был взят щебенистый грунт со следующими параметрами:

- объемный вес – 21,97 кН/м³;
- модуль упругости – 43 МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,2.

Параметры конечно-элементной модели:

- толщина элементов – 0,5 м;
- длина свай – 12 м;
- над каждой свайе приложена расчетная нагрузка в 10 т;
- высота ростверка – 0,5 м;
- разбивка конечных элементов произведена с шагом 0,5 м; границы массива жестко закреплены.

После создания конечно-элементных моделей и их проверки были проведены их расчёты, результатами которых являются изополя и изолинии перемещений и напряжений (рис. 1).

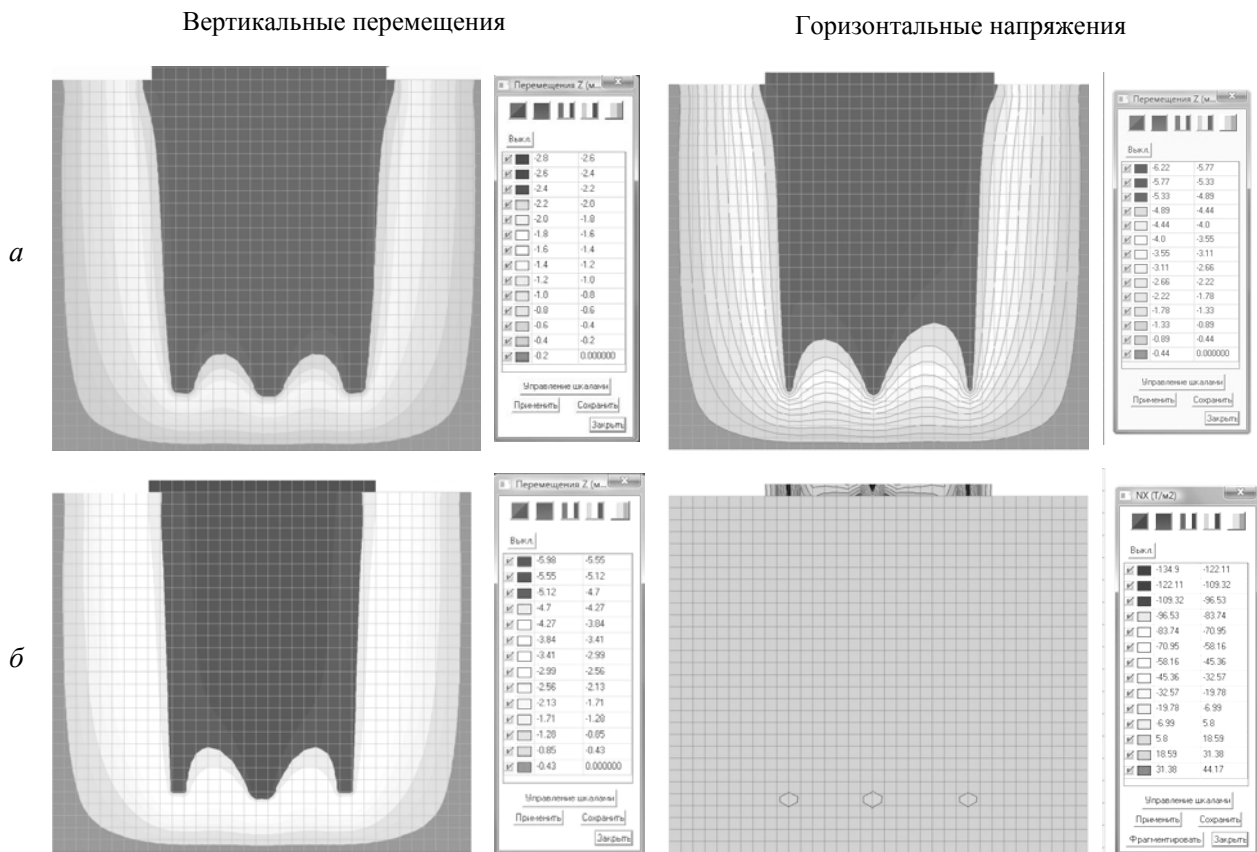


Рис. 1. Изополя и изолинии перемещений и напряжений конечно-элементных моделей:
а – Вариант № 1; б – Вариант № 2

После проведенного численного сравнительного анализа можно сделать следующие выводы.

Вариант № 1. После анализа распределения изополей перемещений можно отметить то, что в данной модели существует совместная работа фундамента и грунтового массива (рис. 1, а);

грунт, который находится между сваями, переместился вместе с ними, что свидетельствует об их совместной работе.

Изополе горизонтальных напряжений свидетельствует, что с глубиной нормальные напряжения в сваях уменьшаются; распределение нормальных напряжений в грунтовом массиве

однородно; по изополям NX можно судить о том, что сваи принимают на себя основную полезную нагрузку, передают ее на грунт, а из-за деформаций последнего напряжения в массиве значительно уменьшаются.

Вариант № 2. Свайный фундамент также работает совместно с грунтовым массивом (рис. 1, б).

Прослеживается уменьшение продольной силы N в сваях с увеличением глубины; очевидно, боковая поверхность сваи взаимодействует с грунтом, поэтому часть напряжений с увеличением глубины теряется; распределение нормальных напряжений в грунтовом массиве однородно, что можно объяснить значительными перемещениями грунта.

Вариант № 3. Третий вариант реализовать не удалось, грунтовый массив некорректно заменять стержневыми конечными элементами. Грунтовый массив, заданный стержнями, ведет себя неадекватно, и взаимодействие массива и свай не происходит. Дальнейшая обработка варианта не имеет смысла. То же касается и Варианта № 4.

Вариант № 5. Расчет выполнен, но результаты проанализировать не удастся по причине неоднородностей распределения; грунт некорректно задавать в стержневом виде. Задание грунтового основания в виде стержней возможно в случае отыскания эквивалентной жёсткости грунтового околоствайного массива и дискретного распределения данной жёсткости на ряд стержней. Тогда задача отыскания напряжённо-деформированного основания сводится к «ручному» расчёту с заменой грунта однопараметровым основанием Фусса-Винклера или более сложным двухпараметровым Пастернака.

Таким образом, применение конечно-элементной схемы становится практически нецелесообразным, т.к. достоинства метода конечных элементов перекрываются недостатками методов упругого основания, которые рассмотрены выше.

Вариант № 6. Концентрация напряжений произошла в месте основания сваи; общее поле деформаций выглядит неоднородно; метод неудачный (рис. 2, а).

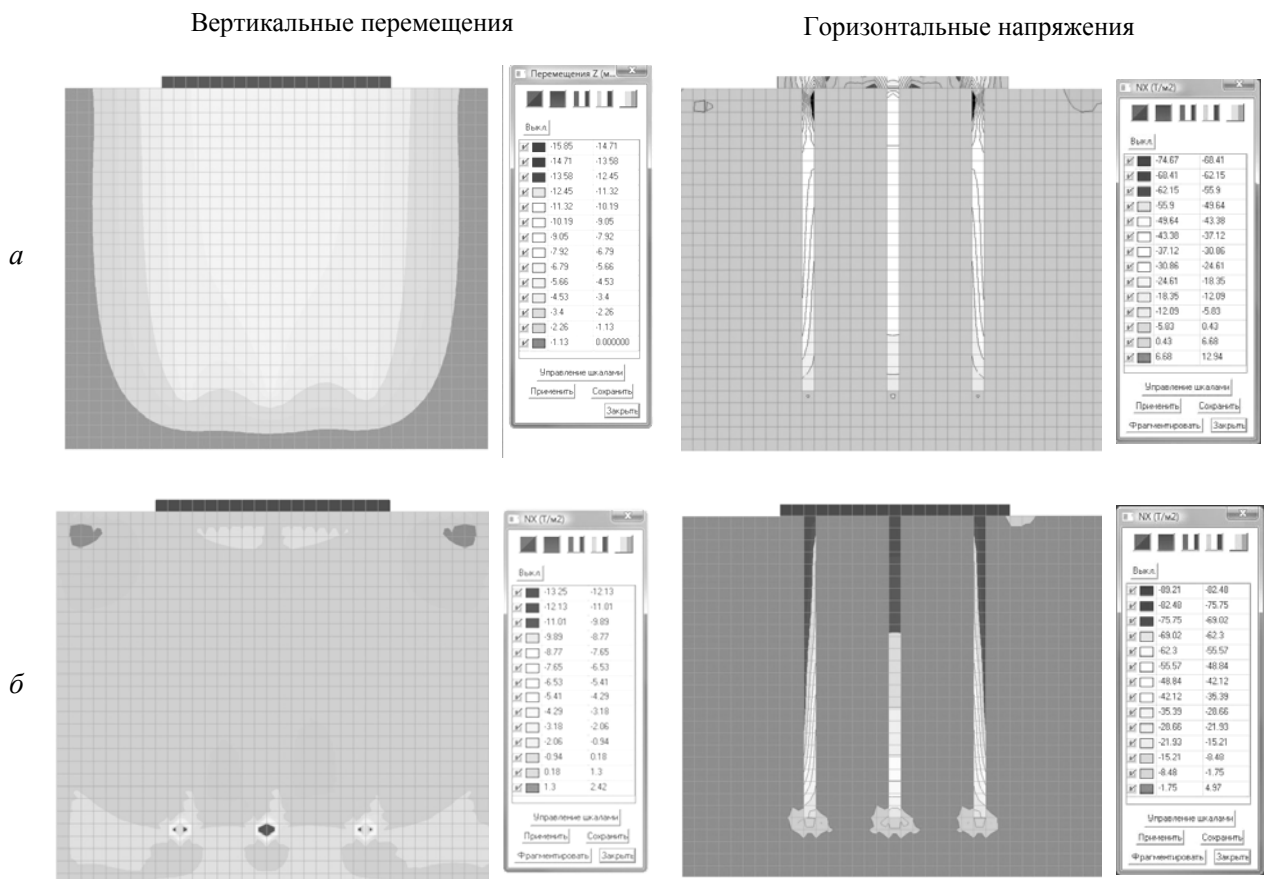


Рис. 2. Изополя и изолинии перемещений и напряжений конечно-элементных моделей:
а – Вариант № 6; б – Вариант № 7

Однако исследование данной модели в дальнейшем может быть продолжено только

при условии адекватного отображения взаимодействия конечных элементов различной мет-

рики, т.е. пластин и стержней. Данная модель может использоваться более плодотворно, если в качестве пластинчатых элементов применять пластины, описываемые полиномами высшего порядка. Однако совмещение стержневых и пластинчатых элементов всё-таки требует решения ряда задач, результаты которых смогут доказать нормальную сходимость решения. Преимуществом данной схемы является простота в задании свай в виде стержней и получение решения в виде силовых факторов, т.е. моментов и нормальных сил, что приводит решение в соответствие с ДБН.

Вариант № 7. Ростверк нежелательно задавать стержнями (рис. 2, б). Данная конечно-элементная модель свидетельствует в пользу применения пластинчатых элементов.

Из вышеизложенного следует, что конечно-элементные модели следует использовать в дальнейшей работе в решении задач определения напряжённо-деформированного состояния свайного фундамента с взаимодействием грунтового основания.

Лишь первая и вторая конечно-элементные модели дали удовлетворительные результаты. Результаты расчета правдоподобны и очевидно, что взаимодействие свайного фундамента и грунтового массива происходит адекватно реальному взаимодействию. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о методологически верно выбранном подходе к созданию конечно-элементных моделей и использованию конечных элементов одной метрики, что даёт возможность получения детальных и точных результатов изменения напряжённо-деформированного состояния свайного фундамента и грунтового массива.

В дальнейшем кроме равномерно распределенной нагрузки следует применить узловые вертикальные и горизонтальные нагрузки. Важным решением является также решение задачи слоистого массива, анализа изменения длины свай и высоты ростверка. В каждом соответствующем случае запланировано исследование напряженно-деформированного состояния околосвайного массива грунта и проверка свай на несущую способность.

После данного этапа следует перейти от плоской задачи к пространственной и проанализировать напряжения в грунтовом массиве, созданном из объемных элементов. Особое внимание следует уделить усовершенствованию задания характеристик грунта, применение нескольких видов слов грунта разной толщины. Как известно, во многих случаях грунт ведет себя достаточно сложно и парадоксально (это отражается, например, в разнице между результатами расчетов и полевыми испытаниями).

Рассмотренные компьютерные модели отличаются высокой степенью идеализации, поэтому неоднородность грунтового массива следует моделировать путем включения элементов соответствующих характеристик.

В дальнейших исследованиях будет учтено взаимодействие свай и окружающего ее массива грунта в случае неоднородных или слоистых грунтовых оснований, а также рассмотрен случай свайного фундамента, который находится на оползневом склоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бартоломей, А. А. Прогноз осадок свайных фундаментов [Текст] / А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
2. Грутман, М. С. Свайные фундаменты [Текст] / М. С. Грутман. – К.: Будівельник, 1969. – 193 с.
3. Гервазюк, Б. В. Расчет фундаментных балок [Текст] / Б. В. Гервазюк, С. И. Глазер. – К.: Будівельник, 1967. – 99 с.
4. Ободовский, А. А. Проектирование свайных фундаментов [Текст] / А. А. Ободовский. – М.: Стройиздат, 1977. – 112 с.
5. Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / Б. И. Далматов. – Л.: Стройиздат, 1988. – 415 с.
6. Ухов, С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / С. Б. Ухов, В. В. Семенов. – М.: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с.
7. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты [Текст] / Минстрой РФ. – М.: ГП ЦПП. – 48 с.
8. Карпиловский, В. С. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2007. – 609 с.

Поступила в редколлегия 18.03.2010.

Принята к печати 24.03.2010.

УСТРАНЕНИЕ КРЕНОВ ФУНДАМЕНТОВ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДРАБОТКОЙ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПОД ЕГО ПОДОШВОЙ

Запропоновано розрахункову геомеханічну модель ґрунтової основи, що відповідає фізичному стану ґрунтів під стрічковим фундаментом, підроблюваних горизонтальними свердловинами. Наведено структурну схему пристрою для контролю параметрів системи «підроблювана ґрунтова основа – стрічковий фундамент з креном». В процесі усунення зверхнормативних кренів будівель і споруд можуть виникати непередбачувані обставини технологічного, організаційного характеру, які впливають на напружено-деформаційний стан системи «основа – фундамент – верхня будівля». Тому при виконанні таких робіт необхідно мати достовірну інформацію про фактичний напружено-деформаційний стан об'єкту. Для проведення моніторингу в масштабі реального часу розроблена і широко застосовується автоматична інформаційно-вимірювальна система. Технічні методи системи включають в себе індуктивні датчики, вимірювачі індуктивності, блок збору і передачі інформації, лінії зв'язку. Багаторазове моделювання напружено-деформованого стану будівель і споруд з використанням автоматизованої вимірювально-інформаційної системи і програмного комплексу «Геомеханіка» [1] дозволяє коректувати проект при усуненні зверхнормативних кренів і регулювати технологічні осадки з метою зниження ризику.

Предложена расчетная геомеханическая модель ґрунтового основания, соответствующая физическому состоянию ґрунтов под ленточным фундаментом, подрабатываемых горизонтальными скважинами. Приведена структурная схема устройства для контроля параметров системы «подрабатываемое ґрунтовое основание – ленточный фундамент с креном». В процессе устранения зверхнормативных кренів зданий и сооружений могут возникать непредвиденные обстоятельства технологического, организационного характера, которые влияют на напряженно-деформированное состояние системы «основание – фундамент – верхнее строение». Поэтому при производстве таких работ необходимо иметь достоверную информацию о фактическом напряженно-деформированном состоянии объекта. Для проведения мониторинга в масштабе реального времени разработана и широко применяется автоматизированная измерительно-информационная система. Технические средства системы включают в себя: индуктивные датчики, измерители индуктивности, блок сбора и передачи информации, линии связи. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений с использованием автоматизированной измерительно-информационной системы и программного комплекса «Геотехника» [1] позволяют корректировать проект при устранении зверхнормативных кренів и регулировать технологические осадки с целью снижения риска.

The geomechanical design model of soil base, corresponding to the physical state of soils (underworked by horizontal cylindrical boreholes) under the strip foundation, is offered. The block diagram of device for control of parameters of the system «underworked soil base – strip foundation with tilt» is presented. The unforeseen circumstances of technological and organizational character, which influence on the stressed-and-strained state of the system «base – foundation – superstructure» can arise during the elimination of excessive tilts of buildings and structures. Therefore it is necessary to have trustworthy information about the actual stressed-and-strained state of an object during making such works. The automated measurement-and-information system has been developed and widely applied for conducting the real time monitoring. The technical means of system include: inductive gauges, instruments for inductance measurements, information-gathering block and communication lines. Numerical modeling of the stressed-and-strained state of buildings and structures with use of the automated measurement-and-information system and program complex «Geotekhnika» [1] allows correcting the project during the elimination of excessive tilts and controlling the technological settlements in order to reduce a risk.

ВВЕДЕНИЕ

Крен, осадки, механические напряжения в системе «ґрунтовое основание – фундамент» являются основными параметрами, необходимыми при расчете начального и текущего значений ее НДС, а, следовательно, и ее эксплуатационного ресурса до устранения и после устранения крена. Нормативными документами ограничиваются

допустимые величины кренів зданий и сооружений. Однако во многих случаях крен, осадки и механические напряжения, возникающие в системе «ґрунтовое основание – ленточный фундамент» на разных этапах эксплуатации строительного объекта, могут превысить допустимые и предельные величины. Поэтому для дальнейшей эксплуатации здания, как в процессе устранения

крена, так и после его устранения необходимо разработать технологический процесс устранения кренов здания путем изменения физико-механических параметров грунта и характера локального распределения нагрузок со стороны фундамента. Для этого требуется разработать способ и технические средства для непрерывного контроля (мониторинга) основных параметров НДС системы «грунтовое основание – ленточный фундамент»: локальных осадок, крена ленточного фундамента, механических напряжений. Необходимо также разработать способ идентификации и корректировки НДС грунтового основания [2]. Для решения этих задач требуется также разработать автоматическую дистанционную систему для непрерывного проведения мониторинга НДС системы «грунтовое основание – ленточный фундамент».

Технологические способы, используемые при устранении крена зданий и сооружений

Устранение кренов зданий и сооружений производится путем воздействия на подсистему «фундамент – верхнее строение», например, изменением плано-высотного положения зданий путем использования поршневых, плоских металлических или резиновых домкратов. Домкраты устанавливаются в специальные ниши в фундаментах-подвальной части здания и объединяются в одномагистральные или модульные системы. Возможно также опускание верхнего строения за счет активных конструктивных систем, размещенных при строительстве в цокольных несущих элементах. Конструктивные системы включают в себя термопластические элементы (асфальтобетон, полимеры и т.д.) или регулирующие устройства, в которых в качестве удаляемой рабочей среды наиболее часто используется песок или вода.

Воздействие на подсистему «фундамент – верхнее строение» осуществляется также путем изменения физико-механических параметров грунтов оснований или их подработкой. Для изменения физико-механических характеристик грунтов, с целью корректировки величины осадок фундаментов здания, используются различные технологические способы: регулируемое замачивание (пропаривание) грунта; пригрузка основания дополнительной статической нагрузкой; пригрузка (разгрузка) основания натяжными устройствами; электроосмос. Из приведенных технологических способов наиболее рациональным является способ на основе подработки грунта горизонтальными цилиндрическими скважинами, т.к. становится возможным подработка

грунта в основании фундаментов бурением скважин вертикально, наклонно или горизонтально относительно подошвы фундамента, при этом используются следующие виды бурения: механическое, механическое с обсадкой, ударное, гидромеханическое, роторное, а также подрезка бесконечной цепью. Для подъема фундаментов просевшей части здания может применяться высоконапорная инъекция в грунтовое основание строительного объекта. В настоящее время наиболее широкое применение находит технология устранения кренов зданий, основанная на локальной горизонтальной подработке грунтового основания цилиндрическими скважинами (рис. 1), позволяющей сформировать НДС грунтового основания в области упругих деформаций.



Рис. 1. Бурение цилиндрических скважин со стороны котлована под подошвой ленточного фундамента

Работы по локальной горизонтальной подработке грунтового основания обычно производятся путем выполнения следующих технологических операций:

- анализ характера природного НДС грунтового основания;
- определение параметров плано-высотного положения контролируемого объекта и его корректировка;
- устройство котлована со стороны менее просевшей части объекта и его упрочнения;
- удаление необходимого количества грунта из-под подошвы фундамента строительного объекта на основе бурения горизонтальных цилиндрических скважин с предварительно рассчитанными (на стадии проекта) основными их параметрами: длина, шаг и диаметр скважин, и их изменение по длине фундамента;
- регулирование технологических осадок для получения их равномерного распределения по длине фундамента путем локального увлажнения

нения, разрыхления грунта вокруг скважин в процессе устранения крена строительного объекта;

- выполнение обратной засыпки котлована.

Геомеханическая и расчетная модель НДС системы «грунтовое основание – ленточный фундамент» при подработке грунта горизонтальными цилиндрическими скважинами

На рис. 2 приведен разработанный вариант геомеханической модели системы «подрабатываемый грунтовой массив – ленточный фундамент с креном», которая позволяет учесть основные физические процессы формирования напряженно-деформированного состояния в данной системе при бурении горизонтальных цилиндрических скважин (рис. 2).

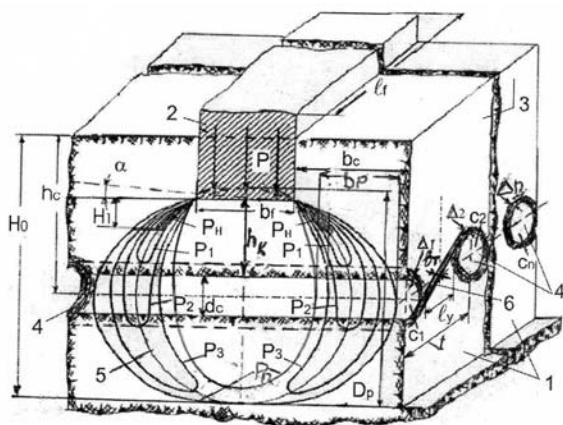


Рис. 2. Геомеханическая модель напряженно-деформированного состояния подрабатываемого грунтового массива под подошвой ленточного фундамента с креном

На рис. 2: 1 – грунтовое основание; 2 – ленточный фундамент; 3 – откос котлована; 4 – цилиндрические горизонтальные скважины; P – начальная нагрузка; b_c – толщина грунтовой стенки; b_f , l_f , α – ширина, длина, угол наклона фундамента; $C_1 \dots C_n$ – горизонтальные цилиндрические скважины; h_0 , d_c , t – глубина заложения, диаметр и шаг скважины; H_0 – максимальная физическая толщина грунтового массива; P_H – область зарождения начальной пластической деформации у грани фундамента; H – высота начальных пластических областей; P_1 , P_2 , P_3 – пластические области, возникающие по линии окружности 5 в грунтовой массе; Δ_1 , Δ_2 , ..., Δ_n – ширина пластических областей в грунте по периметру скважин; 6 – характерное разрушение трещиной грунта целика.

Особенностью геомеханической модели, приведенной на рис. 2, является то, что в скважинах

$C_1 \dots C_n$ по их периметру по концам, например, трещины 6 выполнены концентраторы механических напряжений, например, в виде искусственно сформированных по длине скважины концентраторов механических напряжений, например, вывалов [1]. Это позволяет процесс разрушения целиков 1 сделать воспроизводимым, а, следовательно, становится возможным регистрировать момент их разрушения, например, по величине изменения геометрических размеров скважин: их диаметра в направлении горизонтальной и вертикальной осей симметрии, которые могут быть измерены с помощью стандартных устройств.

В приведенной на рис. 2 геомеханической модели контур поперечного сечения скважин, полученных сразу после их бурения, имеет форму окружности, по периметру которой в грунте формируются технологические пластические области в виде колец шириной Δ [3, 4]. Приведенная геомеханическая модель грунтового основания (рис. 2) со скважинами после бурения учитывает процесс изменения НДС в грунтовой массе, т.к. после бурения скважин происходит перераспределение нагрузки P , действующей на фундамент после бурения скважин. Поэтому часть скважин оказывается в зоне действия нагрузок P_1 больше начальных P_0 , а другая часть – P_2 с величиной меньше P_0 . В результате возникают неравномерные осадки ленточного фундамента и изменяется характер НДС в грунтовой массе. В скважинах, находящихся в области действия нагрузок P_1 конфигурация контура их сечения может изменяться от формы начального круга до эллиптической, квадратной и т.д., при этом контур их сечения имеет множество неровностей, например, в виде вывалов, которые являются мощными концентраторами напряжений и приводят к формированию в грунте вокруг скважин больших пластических областей, а, следовательно, и к резкому изменению характера НДС.

Практически большая часть строительных объектов имеет ленточный фундамент, выполненный на грунтовой подушке [5]. Это позволяет использовать расчетную модель в форме одного слоя [5, 6]. Как показано в [7], в этом случае расчетная модель имеет вид, показанный на рис. 3.

Приведенная расчетная схема грунтового основания (рис. 3), как показано в работе [7], может быть использована для оценки параметров грунтового основания для случая, когда объем локальных упругих областей значительно превышает объем локальных пластических областей. В этом случае становится возможным при

расчетах рассматривать модель в виде прямоугольника шириной « B » и толщиной « H_0 » [4].

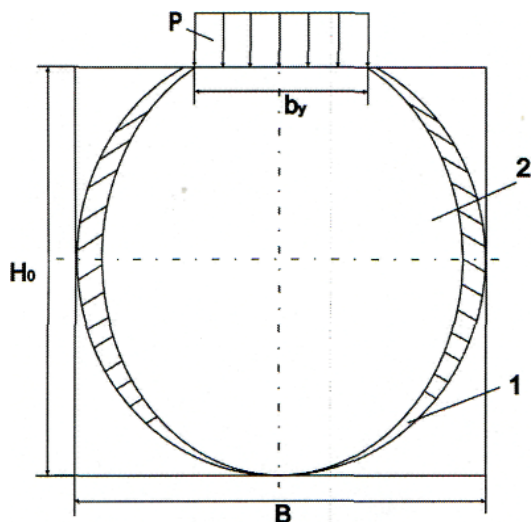


Рис. 3. Расчетная схема грунтового основания с учетом его физической толщины H_0 :
1 – контур развития пластических областей; 2 – область грунта, в котором бурятся горизонтальные скважины; b_1 – ширина фундамента; B – ширина грунтового основания в форме прямоугольника; P – распределенная нагрузка

Разработка способа идентификации НДС грунтового основания

В процессе устранения крена фундамента непрерывно происходит перераспределение полосовой нагрузки, а, следовательно, и непрерывное изменение НДС подрабатываемого грунтового основания. Поэтому при разработке расчетной модели грунтового основания использован принцип, в основу которого положено аппроксимация контура грунтового основания в виде прямоугольника (плоская задача) или параллелепипеда (пространственная задача), см. рис. 3.

Одной из проблем при расчете параметров НДС грунтового основания после подработки грунтов и в процессе устранения крена является определение характера НДС грунта, т.е. оценка зависимости между усилиями (напряжениями) и деформациями. Если эта зависимость линейна, то параметры НДС рассчитываются по теории линейных упругих деформаций, если нелинейна, то, как правило, используются различные приближенные методы, связанные, чаще всего, с аппроксимацией нелинейной зависимости осадок фундаментов от величины нагрузки [5].

Однако, остается нерешенной проблема расчета параметров напряженно-деформированного состояния грунта в процессе устранения крена зданий, т.к. трудно учесть непрерывное изменение характера НДС грунтового основания при изменении крена за счет перераспределения нагрузки, действующей на фундамент. Поэтому

требуется использование множества различных расчетных моделей для каждого значения угла наклона фундамента, составленных как на основе теории линейных деформаций, так и пластических (рис. 4). Поэтому необходим способ идентификации характера НДС грунта в процессе устранения крена ленточного фундамента, что позволит одновременно упростить решение задачи управления технологическим процессом устранения крена фундамента на основе коррекции физико-механических свойств грунта в локальных областях контроля таким образом, чтобы предельное сопротивление грунта не превышало установленного нормативного значения, т.е. НДС грунтового основания соответствовало линейному упругому участку до величины нагрузки P_{C1} .

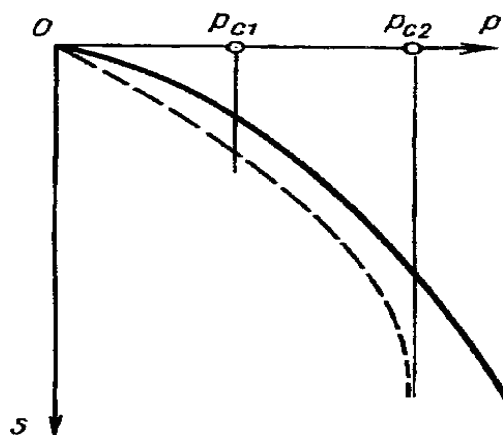


Рис. 4. Зависимость осадки фундамента S от давления P при нагружении без разгрузки:
 P_{C1} – первое критическое давление;
 $P_{C1}-P_{C2}$ – участок фазы сдвигов

Поэтому необходим способ идентификации характера НДС грунта в процессе устранения крена, что позволит одновременно упростить составление алгоритма управления физико-механическими свойствами грунта.

На приведенной зависимости (рис. 4) $S = \varphi(P)$ можно выделить характерные области НДС: линейная область до P_{C1} ; нелинейная область при нагружениях, больших $P_{л}$ до P_{C2} .

При этом в грунтовом основании происходит возникновение множества локальных пластически деформированных объемов грунта, распределенных по объему грунтового основания (рис. 5).

При устранении крена фундамента происходит перераспределение нагрузки, действующей на фундамент, что приводит к изменению характера НДС в грунтовом основании.

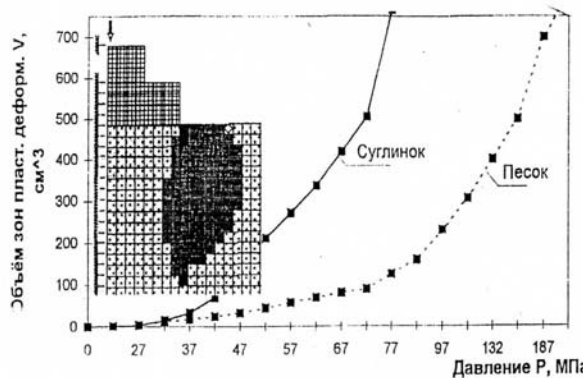


Рис. 5. Графики изменения объема (V) зон (областей) пластических деформаций при увеличении давления (P) на основании для жесткого фундамента (плоская задача МКЭ по программе «Гидромеханика»)

Поэтому получать непрерывно такие зависимости в многочисленных точках грунтового основания, например, под ленточным фундаментом, нереально, т.к. требуется построение новой зависимости $S = \varphi(P)$. В условиях выравнивания крена фундамента в первую очередь необходимо определить, в какой области НДС (см. рис. 4) находится грунт основания, что позволило бы при расчете параметров НДС использовать соответствующую расчетную модель НДС грунта. Эта проблема может быть решена согласно [6] на основе построения зависимости между объемом пластически деформированных областей $V_{\text{пр}}$, осадок S и величиной нагрузки P . Приведенная зависимость позволяет определять величину осадок грунтового основания, как при упругих, так и пластических деформациях. При возникновении в грунтовом основании предельного давления $P_{\text{пр}}$, объем зон пластических деформаций достигает предельной величины $V_{\text{пр}}$. Таким образом, идентификацию НДС грунтового основания можно проводить на основе предварительно полученных зависимостей $S = \varphi(P)$ и $V_{\text{пр}} = f(P)$, используя коэффициент отношения объема локальных пластически деформированных областей V_1 к объему V_0 локальных упругих областей в грунтовом основании по формуле:

$$K_0 = \frac{V_1}{V_0}. \quad (1)$$

Для определения пластических V_1 и упругих V_0 объемов могут быть использованы экспериментальные данные, например, изменения геометрических размеров скважин, происходящие в процессе устранения крена (рис. 6) и на стадии стабилизации осадок (рис. 7).



Рис. 6. Характер деформирования контура скважины после ее бурения



Рис. 7. Характер деформирования скважин на стадии стабилизации осадок фундамента

До настоящего времени задача идентификации НДС грунтового основания не решена. Однако можно подойти к ее решению на основе контроля деформаций контура цилиндрических скважин, полученных экспериментально совместно с аналогичной расчетной зависимостью, например, полученной на основе численного метода расчета (рис. 8) [1].

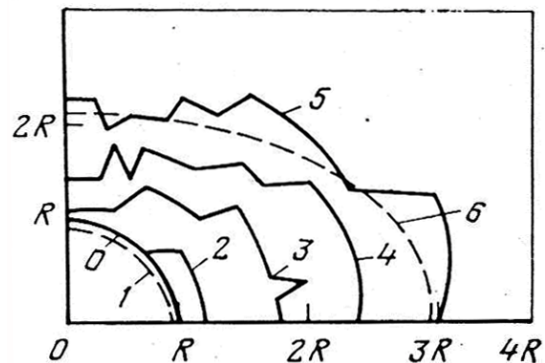


Рис. 8. Результаты определения численным методом границ пластических зон вокруг цилиндрических скважин при увеличении нагрузки:

0 — исходный контур отверстия; 1, 2, 3, 4 — границы пластических зон при увеличении нагрузки; 5 — контур пластической зоны по аналитическому решению

Из рис. 8 следует, что становится возможным, например, по величине деформации, возникающей в направлении вертикальной оси, определить и соответствующую ей величину механических напряжений на основе предварительно полученной зависимости механических напряжений от величины деформации, а, следовательно, провести идентификацию НДС грунтового основания. На рис. 8 приведены результаты расчета деформаций контура скважин численным методом при увеличении нагрузки [1].

Из рис. 8 следует, что по величине экспериментальных измеренных изменений диаметра скважин, например, в вертикальном направлении можно выбрать соответствующую им величину механических напряжений. Сравнивая эту величину напряжений с предельно допустимым значением, можно провести идентификацию грунтового основания. Если локальные значения напряжений в отдельных областях больше предельных, то они путем изменения физико-механических свойств грунта корректируются до значений меньше предельных.

Расчет параметров системы «грунтовое основание – ленточный фундамент» при устранении крена фундамента

После идентификации НДС грунтового основания в лабораторных условиях определяются прочностные и физико-механические параметры грунта по одной из известных методик [5, 6, 7]. Одним из основных факторов, влияющим на характер напряженно-деформированного состояния в подрабатываемом грунтовом массиве, является степень взаимодействия начальных пластических областей у граней фундамента [2] с пластическими областями, возникшими по контуру скважин [3]. Для исключения разрушения грунта в процессе этого взаимодействия глубина заложения горизонтальных скважин должна быть не больше $\frac{1}{4}$ ширины ленточного фундамента [2]. Поэтому, в процессе устранения крена фундамента, характер распределения нагрузки по длине фундамента становится более равномерным, что практически сводит к минимуму возможность взаимодействия между этими пластическими областями в процессе устранения крена. Шаг и диаметр скважин определяется с учетом характера распределения технологических величин осадок по длине фундамента и рассчитывается с учетом ширины кольцевых пластически деформированных областей, сформированных вокруг скважин [3]. При этом в области грунта между двумя рядом расположенными скважинами не должно происходить взаимодей-

ствие кольцевых пластических областей. В значительной степени характер напряженно-деформированного состояния грунтового массива при взаимодействии с нагрузкой зависит от его физической толщины, которая может быть рассчитана по соотношению, приведенному в работе [4]. В процессе устранения крена фундамента непрерывно происходит перераспределение поперечной нагрузки, а, следовательно, и непрерывное изменение напряженно-деформированного состояния подрабатываемого грунтового основания. Поэтому при разработке расчетной модели грунтового основания использован принцип, в основу которого положена аппроксимация грунтового основания в виде прямоугольника (плоская задача) или параллелепипеда (пространственная задача), см. рис. 3.

С учетом геомеханической и расчетной модели, приведенной на рис. 2, 3, и расчетных формул, приведенных в [7], получены соотношения для расчета основных параметров НДС:

$$\begin{aligned} \sigma_{xk} &= \sigma_x K_0, & \sigma_{yk} &= \sigma_y K_0, & \tau_{yk} &= \tau_y K_0; \\ S_{0k} &= S_0 K_0, & S_{mk} &= S_m K_0, & V_{(x,y)} &= V K_0; \\ U_{(x,y)} &= U K_0, \end{aligned}$$

где K_0 – корректирующий коэффициент, учитывающий соотношение упругих и пластических областей в грунте; σ , S , U – соответственно, механические напряжения, осадки и смещения.

Разработка технических средств и устройств для автоматического мониторинга основных параметров НДС системы «грунтовое основание – ленточный фундамент» при устранении крена фундамента

На рис. 9 приведена разработанная структурная схема построения автоматического устройства для контроля основных параметров НДС системы «грунтовое основание – ленточный фундамент». На практике часто возникает расхождение в прогнозируемых и фактических значениях рассчитываемых параметров расчетной модели грунтового основания, например, технологических осадок и крена строительного объекта и т.д. Поэтому в проектах необходимо предусматривать инженерные мероприятия (мониторинг в режиме реального времени, технологические приемы регулирования осадок по расчетной эпюре и др.), которые на всех этапах выполнения работ по устранению крена здания позволяют обеспечивать равенство прогнозируемых и фактических деформаций системы «подрабатываемое основание – ленточный фундамент с креном». Для предложенной расчетной модели сис-

темы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном» основными контролируруемыми параметрами являются:

- коэффициент идентификации подрабатываемого основания;
- глубина заложения, диаметр, шаг цилиндрических скважин;
- характер изменения технологических осадок и крена фундамента;
- изменения деформаций контура скважин в процессе устранения крена фундамента

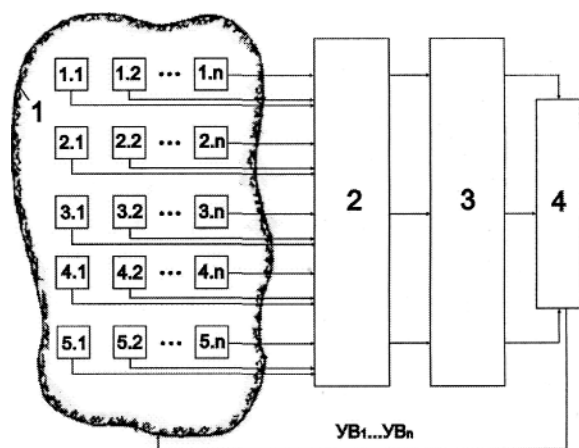


Рис. 9. Структурная схема построения автоматического устройства для контроля параметров расчетной модели и идентификации характера напряженно-деформированного состояния в грунтовом основании

На рис. 9: 1 – объект с креном; 2 – коммутатор мультиплексор; 3 – блок измерения и расчета геометрических, физико-механических, прочностных параметров грунтового основания и фундамента, коэффициента идентификации напряженно-деформированного состояния; 4 – блок анализа и формирования управляющих воздействий УВ1...УВn для коррекции технологического процесса устранения крена и корректировки НДС; 1.1...1.n, ..., 5.1...5.n – соответственно, измерительные преобразователи осадок, крена, выпора грунта, изменения геометрических параметров скважин и механических напряжений

Универсальная структурная схема включает блок непрерывного расчета напряженно-деформированного состояния грунта в технологическом процессе устранения крена фундамента, а также блок формирования текущих управленческих команд. Это позволяет определять локальные зоны грунта, требующие управленческого воздействия, например, на основе коррекции технологических осадок под подошвой ленточного фундамента. При построении структурной схемы контроля основных параметров НДС сис-

темы «грунтовое основание – ленточный фундамент» в процессе устранения крена зданий использованы электромагнитные бесконтактные измерительные преобразователи [8], которые позволяют определять непосредственно на строительном объекте его крен, осадку и механические напряжения. Все конструктивные и технические характеристики датчиков опубликованы в [8]. Особенностью использованных датчиков является то, что они позволяют непрерывно контролировать основные параметры НДС в диапазоне: осадку до 50 см, механические напряжения в пределах участка Гука, а также абсолютную величину и направления крена фундамента. В конструкции индикатора контроля момента возникновения выпора грунта использованы бесконтактные индуктивные датчики смещения, состоящие из двух ферромагнитных частей, закрепленных соответственно на поверхности грунта фундамента и на боковой поверхности ленточного фундамента. Размещение таких датчиков по длине фундамента позволяет контролировать начальный момент выпора грунта, который соответствует его переходу в пластическое состояние.

При практической реализации разработанного принципа построения структурной схемы автоматической системы, используемой в технологическом процессе устранения крена фундамента для получения основных параметров НДС грунтового основания, в ее информационный канал включены следующие измерительные преобразователи и датчики:

- индуктивный датчик непрерывного контроля осадок ленточного фундамента в диапазоне до 50 см (рис. 10) [8];
- измерительный индуктивный преобразователь контроля осадок на основе преобразования смещений магнитопровода в индуктивность (рис. 10, а) [8] в составе датчика контроля осадок, состоящего из двух однотипных преобразователей (рис. 10, б) – рабочего и эталонного;
- локальный индуктивный датчик (рис. 10, в) для контроля смещений с измерительным преобразователем (рис. 10, а);
- индуктивный датчик для контроля величины и направления главных напряжений в ленточном фундаменте на основе использования магнито-упругого эффекта (рис. 11) [9] с автономным режимом работы;
- индуктивный датчик для дистанционного контроля изменений величины и направления крена ленточного фундамента в диапазоне до предельного значения (рис. 13, 14).

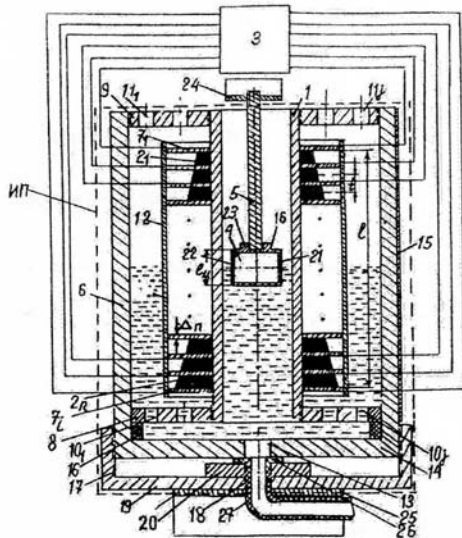


Рис. 10, а. Индуктивный измерительный преобразователь для контроля осадок

На рис. 10, а: 1 – диэлектрическая втулка, длиной ℓ ; 2₁...2_n – катушки возбуждения; 3 – устройство измерения индуктивности и расчетов контролируемого параметра; 4 – цилиндрический якорь со штоком; 5, 6 – несущий стакан; t – шаг установки шайб; 7₁...7_i – электропроводные шайбы; 8, 9 – диэлектрические кольца с отверстиями 10_i...10_j и 11_i...11_j; 12 – изоляционная диэлектрическая втулка; 13 – отверстия в основании 14; 15 – шкала смещений; 16 – ограничивающее кольцо; 17 – диэлектрическая крышка с отверстием 18; 19 – основание крышки 17; 20 – диэлектрическая шайба; 21 – ферромагнитный цилиндр с электропроводным покрытием 22; 23 – основание якоря; 24, 25 – монтажные уголки; 26 – втулка; 27 – трубка.



Рис. 10, б. Контроль осадок устройством, состоящим из двух индуктивных датчиков с магнитопроводом, закрепленным на поплавке



Рис. 10, в. Датчик для контроля осадок фундаментов зданий и сооружений до 50 см с цифровым устройством контроля индуктивности типа UNIT

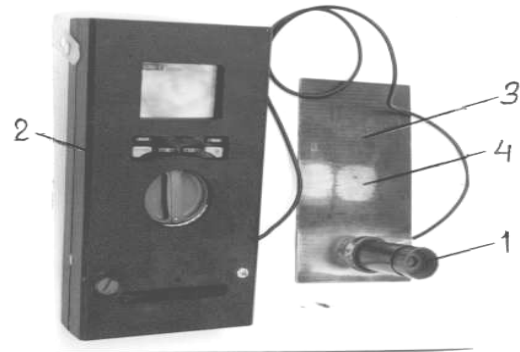


Рис. 11. Индуктивный датчик непрерывного контроля напряжений в ленточном фундаменте: 1 – индуктивный датчик; 2 – цифровой индикатор результатов контроля; 3 – тарировочная ферромагнитная пластина; 4 – разрушаемый участок

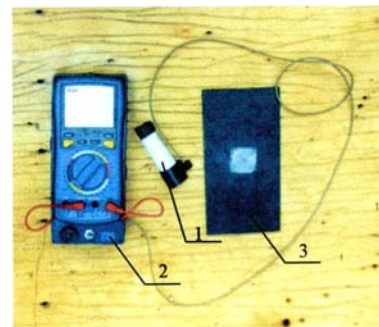


Рис. 12. Индуктивный датчик непрерывного контроля напряжений в металлоконструкциях: 1 – индуктивный датчик; 2 – цифровой индикатор результатов контроля; 3 – тарировочная ферромагнитная пластина с разрушенным царапинами поверхностным участком

На рис. 13 показан принцип построения универсального индуктивного датчика для контроля величины и направления смещения конструкций на основе контроля четырьмя датчиками 5 четырех зазоров ΔC между якорем 4 и датчиками 5, закрепленных на общем корпусе 1; 2 – контролируемый объект; 3 – крепление корпуса датчиков ИП1...ИП4; X, Y, Z – оси координат. ΔM_Z – смещения оси маятника.

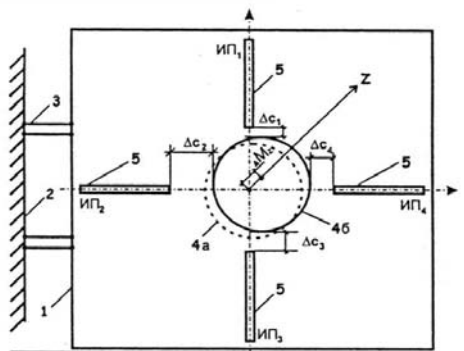


Рис. 13. Принцип построения универсального индуктивного датчика для контроля величины и направления смещения конструкций



Рис. 14. Пример построения универсального датчика с цилиндрическим корпусом

Выводы

1. Обоснован выбор наиболее рационального способа подработки грунтового основания путем бурения горизонтальных цилиндрических скважин.

2. Предложены геомеханическая и расчетная модели системы «подрабатываемое грунтовое основание – ленточный фундамент с креном» с учетом особенности технологии устранения крена горизонтальными цилиндрическими скважинами.

3. Предложен способ идентификации напряженно-деформированного состояния подрабатываемого грунтового основания.

4. Для практической реализации устранения сверхнормативных кренов фундаментов зданий и сооружений разработана структурная схема устройства контроля основных параметров НДС.

5. Для проведения непрерывного автоматического контроля основных параметров НДС разработаны конструкции датчиков крена, осадок и механических напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фадеев, Н. Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / Н. Б. Фадеев. – М.: Надра, 1987. – 221 с.
2. Мурзенко, Ю. Н. Расчет оснований зданий и сооружений в упруго-пластической стадии работы с применением ЭВМ [Текст] / Ю. Н. Мурзенко. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1989. – 135 с.
3. Терцаги, К. Теория механики грунтов [Текст] / К. Терцаги. – Гос. изд-во лит-ры по строит., архитект. и строит. материалам, 1961. – 208 с.
4. Харр, М. Е. Основы теоретической механики грунтов [Текст] / М. Е. Харр. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1971. – 320 с.
5. Егоров, К. Е. К расчету деформаций оснований [Текст] / К. Е. Егоров. – М.: ФГУП «ВНИИНТПИ», 2002. – 400 с.
6. Алексеев, С. И. Основания и фундаменты [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / С. И. Алексеев. – СПб.: ПГУПС, 2007. – 11 с.
7. Тер-Мартirosян, З. Г. Механика грунтов [Текст] / З. Г. Тер-Мартirosян. – М.: Изд-во Ассоциации строительн. вузов, 2005. – 488 с.
8. Пат. № 86305. Украина. Электромагнитный измерительный преобразователь для контроля смещений конструктивных элементов, фундаментов зданий и сооружений [Текст] / В. С. Шокарев, В. И. Чаплыгин, В. Ф. Гречко, Д. А. Волков, С. В. Хилько; заявитель и патентообл. ЧП «БИЛ».
9. Пат. на полезную модель № 19978. Украина. Бесконтактный электромагнитный способ контроля напряженно-деформированного состояния материалов металлоконструкций [Текст] / В. И. Чаплыгин, Н. Ф. Потапова. – Оpubл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
10. Пат. № 77761. Украина. Электромагнитный датчик для контроля величины и направления наклона конструкций [Текст] / В. С. Шокарев, В. И. Чаплыгин, С. В. Хилько.
11. Белов, К. П. Магнитоострикционные явления и их технические приложения [Текст] / К. П. Белов. – М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 160 с.

Поступила в редколлегию 23.03.2010.

Принята к печати 29.03.2010.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО ПІНОСКЛА

В статті розглянуто екологічні та експлуатаційні переваги теплоізоляції на основі піноскла. Описано вплив різних факторів, таких як деформація, окислення, ерозія, перепади температури, а також показано такі властивості, як негорючість, екологічна, санітарна, хімічна і біологічна безпека.

В статье рассмотрены экологические и эксплуатационные преимущества теплоизоляции на основе пеноскла. Описано влияние различных воздействий, таких как деформация, окисление, эрозия, перепады температуры, а также показаны такие свойства, как негорючесть, экологическая, санитарная, химическая и биологическая безопасность.

In the article the ecological and operational advantages of heat-insulation on the basis of foam-glass are considered. The influence of different effects, such as deformation, oxidization, erosion, temperature gradients are described, as well as such properties as non-burning, ecological, sanitary, chemical and biological safety are shown.

Вступ

У сучасній будівельній індустрії гостро поставлені питання енерго- і ресурсозбереження. В Україні 45 % загального споживання енергоресурсів доводиться на теплопостачання будівель. В середньому в країні багатопверхові будівлі споживають 450 кВт·год/м² тепла в рік, а дома котеджного типу близько 800 кВт·год/м² в рік. Для порівняння в Швеції будинки котеджного типу споживають близько 135 кВт·год/м² тепла в рік. Одним з найбільш ефективних вирішень цієї проблеми є зниження втрат тепла через захисні конструкції будівель, споруд і тепломереж тощо. Для цього необхідна розробка і застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів, і одним із таких матеріалів є піноскло. Гарантований термін експлуатації виробів з піноскла, на протязі якого зберігаються значення фізичних характеристик матеріалу, перевищує 100 років [1, 2].

Результати досліджень

При проведенні досліджень об'єктів, утеплених піносклом більше 50 років тому, було встановлено, що структура піноскла істотно не змінилася. Зважаючи на недоступність теплоізоляційного матеріалу після завершення будівельних робіт, збереження теплоізоляційних властивостей матеріалу впродовж всього існування будівлі є особливо важливою задачею. Піноскло завдяки своїм властивостям не схильне до впливу активних факторів, що проявляють себе з часом, а отже не схильне до старіння. Висока довговічність піноскла забезпечується стійкістю до наступних факторів:

1. Деформація. Піноскло – це матеріал, що не деформується і є достатньо міцним для своєї щільності; це унеможливує його усадку, про-

висання та інші подібні наслідки тривалої дії сили тяжіння і механічних навантажень.

2. Окислення. Активний кисень, що міститься в атмосфері, не впливає на піноскло, оскільки цей матеріал складається з вищих оксидів кремнію, натрію, кальцію, магнію, алюмінію.

3. Ерозія. В своїй структурі піноскло не має розчинних компонентів, тому розчинення і розмив матеріалу водою не відбувається.

4. Перепади температури навколишнього середовища. Піноскло має низький коефіцієнт лінійного температурного розширення, що дозволяє без наслідків для структури матеріалу переносити добові та річні коливання температури.

5. Замерзання води. Вода, що знаходиться в тріщинах матеріалів, при замерзанні має руйнівну дію внаслідок її розширення. В той же час піноскло є таким матеріалом, що складається із замкнених. Така структура виключає попадання води всередину матеріалу, тому розширення води при замерзанні не руйнує піноскло.

6. Вплив біологічних форм. Завдяки тому, що піноскло повністю складається зі скла, воно не є живильним середовищем для грибка, цвілі та мікроорганізмів, тому активність біологічних форм не шкоди структурі матеріалу протягом часу.

Піносклом є матеріал, що складається з герметично замкнених сферичних і гексагональних (рис. 1).

Така структура матеріалу виключає взаємодію газового середовища з атмосферою і сприяє незмінності в часі характеристик матеріалу. Мається на увазі відсутність зміни під час експлуатації матеріалу таких параметрів виробів піноскла, як теплопровідність, міцність, стійкість, форма і т.д.



Рис. 1. Структура піноскла

На території колишнього СРСР, а також в Європі і Північній Америці піноскло, як теплоізоляційний матеріал, застосовується більше 50 років. Результати лабораторних випробувань, виміри фізико-технічних параметрів виробів піноскла, взятих будівельних конструкцій терміном експлуатації, що обчислюється 40–50 роками, показали, що характеристики піноскла практично не змінилися, оскільки результати випробувань практично не відрізнялися від первинних значень.

Актуальність тривалого збереження первинних значень параметрів теплоізоляції під час експлуатації будівель і споруд має в сучасному будівництві одне з першорядних значень. Це обумовлено підвищеними вимогами споживачів, що пред'являються до експлуатаційних якостей всієї будівлі або споруди, гарантії їх незмінності в часі, так і прогресом архітектури конструкцій будівель, де витрати на капітальний ремонт і заміну теплоізоляційного матеріалу, що втратив свої властивості, близькі до витрат на будівництво.

Скло, з якого на 100 % складається піноскло, не руйнується під дією хімічних речовин (за винятком плавикової кислоти), не є живильним середовищем для грибка, цвілі і мікроорганізмів, «непрхідне» для комах і гризунів і є ідеальним бар'єром для подібних шкідників. Це особливо важливо при використанні піноскла в замкнутому, невентильованому просторі покрівель, стін, цоколя і фундаменту.

Піноскло є абразивним матеріалом. В природі немає біологічних форм, здатних точити абразив, не шкоди самим собі. Завдяки цій властивості піноскло можна використовувати при теплозахисті зернохосвищ, промислових харчових холодильників, складів тощо, де окрім теплоізоляції створюється надійний бар'єр на шляху шкідників.

Піноскло є негорючим і неадсорбуючим матеріалом, не містить органічні компоненти, що окислюються. Завдяки своєму складу, при нагріванні до високих температур воно лише пла-

виться, як звичайне скло, без виділення газів або пару. Внаслідок цього піноскло здатне забезпечити відмінний протипожежний захист ізольованих об'єктів.

Екологічна і санітарна безпека піноскла дозволяє здійснювати утеплення огорожуючих конструкцій не тільки для приміщень, в яких необхідна підвищена чистота повітря (будівлі освітнього і медичного призначення, спортивні споруди, музеї, високотехнологічні виробництва і тому подібне), але і для будівель зі спеціальними санітарно-гігієнічними вимогами (харчова та фармакологічна промисловість; лазні та сауни; басейни; ресторани, їдальні і тому подібне).

Необхідні розміри і форми виробів піноскла легко обробкою звичайними столярними інструментами: пили, абразиви і тому подібне. Матеріали на основі піноскла зв'язуються і склеюються поширеними типами і видами будівельних клеїв, цементних сумішей тощо. Все це дозволяє здійснювати монтаж піноскла із застосуванням різних варіантів кріплення. Обумовлено це тим, що прилипання відбувається не стільки за рахунок адгезії (яка також присутня), а й за рахунок розвиненої поверхні піноскла і механічного зчеплення поверхонь за допомогою твердіючого складу.

Висновки

Як показали дослідження, основним недоліком є те, що виготовлення піноскла вимагає значних енерговитрат. Розробка ефективних модифікуючих добавок, а також удосконалення технології дає можливість знизити енерговитрати на виробництво модифікованого піноскла. Саме цьому питанню присвячені дослідження, які проводяться в ГНДЛ «Матеріали та будівлі для залізничного транспорту» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Отримані в результаті досліджень матеріали не поступаються за своїми фізико-механічними характеристиками класичному піносклу і при цьому дозволяють економити енергоресурси при їх виготовленні.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Теплоизоляционные изделия на основе алюминио-силикатного сырья [Текст] / А. Н. Пшинько и др. // Залізн. трансп. України. – 2005. – № 2. – С. 64-66.
2. Анализ технологий производства пеностекла [Текст] / А. Н. Пшинько и др. // Залізн. трансп. України. – 2010. – № 31. – С. 159-163.

Надійшла до редколегії 17.03.2010.

Прийнята до друку 22.03.2010.

В. О. МЕЛЬНИЧУК (КМУ, Київ), О. М. САВЧУК, М. А. ГРІЧАНІЙ,
І. Ю. ХОМЕНКО (ДІТ)

АНАЛІЗ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ КОЛЕСА ВІДНОСНО РЕЙКИ З ВІДЕОЗАПИСІВ

У статті аналізуються відеозаписи руху колеса по рейковій колії, зроблені під час динамічних випробувань вагонів. Обробка включає в себе фіксацію положень обода колеса відносно рейки, побудову сплайн-функції переміщень та її частотної характеристики. Метою аналізу є визначити наявність гармонійних складових у поперечних переміщеннях колеса.

В статье анализируются видеозаписи движения колеса по рельсовой колее, сделанные во время динамических испытаний вагонов. Обработка включает в себя фиксацию положений обода колеса относительно рельса, построение сплайн-функции перемещений и её частотной характеристики. Цель анализа – выявить наличие гармонических составляющих в поперечных перемещениях колеса.

In the article the videotape recordings of wheel motion on rail track, done during the dynamic tests of carriages, are analyzed. The treatment includes fixing of wheel rim positions in relation to a rail, construction of the spline function of displacement and its frequency description. The purpose of analysis is to determine the presence of harmonic components in the transversal wheel displacements.

Стрімкий розвиток систем відеозапису, їх мініатюризація і висока надійність за несприятливих умов використання дають вченим-експериментаторам новий унікальний інструмент фіксації візуальних даних при проведенні ходових динамічних випробувань рухомого складу. При цьому актуальною проблемою є правильність інтерпретації і точність визначення взаємних переміщень частин вагону щодо один одного, а також щодо рейкової колії. Як приклад, розглянемо процедуру визначення величини і частоти поперечних коливань колісної пари в рейковому зазорі, знаючи які, можливо спрогнозувати втрату стійкості руху екіпажу [2, 3] при різних швидкостях.

На сьогоднішній день відомі наступні способи визначення цих величин:

- механічний пристрій для фіксації переміщень «вагон-рейки» типу пружного двокоординатного шарніру [1] (недоліком такого пристрою є фіксування переміщень тільки при низькій швидкості руху вагона, бо він притискається до рейок за допомогою роликів);
- датчик переміщень, встановлений між шкворневою балкою та корпусом букси [4], реєструє поперечні зміщення колісної пари відносно кузова, але він дає приблизну інформацію щодо взаємних переміщень пари «колесо-рейка», оскільки база відліку (шкворнева балка кузова) сама піддається складним просторовим коливанням;

- датчик кутових переміщень надресорної балки візка відносно кузова, який використовуються для реєстрації впливу візка, але він працює нестабільно через малість вимірюваних кутів поворотання.

Всі вищеперелічені методи мають свої недоліки, що впливають на правильність інтерпретації результатів вимірювань.

Але у теперішній час нескладно провести, без обмежень на швидкість і умови руху вагону, відеозйомку пари «колесо-рейка», яка дає можливість візуально оцінити характер динамічних процесів, що проходять. Для правильності інтерпретації отриманих відеозаписів (усунення накладок від коливань камери і колеса) використовуємо наступну методу.

Для визначення процесу зміни відстані y_i (рис. 1) між зовнішньою гранню головки рейки і гребеневою гранню обода колеса застосуємо функцію:

$$y_i = F(t_i), \quad (1)$$

де t_i — момент зйомки i -того кадру відеозапису.

За умови, що відеозапис зроблений з нормальною частотою $f_0 = 12,5$ Гц (відповідно, період розкадровки $T = 0,08$ с) і оброблюється покадрово, то функція (1) буде представлена у вигляді матриці:

$$E = \begin{bmatrix} t_0 & t_0 + T & t_0 + 2T & \dots & t_0 + (n-1)T \\ y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

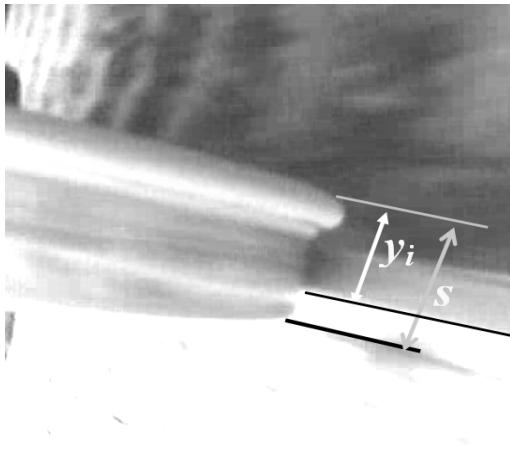


Рис. 1. Кадр із відеозаписом

Побудувати матрицю E автоматично шляхом розпізнавання відповідних об'єктів на відеокадрах поки неможливо, тим більше, що коливання камери дещо змінюють положення рейки у кожному кадрі. Тому формування E виконувалось у наступному порядку:

На першому етапі за допомогою стандартних програм (Virtual Dub, Windows Movie Maker та ін.) необхідно провести розкадровку відеозапису на окремі кадри та пронумерувати ці кадри у відповідності до шкали часу t_i .

На другому етапі за допомогою стандартних програм (Microsoft Foto Editor, Photoshop та ін.) кожен кадр розкадровки відеозапису повертаємо на такий кут, щоб пара «колесо-рейка» зайняла суворо вертикальне (чи горизонтальне) положення, що дасть змогу уникнути ефекту коливань камери відносно площини колеса. Надалі виділяємо фрагмент між гранями рейки та колеса, та вираховуємо розмір y_i (рис. 2) (для визначення масштабного коефіцієнту виконуємо замір повної ширини обода колеса та перерахунок розмірності «піксель» в міліметр).

На третьому етапі формуємо масив даних E методом розміщення значень t_i та y_i у формі двовірної матриці. Імпортувавши матрицю E (розміром $2 \times n$) у програму MATLAB, з'єднаємо послідовно усі значення y_i плавною сплайн-функцією (відрізками кубічних парабол, що проходять через задані точки) та отримуємо амплітудну функцію X . Останню за допомогою перетворення Фур'є перетворюємо в спектральну щільність коливань пари «колесо-рейка».

Відпрацювання приведеної методики проводилось на вірцевій функції:

$$y_i = 110 + 25\sin 2\pi(1,5t_i), \quad (5)$$

що була задана матрицею E_1 через інтервал $\Delta t = 0,08$ с загальним числом точок $n = 135$. Параметри вірцевої матриці подібні одержаним при обробці відеозаписів «колесо-рейка», але вона має єдину частоту коливань $f = 1,5$ Гц, близьку до автоколивань візка моделі 18-100 порожнього піввагона, що збурюються із втратою стійкості руху.



Рис. 2. Визначення розміру y_i

При формуванні E_1 були умисно внесені «помилки» на 2-й, 3-й, 4-й, 8-й та 11-й секундах – їх видно на побудованій сплайн-функції на рис. 3а (верхній амплітудний графік). Як і припускалось, такі випадкові помилки не позначаються суттєво на частотній характеристиці (нижній графік рис. 3а). Її сплеск вказує на частоту коливань 1,5 Гц із щільністю 22 % (масштаб щільності заданий відносно ста процентів для чистого гармонічного процесу).

Налагоджена на вірцевій функції програма обробки була використана для розшифрування еталонного відеозапису коливань пари «колесо-рейка», записаного співпрацівниками ІТМ на полігоні Белореченська – Майкоп. Випробувався піввагон на типових візках мод.18-100 зі зношеними колесами (товщина гребеня 27 мм) з метою дослідження впливу комплексної модернізації візків на ходові якості вагона.

Аналізувалась тільки ліва частина відеозапису (у праву частину відеоролика вмонтовані аналогічні зйомки руху візка, комплексно модернізованого з використанням елементів «А.Стакі» і зносостійкого профілю ІТМ-73). Цей ролик відомий спеціалістам – він демонструвався у доповідях та описаний у джерелах [6].

При перегляді еталонного запису складається враження, що колесо увесь час знаходиться у режимі інтенсивних поперечних автоколивань – через втрату стійкості руху.



Рис. 3. Результати аналізу коливань:
 а) зрізкової функції; б) еталонного відеозапису коливань візка мод. 18-100 на 9...20 с;
 с) еталонного відеозапису коливань візка мод. 18-100 на 0...10 с

Швидкість $V = 70$ км/год для порожнього піввагона із зношеними колесами близька до критичної на прямолінійній колії, але відеоролик знімався і при проходженні криволінійної ділянки радіусом $R = 650$ м. Із минулих досліджень [5] витікало, що у кривій критична швидкість зростає, – отже на частині відеоролика можливе затухання коливань колеса. Уважний перегляд показав, що після 20-ї секунди від початку ролика помітне затухання виляння. Тому було покадрово оброблено два фрагменти відеоролика:

I фрагмент – від $t = 19,2$ с до $t = 32,6$ с – матриця E_2 , характеристики див. на рис. 3б;

II фрагмент – від $t = 0,2$ с до $t = 10,2$ с – матриця E_3 , характеристики див. на рис. 3с.

З частотних характеристик видно, що у фрагменті II домінує єдина частота $f_a = 1,67$ Гц (із щільністю спектру 3 %).

При експериментальних дослідженнях виляння частин піввагона, що втратив стійкість руху, була визначена частота автоколивань близько 1,5 Гц [4]. Це свідчить про наявність на фрагменті II еталонного відеозапису автоколивань колісної пари поперек рейкової колії, – отже втрата стійкості руху підтвердилась.

Щодо фрагменту I, то тут домінують три низькі частоти $f_1 = 0,87$ Гц та $f_2 = 0,95$ Гц (із щільністю спектру 0,13 %), а також $f_3 = 1,04$ Гц (із щільністю спектру 0,21 %), а на частоті f_a можна побачити мізерний сплеск із щільністю 0,03 %.

Обробка еталонного відеозапису за викладеною методикою дозволила визначити наступне:

- критерієм збурення поперечних автоколивань колісної пари у рейковому зазорі є наявність сплеску частоти $f_a = 1,5...2$ Гц (в результаті аналізу одержано $f_a = 1,67$ Гц) зі щільністю спектру ≈ 3 %;

- відсутність або незначна щільність сплеску частоти f_a за наявності домінуючих сплесків більш низьких частот $f' < f_a$ свідчить, що автоколивання погашені, внаслідок входу вагона у криволінійну ділянку колії.

Описана процедура використовувалась також для оцінки стійкості руху піввагона, відремонтованого за технологією «Дніпро». Розроблена сумісно з ДП «Придніпровська залізниця», вказана технологія ДР вагонів експлуатаційного парку передбачає обладнання візків мод. 18-100 пристроями, що підвищують критичну швидкість порожнього вагона до $V_{кр} \geq 100$ км/год, тобто вагон здобуває швидкісну категорію «s» за класифікацією UIC.

У процесі динамічних випробувань дослідного піввагона № 66489808 після ремонту за технологією «Дніпро» були виконані відеозйомки під час руху порожнього зчепу зі швидкістю 80, 100 та 132 км/год.

Прикріплена до кінцевої балки кузова, камера знімала положення колеса відносно рейки (див. рис. 1, 2). По цих відео сформовані матриці $E_4...E_6$.

Результати аналізу представлені на рис. 4.

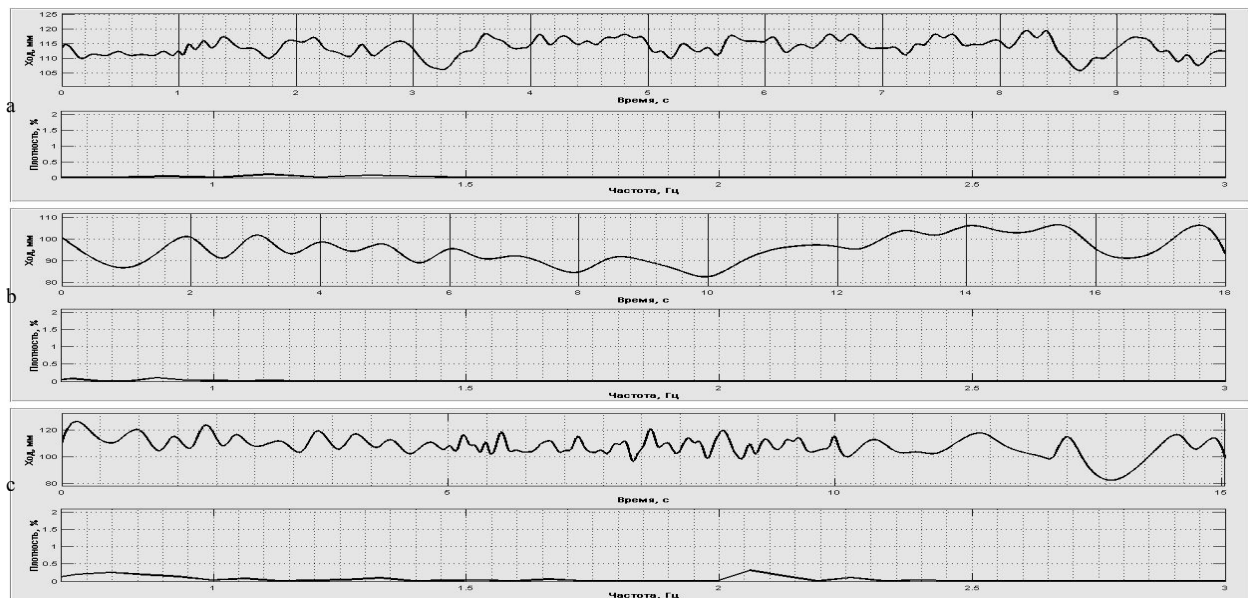


Рис. 4. Результати аналізу відеозаписів коливань «колесо-рейка» дослідного піввагона після ДР за технологією «Дніпро»:

- а) при швидкості $v = 80$ км/год;
- б) при швидкості $v = 100$ км/год;
- с) при швидкості $v = 132$ км/год

Верхні амплітудні характеристики вказують на безперервні переміщення колісної пари у рейковому зазорі в результаті випадкових поперечних збурень. Матриця E_4 побудована з покадровим зніманням розмірів y_i , тому на рис. 4а коливання представлені детальніше, ніж при $v = 100$ і $v = 132$ км/год. Відповідні матриці E_5 і E_6 сформовані з перемінним $\Delta t = 0,08 \dots 0,56$ с, тобто через 1...6 кадрів відео. При цьому оператор старався не пропустити кадрів з максимальним наближенням (або віддаленням) гребеня до рейки. Виявилось, що апроксимація сплайн-функціями працює і при нерегулярній розкадровці, якщо у E значення стовпця часу постійно наростають. Природно, що високочастотні гармоніки переміщень частково згладжуються, але індикація автоколивань не повинна погіршитись, оскільки останні характерні регулярними контактами гребенів коліс то з лівою, то з правою рейками.

Розгляд частотних характеристик, наведених на рис. 4, вказує на наступне:

- на усіх розглянутих швидкостях руху вагона поперечні автоколивання колеса відносно рейки відсутні (мають рівень із щільністю спектру менш ніж 0,32 %). Отже, рух дослідного вагона стійкий по Ляпунову.

Цей висновок підтримується результатами аналізу поперечних динамічних зусиль та прискорень, зареєстрованих під час динамічних випробувань вагона.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Измерение динамического профиля пути [Текст]. – В кн.: Некоторые задачи механики скоростного транспорта / В. А. Лазарян и др. – К.: Наук. думка, 1970. – С. 88-94.
2. Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей [Текст] / Ю. В. Демин и др. – К.: Наук. думка, 1984. – 160 с.
3. Пшінько, О. М. Підвищення швидкості вантажних поїздів [Текст] / О. М. Пшінько, М. І. Сергієнко, О. М. Савчук // Вагонний парк. – 2007. – № 6. – С. 13-17.
4. Савчук, О. М. Об интенсивном влиянии тележек [Текст] / О. М. Савчук, О. В. Шатунов, Н. А. Гричаный // Ж.д. транспорт (РФ). – 2003. – № 3. – С. 44-45.
5. Мельничук, В. О. Проблема підвищення швидкості вантажних поїздів [Текст] / В. О. Мельничук, О. М. Пшінько, О. М. Савчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 40-45.
6. Комплексная модернизация ходовых частей грузовых вагонов [Текст] / В. Ф. Ушкалов и др. // Вагонний парк. – 2007. – № 2. – С. 18-22.

Надійшла до редколегії 23.03.2010.

Прийнята до друку 07.04.2010.

Н. А. РАДЧЕНКО, Т. И. КУЗНЕЦОВА (Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепрпетровск), О. В. ЗВОНАРЕВА (ДИИТ)

ОЦЕНКА ЛЕВИТАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ КОНТУРОВ ПЛОСКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Наведено результати теоретичних досліджень просторових коливань та стійкості левітаційного руху електродинамічних транспортних засобів для різних варіантів окреслення та розміщення прямокутних шляхових контурів на плоскій шляховій структурі.

Приведены результаты теоретических исследований пространственных колебаний и устойчивости левитационного движения электродинамических транспортных средств для различных вариантов очертания и размещения прямоугольных путевых контуров на плоской путевой структуре.

The results of investigation of spatial oscillations and stability of motion of electrodynamically levitated vehicle are presented. Various shapes of the track contours and their arrangement on a plain track structure are considered.

Электродинамический транспорт является одним из перспективных видов транспорта. Это транспорт будущего. Преимущество его по сравнению с другими видами транспорта определяется высокой скоростью движения, плавностью хода, обусловленной его левитацией, экологичностью, экономичностью.

Высокая, для большинства стран недоступная, стоимость создания его является следствием сложности и несовершенства конструкций его подвижного состава и путевой структуры. Поэтому упрощение их конструкций является одной из основных задач при проектировании и создании этого вида транспорта.

В настоящей работе рассматриваются варианты создания упрощенных конструкций подвижного состава и путевой структуры электродинамических транспортных систем и как следствие этого уменьшение их стоимости.

В настоящее время созданная в Японии электродинамическая транспортная система находится в стадии испытаний и доводки. Ее конструкция характеризуется профилированным U -образным очертанием в поперечном сечении путевой структуры и ходовых частей подвижного состава, которое обусловлено главным образом необходимостью обеспечить устойчивость и направление движения в плане экипажей.

Также очертание ходовых частей подвижного состава и путевой структуры приводят к сложностям, обусловленным непростой конструкцией системы, необходимостью решать

проблему обеспечения прочности боковых стенок U -образной путевой структуры из-за больших значений боковых электродинамических сил, сложную задачу по созданию стрелочных переводов, по уходу и содержанию элементов пути и подвижного состава (в значительной степени из-за необходимости очистки от снега, мусора, камнепадов).

Поэтому, авторами работы предлагаются варианты создания более простых конструкций, в частности системы с плоскими частями ходовых частей подвижного состава и путевой структуры, которые обеспечивают устойчивость, направление и безопасность движения экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры.

Так, в работе [1] описана конструкция транспортной системы с четырьмя полюсами путевых прямоугольных контуров одинаковой ширины, установленных на горизонтальных поверхностях плоской путевой структуры, и экипажа с плоскими частями ходовых частей тележек со сверхпроводящими магнитами, взаимодействующих с контурами путевой структуры. Движение экипажа такой транспортной системы направляется очертанием контуров путевой структуры в плане и устойчиво не только в прямолинейных, а и в криволинейных участках путевой структуры в широком диапазоне скоростей. Дальнейшие результаты исследований показали, что эту систему можно в значительной степени упростить путем изменения размеров и положения путевых контуров.

Рассмотрим несколько вариантов упрощения системы с четырьмя полюсами путевых контуров.

Анализ характера взаимодействия сверхпроводящего магнита и двух полос контуров показал при их взаимном перемещении, что устойчивого движения транспортного средства можно достигнуть путем применения полос контуров одинаковой ширины (I вариант). Так, в частности было показано на основании теоретических исследований, что ширина путевых контуров может быть существенно уменьшена и при рациональном их взаимном размещении, так же как и рациональном размещении сверхпроводящих магнитов достигается устойчивое левитационное движение экипажа в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры. Однако размеры контуров и сверхпроводящих магнитов и их взаимное расположение в состоянии равновесия должны удовлетворять условию: при взаимном перемещении в поперечном направлении движущихся вдоль оси магнитов относительно путевых контуров касательные электродинамические силы должны иметь нисходящую зависимость от поперечных перемещений магнитов, а вертикальные электродинамические силы должны иметь минимальные значения, соответствующие состоянию равновесия магнитов, по сравнению с другими значениями этих сил в смещенном их положении в поперечном направлении.

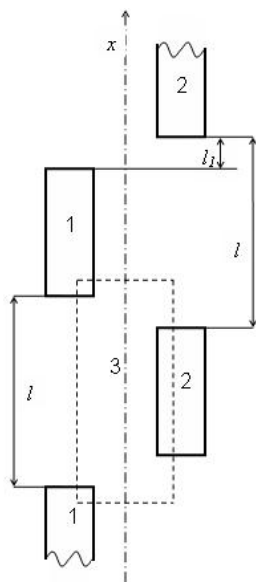


Рис. 1. Схема размещения полос (1, 2) контуров под одной полосой (3) магнитов (II вариант)

Во втором варианте упрощенных схем укладки путевых контуров на плоской путевой структуре рассмотрен случай, когда соседние контуры каждой из двух полос смещены отно-

сительно друг друга на расстояние, превышающее длину контуров, и контуры каждой из полос уложены с шагом вдоль путевой структуры, превышающим их длину (см. рис. 1). Под другой полосой магнитов контуры расположены симметрично относительно продольной оси.

Третий вариант упрощенной схемы размещения контуров отличается от второго тем, что контуры соседних полос не смещены относительно друг друга и расположены друг против друга (см. рис. 2). В случае небольшого зазора в продольном направлении между контурами l , соответствующего значению 0,05 м, этот вариант соответствует расчетной схеме, изложенной в работе [1].

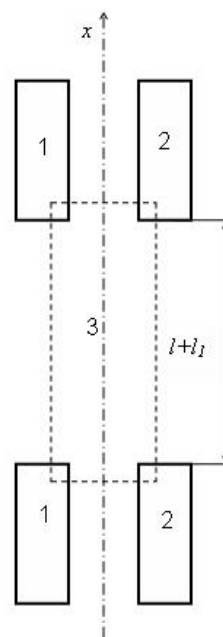


Рис. 2. Схема размещения полос (1, 2) контуров под одной полосой (3) магнитов (III вариант)

Оценку колебаний и устойчивости левитационного движения экипажей будем проводить для электромеханической системы, состоящей из 3 твердых тел: кузова экипажа и двух его тележек (с жестко прикрепленными к ним по восемь сверхпроводящих магнитов), соединенных между собой упруго-диссипативными элементами в вертикальном и поперечном направлениях, а также из токопроводящих прямоугольных контуров путевой структуры.

Оценивались линейные перемещения твердых тел: кузова и тележек экипажей в вертикальном и поперечном направлениях z_k, z_i и y_k, y_i ($i = 1, 2$ – индексы для обозначения номеров тележек), угловые перемещения твердых тел θ_k, θ_i – при боковой качке, φ_k, φ_i – при галопировании, Ψ_k, Ψ_i – при вилянии, а также

ускорения кузова в вертикальном и поперечном направлениях – \ddot{z}_k, \ddot{y}_k .

Математические модели для исследуемых систем были получены с помощью уравнений Лагранжа II-го рода, описывающих движение твердых тел, и уравнений токов в замкнутых контурах. Расчеты были выполнены с учетом связанности дифференциальных уравнений, описывающих пространственное положение кузова и тележек экипажа и изменение токов в путевых контурах [1, 2].

Оценка левитационного движения экипажей проводилась для участка путевой структуры следующего очертания в плане: прямолинейный участок пути 300 м, входная переходная кривая длиной 500 м, круговая кривая радиусом 8000 м с углом поперечного наклона поверхности путевой структуры к горизонтальной плоскости 0,1 рад и длиной 150 м, выходная переходная кривая протяженностью 400 м и прямая длиной 250 м. Углы наклона поверхности путевой структуры к горизонтальной плоскости в переходных кривых принимались пропорциональными кривизне пути, которая изменялась по синусоидальной зависимости от нуля до значения, равного кривизне пути в круговой кривой [3].

Рассмотрим полученные результаты расчетов для исследуемых транспортных систем при следующих значениях основных параметров: масса кузова экипажа 25,0 т, масса тележки с магнитами 3,75 т, коэффициенты жесткости и вязкости элементов рессорного подвешивания в вертикальном и поперечном направлениях 200 кН/м и 20 кН·с/м, соответственно.

Ширина контуров, соответствующих I варианту их размещения на путевой структуре, принята равной 0,2 м. Для II и III варианта ширина контуров принималась одинаковой и равной 0,3 м, а диаметр прутков контуров для всех случаев – 0,03 м. Ширина соленоидов всех магнитов принята равной 0,5 м, а их длина – 1,2 м. Расстояние между путевыми контурами в продольном направлении принять равным 0,1 м для I варианта и 1,1 м для II и III вариантов при длине их, равной 1,0 м, а в поперечном направлении 0,2 м для I варианта и 0,1 м для II и III вариантов.

Эти исходные данные для контуров и соленоидов были получены путем подбора их рациональных значений, при которых имеет место устойчивое левитационное движение транспортного средства при необходимом для обеспечения левитации значении намагничи-

вающей силы в диапазоне скоростей 30 и 100 м/с.

Результаты проведенных расчетов показали, что для всех рассмотренных вариантов имеет место левитационное движение экипажей в прямолинейных и криволинейных участках путевой структуры, причем высота левитации тележек экипажа также как и углы галопирования и виляния кузова и тележек экипажей, практически не зависят от кривизны пути. Их значения быстро затухают вследствие возмущений, обусловленных начальными значениями перемещений твердых тел.

На кривизну пути реагируют перемещения бокового откоса, боковой качки и левитационные зазоры между сверхпроводящими магнитами, соответствующими левой и правой сторонам экипажа, и путевой структурой. Поэтому для оценки левитационного движения различных вариантов транспортных систем приведем экстремальные значения этих величин и значений намагничивающих сил, обеспечивающих левитацию экипажа.

Так, для I-го варианта выбранных параметров путевых контуров при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов, равной $5,0 \cdot 10^5$ А витков, получены следующие экстремальные значения оцениваемых величин:

а) скорость движения 30 м/с ;

высота левитации сверхпроводящих магнитов над путевыми контурами $\Delta_j = 0,106...0,140$ м; перемещения бокового откоса кузова и тележек y_k, y_j ($i=1, 2$) (экстремальные их значения получены в круговой кривой) равны, соответственно, 0,053 м и 0,021 м; угловые изменения бокового откоса кузова и тележек θ_k и θ_i ($i=1, 2$) равны 0,0135 и 0,0046 рад; ускорение кузова в вертикальном и поперечном направлениях $\ddot{z}_k = 0,07$ м/с²; $\ddot{y}_k = 0,95$ м/с²; значения поперечных электродинамических сил, действующих на один магнит, $F_S = 41,8$ кН ;

б) скорость движения 100 м/с ;

$\Delta_j = 0,186...0,192$ м ; $y_k = -0,033$ м ; $y_i = -0,017$ м ; $\theta_k = -0,007$ рад; $\theta_i = -0,003$ рад; $\ddot{z}_k = 0,01$ м/с²; $\ddot{y}_k = 0,3$ м/с²; $F_S = 83$ кН .

Для II-го варианта параметров путевых контуров при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов $6,7 \cdot 10^5$ А витков получены следующие значе-

ния величин, принятых для оценки левитационного движения экипажа:

а) скорость 30 м/с;

$$\Delta_j = 0,092...0,119 \text{ м}; y_k = 0,052 \text{ м}; y_i = 0,01 \text{ м}; \\ \theta_k = 0,018 \text{ рад}; \theta_i = 0,0115 \text{ рад}; \ddot{z}_k = -0,012 \text{ м/с}^2; \\ \ddot{y}_k = -0,87 \text{ м/с}^2; F_S = 48 \text{ кН};$$

б) скорость 100 м/с;

$$\Delta_j = 0,197...0,203 \text{ м}; y_k = -0,0145 \text{ м}; \\ y_i = -0,0024 \text{ м}; \theta_k = -0,052 \text{ рад}; \theta_i = -0,023 \text{ рад}; \\ \ddot{z}_k = 0,005 \text{ м/с}^2; \ddot{y}_k = 0,2 \text{ м/с}^2; F_S = 38 \text{ кН}.$$

Для III-го варианта параметров путевых контуров при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов $7 \cdot 10^5$ А витков получены следующие значения величин, принятых для оценки левитационного движения транспортного средства:

а) скорость 30 м/с;

$$\Delta_j = 0,112...0,147 \text{ м}; y_k = 0,056 \text{ м}; y_i = 0,0094 \text{ м}; \\ \theta_k = 0,022 \text{ рад}; \theta_i = 0,013 \text{ рад}; \ddot{z}_k = 0,012 \text{ м/с}^2; \\ \ddot{y}_k = -0,87 \text{ м/с}^2; F_S = 75 \text{ кН};$$

б) скорость 100 м/с;

$$\Delta_j = 0,213...0,233 \text{ м}; y_k = -0,027 \text{ м}; \\ y_i = -0,0027 \text{ м}; \theta_k = -0,0123 \text{ рад}; \theta_i = -0,01 \text{ рад}; \\ \ddot{z}_k = 0,02 \text{ м/с}^2; \ddot{y}_k = 0,28 \text{ м/с}^2; F_S = 60 \text{ кН}.$$

Т.к. для II и III вариантов рассматривался случай, когда ширина путевых контуров была равна 0,3 м, оценим левитационное движение транспортного средства при этом значении путевого контура, но примем расстояние в продольном направлении между путевыми контурами равным 0,1 м (вариант Ia). Приведем также для этого случая принятые показатели, характеризующие левитационные качества экипажа при значении намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов $4,30 \cdot 10^5$ А витков:

а) скорость 30 м/с;

$$\Delta_j = 0,104...0,132 \text{ м}; y_k = 0,051 \text{ м}; y_i = 0,0095 \text{ м}; \\ \theta_k = 0,0118 \text{ рад}; \theta_i = 0,0115 \text{ рад}; \ddot{z}_k = 0,05 \text{ м/с}^2; \\ \ddot{y}_k = -0,99 \text{ м/с}^2; F_S = 59 \text{ кН};$$

б) скорость 100 м/с;

$$\Delta_j = 0,176...0,187 \text{ м}; y_k = -0,022 \text{ м}; \\ y_i = -0,004 \text{ м}; \theta_k = -0,0084 \text{ рад}; \\ \theta_i = -0,0048 \text{ рад}; \ddot{z}_k = 0,05 \text{ м/с}^2; \ddot{y}_k = 0,2 \text{ м/с}^2; \\ F_S = 32 \text{ кН}.$$

Следует отметить, что транспортную систему с четырьмя полосами путевых контуров, в которой расстояние в продольном направлении составляет 0,1 м, можно упростить путем уменьшения ширины контуров до значения, равного 0,15 м, и увеличения зазора между контурами в поперечном направлении до 0,27 м. Однако в этом случае намагничивающая сила в соленоидах сверхпроводящих магнитов составляет 585 кН при значении $\Delta_j = 0,131$ м при $v = 30$ м/с и $\Delta_j = 0,178$ м при $v = 100$ м/с.

Таким образом, на основании приведенных результатов расчетов можно заключить, что упрощение путевой структуры за счет уменьшения расхода материала на токопроводящие контуры связано с увеличением намагничивающей силы в соленоидах сверхпроводящих магнитов.

Кроме того, следует подчеркнуть, что уменьшения намагничивающей силы можно достигнуть за счет чередования знаков токов в соленоидах магнитов, расположенных на каждой из сторон транспортного средства при небольшом продольном расстоянии между магнитами. Это видно из результатов расчетов, приведенных в работе [1], где для системы с четырьмя полосами путевых контуров шириной 0,30 м и расстоянием в продольном и поперечном направлениях, равном 0,1 м. при значении намагничивающей силы, равной $3,8 \cdot 10^5$ А витков, получены примерно такие же значения левитационных зазоров, как и для системы, в которой токи в соленоидах магнитов приняты одинакового направления

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электродинамическая транспортная система с плоской путевой структурой [Текст] / А. А. Зевин и др. // Техническая механика. – 2004. – № 2. – С. 120-122.
2. Дзензерский, В. А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах [Текст] / В. А. Дзензерский, Н. А. Радченко. – Д., 2003. – 231 с.
3. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст] / Г. М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1969. – 536 с.

Поступила в редколлегию 01.02.2010.

Принята к печати 09.02.2010.

ВЫБОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

Наведено аналіз експериментальних методів визначення механічних втрат потужності в тягових електричних двигунах постійного струму.

Приведен анализ экспериментальных методов определения механических потерь мощности в тяговых электрических двигателях постоянного тока.

The analysis of experimental methods for determination of mechanical losses of power in the hauling electric engines of direct current is presented.

Механические потери в тяговых электрических машинах обычно определяются в режиме холостого хода при последовательном возбуждении [1]. В принципе эти же потери могут быть определены и при независимом возбуждении тяговых электродвигателей при условии, что их режим работы будет соответствовать минимуму суммы электрических и магнитных потерь. При соблюдении данного условия точность определения механических потерь при независимом возбуждении может быть выше, чем при последовательном.

Значительная жесткость зависимости момента двигателя независимого возбуждения от частоты вращения якоря обеспечивает более простые условия снятия характеристики благодаря малости времени переходных процессов при регулировании напряжения.

Принципиальные электрические схемы, по которым могут быть сняты характеристики механических потерь при работе двигателей с последовательным и независимым возбуждением, приведены на рис. 1 и 2, соответственно.

При последовательном возбуждении используется один источник электрической мощности «И» с напряжением $U_{и}$, к которому подключаются последовательно соединенные обмотки якоря и возбуждения.

При независимом возбуждении обмотка якоря электродвигателя подключена к источнику электрической мощности «И1» с напряжением $U_{и}$, а обмотка возбуждения питается током $I_{в}$ от другого источника электрической мощности «И2».

В обоих случаях электродвигатель работает в режиме холостого хода, при котором вся потребляемая из сети мощность компенсируется

суммарными потерями в нём. В дальнейшем будем рассматривать только электрические, магнитные и механические потери мощности в испытуемом электродвигателе. Пренебрежение добавочными потерями в данном анализе может быть оправдано их малостью в рассматриваемом режиме холостого хода [2].

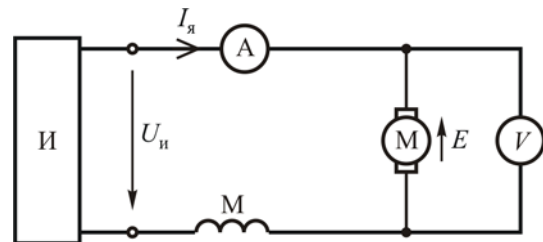


Рис. 1

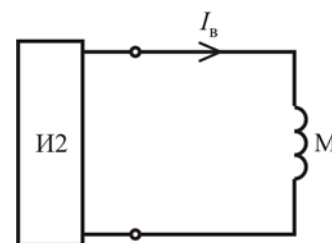
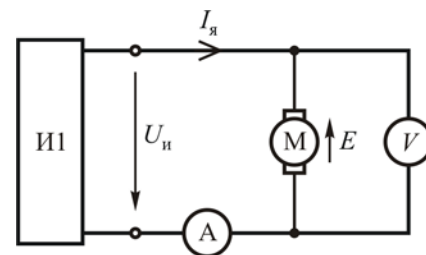


Рис. 2

С помощью вольтметра «V» и амперметра «А» определяются напряжение и ток якоря испытуемого электродвигателя.

Значение механических потерь в двигателе для любой из схем испытания рассчитывается

как мощность $P_{\text{пот}}$, потребляемая его якорем при установившемся режиме холостого хода:

$$P_{\text{пот}} = U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение на зажимах якоря;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря.

Баланс мощностей для якоря при постоянной частоте его вращения имеет вид:

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность;

$\Delta P_{\text{э}}$ – электрические потери в якоре.

Электромагнитная мощность будет определяться в виде:

$$P_{\text{эм}} = E \cdot I_{\text{я}}, \quad (3)$$

где E – э.д.с. якоря.

Электрические потери в цепи якоря испытуемого электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{эм}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря.

При холостом ходе электромагнитная мощность электродвигателя уравнивается магнитными и механическими потерями $\Delta P_{\text{маг}}$ и $\Delta P_{\text{мех}}$, соответственно:

$$P_{\text{эм}} = \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}}. \quad (5)$$

Объединив формулы (2) и (5), получим баланс мощностей в виде:

$$P_{\text{пот}} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{э}}. \quad (6)$$

Относительно точное определение механических потерь для любой из приведенных схем испытаний по формуле (1) возможно при условии, что механические потери намного больше суммы магнитных и электрических потерь:

$$\Delta P_{\text{мех}} \gg \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{э}}. \quad (7)$$

Только в этом случае можно считать, что механические потери приблизительно равны электрической мощности, потребляемой якорем электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}. \quad (8)$$

Т.е., условием возможности использования формулы (8) для определения механических потерь с минимальной ошибкой будет минимум суммы остальных потерь в якоре $\Delta P_{\text{мэ}}$:

$$\Delta P_{\text{мэ}} = \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{э}} \rightarrow \min. \quad (9)$$

При выполнении условия (9) можно считать справедливым выражение равенства потребляемой, электромагнитной мощности и мощности механических потерь:

$$P_{\text{пот}} \approx P_{\text{эм}} \approx \Delta P_{\text{мех}}. \quad (10)$$

Определим режим работы электродвигателя, при котором будет выполняться условие (9). Будем считать возможным раздельное регулирование напряжения на якоре $U_{\text{я}}$ и тока возбуждения $I_{\text{в}}$ испытуемой электрической машины.

Выразим суммарные потери $\Delta P_{\text{мэ}}$ через э.д.с. и ток якоря. Предварительно представим магнитные потери как пропорциональные квадрату э.д.с.:

$$\Delta P_{\text{маг}} = K_{\text{м}} \cdot E^2, \quad (11)$$

где $K_{\text{м}}$ – параметр электродвигателя, постоянный при неизменной частоте вращения его якоря [3].

Подставив (4) и (12) в (11), получим:

$$\Delta P_{\text{мэ}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 + K_{\text{м}} \cdot E^2. \quad (12)$$

Определим, при каком токе $I_{\text{я}}$ и э.д.с. E будет выполняться условие (9). При этом будем учитывать, что в соответствии с (3) и (10)

$$\Delta P_{\text{мех}} = E \cdot I_{\text{я}}. \quad (13)$$

Причем, принимая во внимание условие постоянства частоты вращения якоря, будем считать $\Delta P_{\text{мех}} = \text{const}$.

Проведя анализ функции $\Delta P_{\text{мэ}}(I_{\text{я}}, E)$ на предмет определения точек экстремума, нетрудно убедиться, что её минимум находится в точке, для которой электрические потери в якоре равны магнитным потерям, т.е.:

$$R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = K_{\text{м}} E^2. \quad (14)$$

Для этого режима работы электродвигателя будут справедливы выражения для определения оптимальных значений тока якоря $I_{\text{я0}}$ и э.д.с. E_0 , обеспечивающих минимум суммы электрических и магнитных потерь:

$$I_{\text{я0}} = \sqrt{\Delta P_{\text{мех}} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{м}}}{R_{\text{я}}}}}; \quad (15)$$

$$E_0 = \sqrt{\Delta P_{\text{мех}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{K_{\text{м}}}}}. \quad (16)$$

Оптимальное соотношение э.д.с. и тока якоря испытуемого электродвигателя при этом будет выглядеть как:

$$\frac{E_o}{I_{яo}} = \sqrt{\frac{R_{я}}{K_{м}}} \quad (17)$$

Практическое использование выражений (15)–(17) весьма затруднительно в связи с невозможностью точной предварительной оценки всех параметров, входящих в эти формулы, в том числе и самих механических потерь, определение которых является целью испытаний. Однако, если предположить известным отношение электрических и магнитных потерь в тяговом электродвигателе для номинального режима $\Delta P_{эH} / \Delta P_{магH}$, то можно найти оптимальное соотношение напряжения и тока якоря, обеспечивающее минимальную ошибку в определении механических потерь при любой частоте вращения.

Как правило, отношение электрических и магнитных потерь для любого испытуемого тягового электродвигателя может быть достаточно точно оценено еще до проведения испытаний даже по приблизительным значениям его типовых параметров.

Электрические и магнитные потери в номинальном режиме, соответственно:

$$\Delta P_{эH} = R_{я} I_{яH}^2 \quad (18)$$

$$\Delta P_{магH} = K_{м} E_{H}^2 \quad (19)$$

Отношение потерь в номинальном режиме:

$$\frac{\Delta P_{эH}}{\Delta P_{магH}} = \frac{R_{я}}{K_{м}} \cdot \left(\frac{I_{яH}}{E_{H}} \right)^2 \quad (20)$$

Учитывая, что оптимальное отношение э.д.с. и тока якоря электродвигателя определяется выражением (17), путем исключения отношения $R_{я} / K_{м}$ получим:

$$\frac{E_o}{I_{яo}} = \frac{E_{H}}{I_{яH}} \sqrt{\frac{\Delta P_{эH}}{\Delta P_{магH}}} \quad (21)$$

При выполнении условия (9) э.д.с. якоря можно считать приблизительно равной напряжению на нем. Тогда выражение (21) можно записать в более удобном для практического использования виде:

$$\frac{U_o}{I_{яo}} = \frac{U_{H}}{I_{яH}} \sqrt{\frac{\Delta P_{эH}}{\Delta P_{магH}}} \quad (22)$$

Обеспечение оптимального соотношения напряжения и тока якоря при определении механических потерь электродвигателя достаточно легко достижимо в случае использования независимого возбуждения и, как правило, невыполнимо при последовательном возбуждении. Тем не менее, при проведении квалификационных испытаний для определения этого вида потерь используют последовательное возбуждение испытуемого электродвигателя.

Использование последовательного возбуждения при определении механических потерь автоматически обеспечивает относительно равномерное распределение электрических и магнитных потерь за счет одновременного снижения магнитного потока при уменьшении тока. Отношение этого вида потерь при последовательном возбуждении для каждого типа электродвигателя будет определяться видом его кривой намагничивания.

На рис. 3. кривая намагничивания электродвигателя схематично приведена в виде зависимости его э.д.с. от силы тока при условии постоянства частоты вращения якоря. Для простоты анализа будем считать частоту вращения якоря, равной номинальному значению, при котором току $I_{яH}$ соответствует э.д.с. E_{H} .

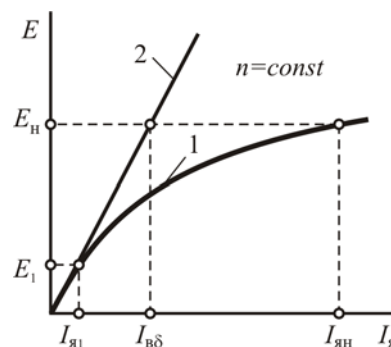


Рис. 3

Кривая 1 на рис. 3 представляет собою зависимость э.д.с. от тока якоря, а прямая 2 является касательной к кривой 1 в точке, соответствующей началу координат.

Как и при анализе схемы с независимым возбуждением будем считать известным отношение электрических и магнитных потерь в номинальном режиме $\Delta P_{эH} / \Delta P_{магH}$.

В режиме холостого хода, при котором измеряются механические потери, ток и э.д.с. якоря уменьшаются до значений $I_{я1}$ и E_1 , соответственно. При этом точка, соответствующая холостому ходу, оказывается на линейной части характеристики 1, для которой отношение $E_1 / I_{я1}$ отлично от значения $E_{H} / I_{яH}$, и

может быть определено из выражения для коэффициента магнитного насыщения электромашины:

$$K_n = \frac{I_{ян}}{I_{яб}}, \quad (24)$$

где $I_{яб}$ – ток возбуждения и он же якоря, который создаёт магнитодвижущую силу, компенсирующую падение напряжения в воздушном зазоре магнитной цепи электродвигателя.

Из рис.3 видно, что $(E_1/I_{я1}) = (E_n/I_{яб})$. Тогда с учетом выражения (24) получим равенство:

$$\frac{E_1}{I_{я1}} = K_n \cdot \frac{E_n}{I_{ян}}. \quad (25)$$

При последовательном возбуждении в режиме холостого хода при любом значении механических потерь $\Delta P_{мех}$ отношение $E_1/I_{я1}$ будет определяться именно выражением (25).

Заменив в (25) э.д.с. на напряжения, что допустимо, учитывая условие (9), которое автоматически частично выполняется и для последовательного возбуждения, получим новое выражение:

$$\frac{U_1}{I_{я1}} = K_n \cdot \frac{U_n}{I_{ян}}. \quad (26)$$

Ошибка в определении механических потерь на холостом ходу при последовательном возбуждении будет определяться степенью отклонения отношения $U_1/I_{я1}$ от оптимального значения $U_o/I_{яо}$. Минимальная ошибка будет соответствовать условию равенства этих отношений:

$$\frac{U_1}{I_{я1}} = \frac{U_o}{I_{яо}}. \quad (27)$$

С учетом выражений (22) и (26) это же условие может быть записано в виде оптимального соотношения электрических и магнитных потерь мощности в тяговом электродвигателе при номинальном режиме:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{эн}}{\Delta P_{магн}}} = K_n. \quad (28)$$

В случае, когда электрические потери при холостом ходе больше магнитных потерь, справедливо неравенство:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{эн}}{\Delta P_{магн}}} > K_n. \quad (29)$$

Когда же магнитные потери при холостом ходе выше электрических потерь, имеет место другое неравенство:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{эн}}{\Delta P_{магн}}} < K_n. \quad (30)$$

И в случае (29), и в случае (30) ошибка в определении механических потерь больше, чем при условии (28). При этом необходимо отметить, что рассчитанные по показаниям приборов (амперметра и вольтметра) механические потери всегда больше реального их значения на сумму электрических и магнитных потерь в испытуемом электродвигателе.

В современных мощных тяговых электродвигателях постоянного и пульсирующего тока, как правило, при длительном и часовом режиме выполняется условие (30). Но отклонение от условия (28) при этом незначительно. Для двигателей малой мощности с самовентиляцией и большой долей механических потерь отклонение от условия (28) при испытании с последовательным возбуждением может быть существенным.

Уменьшение ошибки в определении механических потерь в электродвигателях с большим коэффициентом магнитного насыщения и высокой долей магнитных потерь при номинальном режиме может быть достигнуто путём шунтирования обмотки возбуждения.

Наиболее точное определение механических потерь может быть обеспечено при независимом возбуждении электродвигателя путём выбора оптимального соотношения напряжения и тока якоря при испытании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тягове [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
2. Проектирование тяговых электрических машин. [Текст] / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
3. Афанасов, А. М. Универсальные характеристики магнитных потерь в тяговых электрических машинах [Текст] / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 59-62.

Поступила в редколлегию 18.03.2010.
Принята к печати 31.03.2010.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Показано використання асинхронного частотнорегульованого тягового електропривода при значному збільшенні потужності та швидкості електровоза.

Показано использование асинхронного частотнорегулируемого тягового электропривода при существенном увеличении мощности и скорости электровоза.

In the article the use of asynchronous tractive electric drive controlled by frequency, when the power and speed of electric locomotive is greatly increased, is shown.

Вступ

У будь-якому електроприводі електродвигун постійного або змінного струму завжди залишається «серцем» привода. Всі інші елементи тягового електропривода лише створюють йому умови, за яких би він забезпечував всі вимоги цього привода. Повною мірою це відноситься до найбільш простого, надійного, легкого і дешевого асинхронного тягового двигуна. Незважаючи на таку позитивну характеристику, як показав досвід, створення нового двигуна – це тривалий і трудомісткий багаторічний процес. Тому слід прагнути або використовувати вже «доведені до ладу» в експлуатації тягові двигуни, або їх же з мінімальними доробками. В даний час виникло питання про необхідність створення нового асинхронного тягового двигуна, більш потужного, ніж сучасний двигун СТА1200 електровоза ДСЗ.

Мета роботи

Розглянути питання про можливість підвищення потужності трифазного двигуна СТА1200 без його переробки, за рахунок збільшення моменту та швидкості обертання.

Матеріал і результати дослідження

Двигун СТА1200 має такі номінальні параметри:

- тривала потужність: $P_{\text{ном}} = 1200$ кВт;

- напруга лінійна / фазна:

$$\frac{U_{\text{л}}}{U_{\text{ф}}} = 1870 / 1080 \text{ В};$$

- частота напруги живлення: $f_{1 \text{ ном}} = 58$ Гц;

- частота обертання: $n_{\text{ном}} = 1138$ об/хв;

- максимальна частота: $f_{1 \text{ max}} = 154,4$ Гц;

- максимальная частота обертання:

$$n_{\text{max}} = 3030 \text{ об/хв};$$

- обмотки статора з'єднані «зіркою»;

- струм статора: $I_1 = 450$ А;

- ізоляція класу «Н»;

- кінцевий перегрів обмотки статора:

$$\tau_{\text{кн}} = 150 \text{ }^\circ\text{C};$$

- коефіцієнт корисної дії: $\eta_{\text{ном}} = 0,935$.

За результатами кваліфікаційних випробувань визначені втрати холостого ходу і короткого замикання, що відповідно дорівнюють $p_0 = 18$ кВт і $p_k = 65,3$ кВт, коефіцієнт втрат

$$\alpha = \frac{p_0}{p_k} = 0,276.$$

Ковзання двигуна в номінальному режимі при синхронній частоті обертання:

$$n_1 = \frac{f_{1 \text{ ном}} \cdot 60}{p}, \quad (1)$$

$$n_1 = \frac{58 \cdot 60}{3} = 1160 \text{ об/хв},$$

буде дорівнювати:

$$S = \frac{1160 - 1138}{1160} = 0,019.$$

Як видно, без великої похибки для подальших розрахунків, величиною ковзання можна знехтувати, тобто приймати $S \approx 0$.

Ідеалізована механічна характеристика, на якій працює двигун, представлена на рис. 1.

Ця характеристика має дві характерних ділянки: ділянка ab , на якій відбувається регулювання амплітуди і частоти напруги за законом

$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ і де обертовий момент

$M = \text{const}$; ділянка bc (від точки номінального

режиму b до точки максимальної кутової швидкості c), на якій амплітуда напруги незмінна ($U_1 = \text{const}$), а змінюється лише частота, і яка представляє собою криву гіперболічного вигляду. Рівняння ділянки bc : $\omega \cdot \sqrt{M} = \text{const}$ [1].

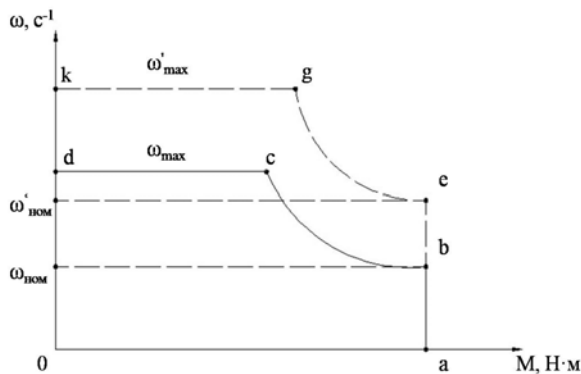


Рис. 1. Ідеалізована механічна характеристика

Як відомо, потужність електродвигуна:

$$P = \omega \cdot M, \quad (2)$$

тому підвищення потужності може бути виконано або в бік підвищення моменту (правіше точки a на рис. 1), або в бік збільшення номінальної швидкості $\omega_{\text{ном}}$, тобто вище точки b на рис. 1. Перший випадок вже досліджувався [2]. Він показав, що теоретично двигун СТА1200 допускає підвищення потужності шляхом підвищення моменту, тобто сили тяги електровоза. Однак, в результаті проведених розрахунків, підтверджених випробуваннями, з'ясувалося, що лінія ab на рис. 1 практично являє собою лінію обмеження сили тяги (тобто моменту двигуна) по зчепленню. Тому збільшення моменту двигуна недоцільне: він все одно не може бути використаний в експлуатації. Але якщо на ділянці ab $M = \text{const}$, значить і магнітний потік $\Phi = \text{const}$ [1]. Момент асинхронного двигуна:

$$M = C_M \Phi I_2' \cos \varphi_2, \quad (3)$$

де C_M – стала; I_2' – приведений струм ротора; φ_2 – кут зсуву фаз між векторами ЕРС і струму ротора.

З умови сталості моменту випливає, що струм $I_2' = \text{const}$. Але для асинхронного двигуна струм статора:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}_2'), \quad (4)$$

де \underline{I}_0 , при $\Phi = \text{const}$ – незмінний струм холостого ходу, отже і струм статора $I_1 = \text{const}$ [1].

Лінія cd визначена максимальною швидкістю руху електропривода $\vartheta_{\text{max}} = 160$ км/год, що відповідає кутовій швидкості:

$$\omega_{\text{max}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{max}}}{30}, \quad (5)$$

$$\omega_{\text{max}} = \frac{\pi \cdot 3030}{30} = 317 \text{ с}^{-1}.$$

В номінальному режимі (точка b на рис. 1) момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{1200 \cdot 10^3}{1138} = 10^4 \text{ Н/м}.$$

Розглянемо тепер можливість, при незмінних механічній передачі та діаметрі ведучого колеса електропривода, збільшити швидкість руху до $\vartheta_{\text{max}}' = 250$ км/год. Цій швидкості буде відповідати пунктирна характеристика egk на рис. 1 і нова точка номінального режиму e , в якій нова номінальна потужність має дорівнювати $P_{\text{ном}} = 1600$ кВт. Асинхронний двигун живиться від перетворювача (інвертора напруги), який невіддільний від двигуна так само, як невіддільний колектор (інвертор) від якоря двигуна постійного струму. Тому нова потужність двигуна і новий діапазон регулювання повинні бути обрані з урахуванням параметрів напівпровідникових вентилів перетворювача. Якщо в точці b на рис. 1:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30}, \quad (7)$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot 1138}{30} = 119 \text{ с}^{-1},$$

то в точці e швидкість зростає прямо пропорційно потужності, тоді:

$$\omega_{\text{ном}}' = \frac{1600}{1200} \cdot 119 = 158,7 \text{ с}^{-1},$$

а частота напруги живлення буде дорівнювати:

$$f_{1 \text{ ном}}' = \frac{1600}{1200} \cdot 58 = 77,3 \text{ Гц},$$

що відповідає частоті обертання $n_{\text{ном}}' = 1517$ об/хв.

На ділянці ab механічної характеристики відношення амплітуди до частоти напруги живлення дорівнює:

$$\frac{U_{1\phi}}{f_{1\text{ ном}}} = \frac{1080}{58} = 18,62 = \text{const}.$$

Ця ж величина збережеться і на ділянці be , оскільки значення моменту залишається незмінним. Тоді в точці нового номінального режиму напруга буде:

$$U_{1\text{ ном}} = f'_{1\text{ ном}} \cdot \frac{U_{1\phi}}{f_{1\text{ ном}}}, \quad (8)$$

$$U_{1\text{ ном}} = 77,3 \cdot 18,62 = 1440 \text{ В},$$

а $U'_{\text{ІІ}} = 2494 \text{ В}$. Відзначимо, що нинішній рівень ізоляції двигуна – 3000 В.

При подальшому русі по характеристиці на ділянці eg напруга $U_{1\phi}$ залишається незмінною, а змінюється лише частота f_1 . Оскільки, як відомо, напруга практично пропорційна добутку частоти на магнітний потік, то в міру зростання частоти (швидкості руху) магнітний потік буде зменшуватись. В точці b номінальна швидкість руху електровоза ДСЗ дорівнює $\vartheta_{\text{ном}} = 69,3 \text{ км/год}$, отже в точці e нова номінальна швидкість досягне значення $\vartheta'_{\text{ном}} = 92,4 \text{ км/год}$.

При максимальній швидкості руху $\vartheta'_{\text{мах}} = 250 \text{ км/год}$ частота:

$$f'_{1\text{ мах}} = \frac{250}{92,4} \cdot 77,3 = 209 \text{ Гц},$$

що є допустимим для IGBT-транзисторів, які використовуються в сучасних інверторах напруги.

Максимальна кутова швидкість при цьому стане:

$$\omega_{\text{мах}} = 158,7 \cdot \frac{209}{77,3} = 429 \text{ с}^{-1},$$

тобто $n'_{\text{мах}} \approx 4100 \text{ об/хв}$.

Така частота обертання не представляє небезпеки для короткозамкненого ротора двигуна, однак потребує застосування нових швидкохідних підшипників. Розглянемо тепер можливість такого підвищення потужності двигуна з точки зору його нагріву, а також його енергетичні показники. Як вже зазначалося вище, при переході з точки b на рис. 1 в точку нового но-

мінального режиму e момент двигуна, його струм I_1 , а, отже, і втрати короткого замикання залишаться незмінними.

Зміняться лише втрати холостого ходу, які являють собою втрати в сталі і дуже малі механічні втрати. Останніми для простоти подальшої викладки ми нехтуємо.

Відомо [1], що втрати в сталі пропорційні добутку $f_1^{1,3} \cdot B^2$, де B – індукція, пропорційна магнітному потоку. Під час руху по ділянці характеристики ae , відповідно до зазначеного вище, магнітний потік $\Phi = \text{const}$, значить і $B = \text{const}$ і тоді втрати холостого ходу зміняться лише у зв'язку зі зміною частоти і в точці e досягнуть значення:

$$p'_0 = p_0 \left(\frac{f'_{1\text{ ном}}}{f_{1\text{ ном}}} \right)^{1,3}, \quad (9)$$

$$p'_0 = 18 \left(\frac{77,3}{58} \right)^{1,3} = 26,1 \text{ кВт}.$$

А оскільки $p_k = \text{const}$, то сумарні втрати в новому номінальному режимі будуть дорівнювати:

$$\sum p' = p'_0 + p_k, \quad (10)$$

$$\sum p' = 26,1 + 65,3 = 91,4 \text{ кВт}.$$

Оскільки у відносно вузькому діапазоні температур можна приймати кінцевий перегрів (перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища) $\tau_{\text{кн}}$ пропорційним сумі втрат [1], то в точці e характеристики на рис. 1 очікуваний перегрів складе:

$$\tau'_{\text{кн}} = \tau_{\text{кн}} \frac{\sum p'}{\sum p}, \quad (11)$$

$$\tau'_{\text{кн}} = 150 \cdot \frac{91,4}{18 + 65,3} \approx 165 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Нами не враховано деяке зростання механічних втрат при переході з точки b в точку e , що, очевидно, має призвести до певного додаткового підвищення температури. Але і при цьому кінцевий перегрів не перевищить допустимого для застосованого в двигуні класу ізоляції «Н», а під час роботи на ділянці характеристики eg втрати будуть тільки зменшуватись, тому що при $U_1 = \text{const}$ з ростом частоти f_1 , значення магнітного потоку буде зменшуватись.

У двигуна СТА1200 ККД $\eta_{\text{ном}} = 0,935$, а коефіцієнт навантаження при цьому $K'_{\text{нг}} = \sqrt{\alpha} = 0,525$, що відповідає потужності $P = 0,525 \cdot 1200 = 630$ кВт.

В точці *e* нового номінального режиму значення ККД буде:

$$\eta'_{\text{ном}} = \frac{P'_{\text{ном}}}{P'_{\text{ном}} + \sum p'} \quad (12)$$

$$\eta'_{\text{ном}} = \frac{1600}{1600 + 91,4} = 0,946,$$

тобто він істотно збільшиться, в порівнянні з попереднім значенням.

Коефіцієнт навантаження, при якому в новому номінальному режимі ККД максимальний, буде:

$$K'_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{P'_0}{P_K}} \quad (13)$$

$$K'_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{26,1}{65,3}} = 0,632,$$

що відповідає потужності:

$$P' = 0,632 \cdot 1600 = 1011 \text{ кВт.}$$

Таким чином, енергетичні показники тягового двигуна при дотриманні закону регулювання $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ і підвищенні значень U_1 и f_1 істотно покращуються.

Оскільки на ділянці характеристики *eg* робота двигуна описується законом регулювання $\omega\sqrt{M} = \text{const}$, а в точці *e* $M_{\text{ном}} = 10^4$ Н·м і $\omega'_{\text{ном}} = 158,7 \text{ с}^{-1}$, то:

$$\omega'_{\text{ном}}\sqrt{M_{\text{ном}}} = 158,7 \cdot \sqrt{10^4} = 15870.$$

Отже, при максимальній швидкості руху 250 км/год в точці *g* двигун розвиватиме момент:

$$M'_{\omega_{\text{max}}} = \left(\frac{\omega'_{\text{ном}}\sqrt{M_{\text{ном}}}}{\omega'_{\text{max}}} \right)^2 = \left(\frac{15870}{429} \right)^2 = 1368 \text{ Н·м.} \quad (14)$$

Як показали розрахунки та тягово-енергетичні випробування електровоза ДСЗ, сила тяги одного тягового двигуна в номінальному режимі, тобто при роботі в точці *b*, становить $F = 62,5$ кН. Очевидно, при роботі в точці *g* сила тяги електровоза, тобто чотирьох тягових двигунів, буде дорівнювати:

$$F'_{\omega_{\text{max}}} = 4,625 \cdot \frac{1368}{10^4} = 34,2 \text{ кН.}$$

Ця величина є вихідною для проведення тягових розрахунків і визначення маси потягу, який може везти такий електровоз зі швидкістю 250 км/год.

Загальні висновки

Асинхронний тяговий двигун СТА1200 при незмінній механічній передачі може без будь-яких змін і доробок (окрім підшипників) використовуватися на електровозі при швидкості руху до 250 км/год, реалізуючи в номінальному режимі при збереженні колишнього обертального моменту потужність 1600 кВт.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу [Текст] : навч. посібник / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак – Д.: Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
2. Безрученко, В. М. Эффективность использования тяговых электродвигателей современного электроподвижного состава [Текст] / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – № 8 (102). – Ч. 2. – К., 2006.

Надійшла до редколегії 14.01.2010.

Прийнята до друку 20.01.2010.

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЇ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ

Проведено аналітичне дослідження комутації тягових двигунів електровозів. Встановлено, що отримані криві зміни струму секцій, що комутують, відповідають теорії середньопрямолинійної комутації. За допомогою запропонованого методу можливо на стадії проектування тягових двигунів спрогнозувати якість комутації і своєчасно її скоректувати.

Проведено аналитическое исследование коммутации тяговых двигателей электровозов. Установлено, что полученные кривые изменения тока коммутируемых секций соответствуют теории среднепрямолинейной коммутации. С помощью предлагаемого метода возможно на стадии проектирования тяговых двигателей прогнозировать качество коммутации и своевременно ее корректировать.

The analytical study of switching of the tractive engines of electric locomotives is conducted. It is found that the obtained curves of change of current of the sections commuted correspond to the theory of average rectilinear switching. By means of the proposed method it is possible on the stage of design of tractive engines to forecast the quality of switching and to correct it timely.

Як відомо, процес зміни струму в секціях обмотки якоря при переході з однієї паралельної вітки в іншу називають комутацією, якість якої в значній мірі визначає надійність тягових електродвигунів (ТЕД) і вартість їх експлуатації.

Одним із головних етапів дослідження комутації ТЕД було осцилографування струмів препарованих комутуючих секцій. Велика кількість осцилограм [1, 2], які були одержані в різних режимах роботи тягових машин дозволяє відмітити наступне. Форми перехідних струмів комутації різних секцій хаотичні, несхожі одна на одну й не підтверджують класичну умову прямолинійної комутації: $di/dt = const$. Форма кривої струму комутації зберігається весь час незмінною, тобто її викривлення не є випадковим і відповідає тільки даному періоду комутації. Збіжність форм кривих струмів комутації даної секції спостерігається навіть при підживленні додаткових полюсів (ДП) ТЕД. Форма кривих струмів комутації наглядно показує, що щітка працює з нерівномірною густиною струму, що також не відповідає класичній теорії комутації.

Л. Дрейфус відмічає [3, 4], що форма кривої перехідного струму визначається майже виключно індуктивністю короткозамкнених витків, що хоч прямолинійна комутація являє собою ідеальний випадок комутації, вона неможлива не тільки практично, але і теоретично. Л. Дрейфус стверджує, що під комутацією «в середньому прямолинійною» розуміється комутація, при якій в кожний момент часу сума

швидкості зміни усіх струмів, що комутують, є постійною.

Середньо прямолинійна комутація задовольняє умові:

$$\sum \frac{di_K}{dt} = const, \quad (1)$$

Відсутність в роботах Л. Дрейфуса експериментального матеріалу, що відноситься до осцилографічному дослідженню комутації, дозволяє проводити дослідження теорії середньопрямолинійної комутації.

Оскільки час оберту якоря на 1 паз дорівнює $t_{\Pi} = u_{\Pi} \beta_K / v_K$, то

$$\sum \frac{di_K}{dt} = \frac{4iu_{\Pi}}{t_{\Pi}} = \frac{4i_A v_K}{\beta_K}, \quad (2)$$

де v_K – швидкість обертання колектора, м/с; β_K – колекторна поділка, м; u_{Π} – кількість провідників на паз; i_A – струм паралельної вітки обмотки якоря; i_K – струм секції, що комутує, А.

Якщо комутація не є в середньому прямолинійною, то сума $\sum \frac{di_K}{dt}$ коливається біля середнього значення $4iv/\beta$. Відхилення від цього середнього значення є часткою, що приходить на «додаткові поперечні струми комутації (додаткові струми короткого замикання)», і вони можуть бути визначені диференціальним рівнянням:

$$\frac{di_D}{dt} = \sum \frac{di_K}{dt} - \frac{4i_A v_K}{\beta_K} \quad (3)$$

У відповідності з класичною теорією комутації, перехідний струм комутації може бути представлений як струм, що змінюється прямо-лінійно, і струм додатковий (поперечний). Якщо б останнього не існувало, то густина струму під щіткою була б рівномірною. Щітка розриває додатковий поперечний струм і це викликає іскріння на колекторі.

Важливість вивчення електромагнітних причин іскріння під щітками підтверджується й характером отриманих осцилограм струмів комутації, незакономірність і хаотичність форм кривих струмів можуть бути пояснені саме дискретним характером щіткового контакту, що не враховує класична теорія комутації.

При проведенні великої кількості дослідів осцилографування струмів комутації в якорях обмоток різних типів не спостерігалось, щоб ці криві струмів були схожі на криві струмів класичної теорії комутації.

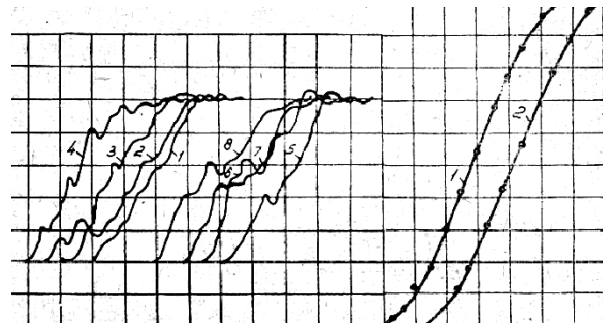


Рис. 1. Перехідні криві комутації секцій

На рис. 1 наведено перехідні криві комутації, що були отримані експериментальним шляхом, і побудовані залежності струмів комутації шару, пазу та декількох пазів в зоні комутації, причому з існуючих різних варіантів, наводяться тільки два варіанта при різних режимах роботи машини з номінальним струмом навантаження.

Фізичні процеси, які відбуваються в комутуючих секціях тягових двигунів, можливо описати наступною системою диференціальних рівнянь (4), з урахуванням ЕРС самоіндукції та взаємоіндукції комутуючих секцій. Для прикладу наводиться 4 етап комутації секцій 2-го пазу (шару).

$$\begin{cases} L_c \frac{di_4}{dt} = -e_k - A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_4 - i_3) \cdot 4}{S} \right] + A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_a - i_4) \cdot 4}{S} \cdot \frac{T}{t} \right] - M \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_3}{dt}; \\ L_c \frac{di_3}{dt} = -e_k - A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_3 - i_2) \cdot 4}{S} \right] + A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_4 - i_3) \cdot 4}{S} \right] - M \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_4}{dt}; \\ L_c \frac{di_2}{dt} = -e_k - A \arctg \left[\frac{B(i_2 - i_1) \cdot 4}{S} \right] + A \arctg \left[\frac{B(i_3 - i_2) \cdot 4}{S} \right] - M \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_3}{dt} - M \frac{di_4}{dt}; \\ L_c \frac{di_1}{dt} = -e_k - A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_1 + i_a) \cdot 4}{S} \cdot \frac{T}{(T-t)} \right] + A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_2 - i_1) \cdot 4}{S} \right] - M \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_3}{dt} - M \frac{di_4}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

де e_k – комутаційна ЕРС, В;

$L_c (di_n / dt)$, $M (di_n / dt)$ – ЕРС самоіндукції та взаємоіндукції секцій, що комутують, відповідно, В;

$A \cdot \arctg [B(i_n - i_k) \cdot 4 / S]$ – апроксимація нелінійної ВАХ контакту щітка-колектор, що набігає, з коефіцієнтами A та B ;

$A \cdot \arctg [B(i_A - i_n) \cdot 4T / S \cdot t]$ – апроксимація нелінійної ВАХ контакту щітка-колектор, що збігає, з коефіцієнтами A та B .

Результати розрахунків системи рівнянь (4) для комутації 12-ти секцій, що знаходяться в 3-х сусідніх пазях якоря, наведені на рис. 2.

На рис. 2 показані криві комутації секцій, які знаходяться у трьох сусідніх пазях (у кож-

ному пазу знаходяться частини чотирьох секцій).

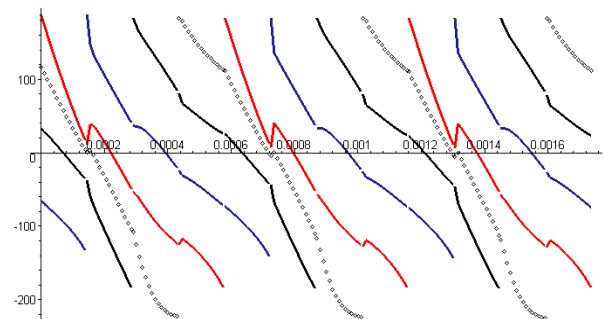


Рис. 2. Криві комутації секцій, які знаходяться у трьох сусідніх пазях якоря

Секція 1, яка знаходиться в першому пазу, починає комутувати першою; секція 4 – комутує остання в першому пазу. Секції 5 та 9 комутують першими в другому та третьому пазах, відповідно

Отже, форма кривої на рис. 3 наглядно підтверджує наявність середньопрямолінійної комутації, яка була отримана шляхом розв'язків системи рівнянь (3). Вона практично збігається з отриманими експериментально кривими рис. 1.

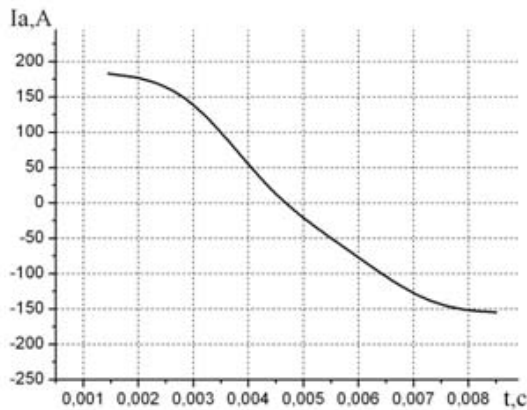


Рис. 3. Криві залежності струмів комутації пазу

Отже, за допомогою сучасних засобів аналітичних досліджень можливо на стадії проектування ТЕД визначати якість комутації, яка прогнозується, і своєчасно її коректувати.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безрученко, В. Н. Экспериментальное подтверждение теории коммутации прямолинейной в среднем [Текст] / В. Н. Безрученко // Электромеханика, Изв. высш. учеб. заведений. – 1968. – № 4. – С. 454-457.
2. Безрученко, В. Н. Современные представления о критериях коммутационной надежности электрических машин постоянного тока [Текст] / В. Н. Безрученко // Транспорт. Труды ДИИТ. – 1969. – Вып. 82. – С. 10-25.
3. Дрейфус, Л. А. Коммутация крупных машин постоянного тока [Текст] / Л. А. Дрейфус. – Стокгольм: Springer, 1929. – 228 с.
4. Дрейфус, Л. А. Теория чувствительности якорных обмоток машин постоянного тока к расстройству условий коммутации [Текст] / Л. А. Дрейфус. – Стокгольм: Acta Polytechnica, 1954. – 176 с.

Надійшла до редколегії 31.03.2010.

Прийнята до друку 08.04.2010.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ЭР2Т И ЕПЛ2Т

Розглянуто перехідні процеси в шунтувальному колі тягових двигунів, якорі та обмотки збудження яких включені в неспровідному напрямку по відношенню до силового струму, що протікає. Запропоновано зміни в колах управління гальмівним перемикачем і в шунтувальному силовому колі тягових двигунів з додатковою установкою резистора з опором 0,5 Ом. Уся ця модернізація дозволить значно підвищити надійність роботи силової схеми електропоїздів ЭР2Т і ЕПЛ2Т у період експлуатації.

Рассмотрены переходные процессы в шунтирующей цепи тяговых двигателей, якоря и обмотки возбуждения которых включены в непроводящем направлении по отношению к протекающему силовому току. Предложены изменения в цепях управления тормозным переключателем и в шунтирующей силовой цепи тяговых двигателей с дополнительной установкой резистора с сопротивлением 0,5 Ом. Вся эта модернизация позволит значительно повысить надежность работы силовой схемы электропоездов ЭР2Т и ЕПЛ2Т в период эксплуатации.

The transitional processes in shunt circuit of traction engines, which armatures and excitation windings are connected in non-conducting direction as to the flowing power current, are considered in this paper. The changes in the control circuits of braking switch and in the shunt power circuit of traction engines with additional mounting a resistor of 0.5 Ohm are proposed. All this modernization will allow increasing greatly the operation reliability of power circuit of ЭР2Т and ЕПЛ2Т electric locomotives during their service life.

В силовой схеме электропоездов ЭР2Т и ЕПЛ2Т [1] для уменьшения коммутационных перенапряжений и облегчения дугогашения линейных контакторов в момент их выключения, последовательно включенные якоря тяговых двигателей вместе с обмотками возбуждения зашунтированы диодами Д30-Д40 и тиристором Т₇9 в непроводящем направлении по отношению протекающего тока силовой цепи. В этом случае, при отключении линейным контактором силовой цепи возникает э.д.с. самоиндукции в якорях тяговых двигателей и обмотках возбуждения от накопленной электромагнитной энергии на их индуктивностях при прохождении тока силовой цепи. Возникает разрядный ток по цепи М1-М4-ОВМ1-ОВМ4-Т₇9-Д40-Д30-М1. При этом тиристор Т₇9 мгновенно открывается под действием э.д.с. самоиндукции тяговых двигателей порядка 330 В. При этом с делителя R71-R73 поступает напряжение 56 В, которое открывает стабилитрон ПП2 и соответственно тиристор Т₇9.

Однако в эксплуатации электропоездов ЭР2Т и ЕПЛ2Т имели место: невозврот реверсора в нужном направлении на каком-либо моторном вагоне, неисправности цепей управления, выключение разъединителя цепей управления РУМ, в результате чего возникали генераторные токи.

За счет остаточного магнетизма четырех тяговых двигателей создавалось напряжение порядка 40 В, но из-за неисправности стабилитрона ПП2 тиристор Т₇9 открывался, а также в случае пробоя щеткодержателя на корпус двигателя М1, создавались контуры неконтролируемого генераторного тока громадной величины, которые выводили из строя все двигатели или все диоды Д40-Д30. При этом создавался значительный тормозной момент и, как следствие, юзование колесных пар с их заклиниванием.

Такие явления возникали по причине наличия контакта ТП6 тормозного переключателя, соединяющего якоря тяговых двигателей с обмотками возбуждения этих двигателей (рис. 1).

Для устранения этого серьезного недостатка произведена модернизация в схеме цепей управления тормозным переключателем, а именно, при разборе схемы моторного режима тормозной переключатель автоматически переходил с моторного режима в тормозной и при этом размыкался силовой контакт контактора ТП6 обмоток возбуждения.

Однако в дальнейшем при такой модернизации во время эксплуатации электропоездов ЭР2Т и ЕПЛ2Т замечено, что контакты контакторов ПТ9 и ПТ6 реверсивно-тормозного переключателя 1П-004 У2 иногда частично рвут часть разрядного тока силовой цепи во время разбора схемы моторного режима.

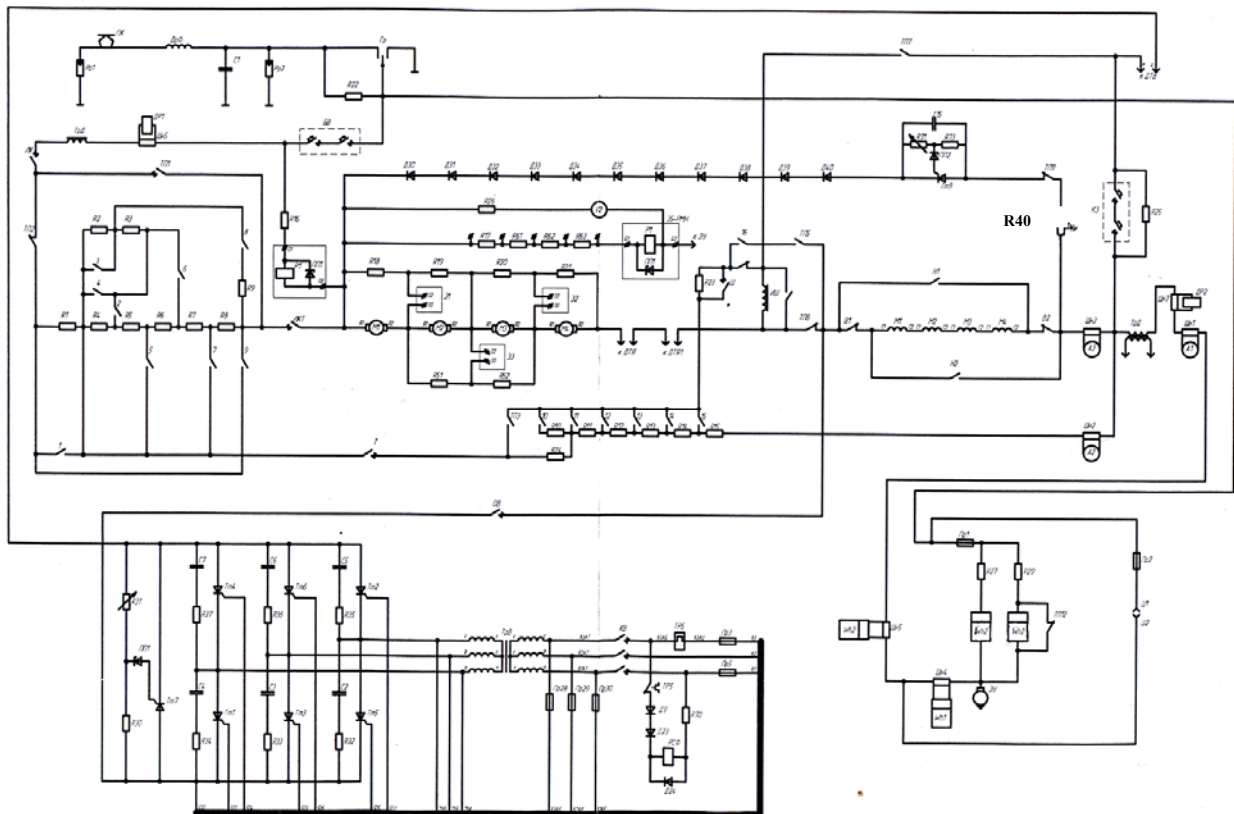


Рис. 1. Силовая схема моторного вагона электропоезда ЭР2Т (ЕПЛ2Т)

Для устранения этого недостатка, о котором будет изложено далее, предварительно определим время переключения тормозного переключателя с моторного режима в тормозной при установке рукоятки контроллера машиниста с любой позиции пуска на нулевую. Разбор электрической схемы в режиме тяги происходит в следующем порядке [1, 2].

Прерывается цепь 22Г-22У и реле КВХ отключается с задержкой по времени из-за параллельной цепи R53, C13, подключенной к реле КВХ. Контакт Ш, если он был включен, отключается сразу и, следовательно, увеличивается возбуждение тяговых двигателей, что ведет к уменьшению тока в цепи якорей. Затем после отключения реле КВХ прерывается цепь провода 2 (рис. 2) [1].

С этого момента в силовой схеме произойдут основные переключения.

Отключается линейный контактор ЛК, отключается повторитель ПЛК1 через н. р. ЛК, затем размыкается тормозной линейный контактор ЛКТ, т.к. прерывается цепь питания проводов 11В-30, после чего начнет отключаться повторитель ПЛКТ с задержкой по времени, т.к. его катушка реле зашунтирована конденсатором С14 и R72. Затем отключится повторитель ПЛКТ, т.к. прервется цепь питания провода 22ГЕ.

Замкнется н. з. контакт ПЛКТ в цепи провода 15ГГ-ПРП-15ГД получит питание катушка реверсивно-тормозного переключателя, и он начнет переходить с моторного положения в тормозное. Питание катушки тормозного переключателя ТП-М еще в моторном режиме было прервано н. з. контактом ПЛКТ1, а также когда прервется цепь питания провода 2 при установке рукоятки КМ в нулевое положение.

Поэтому катушка ТП-М обесточена и не препятствует переходу тормозному переключателю в тормозное положение.

Определим время задержки на отключение реле ПЛКТ. Постоянная времени равна

$$T_{\text{ПЛКТ}} = R72 \cdot C14 = 1 \text{ кОм} \cdot 14 \text{ мкФ} = \\ = 1000 \cdot 14 \cdot 10^{-6} = 0,014 \text{ с.}$$

$$t_{\text{зад}} \approx 3T_{\text{ПЛКТ}} = 3 \cdot 0,014 \approx 0,05 \text{ с.}$$

Как показала экспериментальная проверка, время от момента размыкания линейного контактора ЛК до момента перехода реверсивно-тормозного переключателя с моторного в тормозной режим составляет $t = 0,25 \text{ с.}$

Тогда общее время переключения тормозного переключателя с моторного режима в тормозное составляет

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{зад}} + t_{\text{пер}} = 0,05 + 0,25 = 0,3 \text{ с.}$$

$$t_{\text{зад}}^* \approx 3T_{\text{ПЛКТ}} \approx 0,04 \cdot 3 = 0,12 \text{ с.}$$

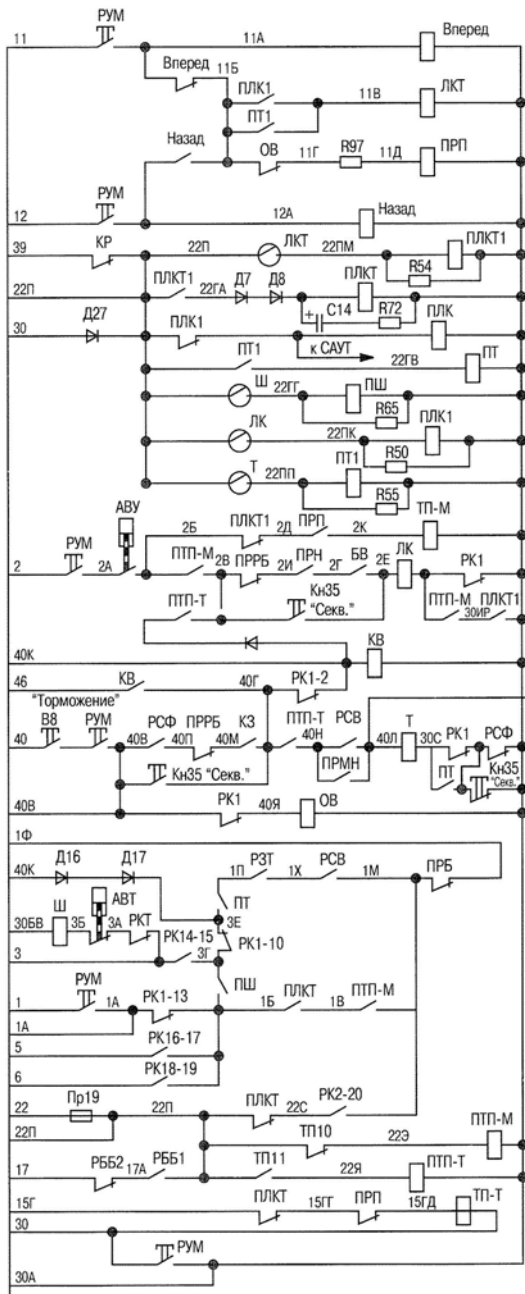


Рис. 2. Схема цепей управления моторного вагона ЭР2Т (ЕПЛ2Т)

Как далее будет указано, необходимо общее время переключения увеличить, а это можно достигнуть за счет задержки на отключение реле ПЛКТ, т.е. увеличить постоянную времени $T_{\text{ПЛКТ}} = R^* 72 \cdot C^* 14$. Поэтому целесообразно увеличить сопротивление $R72$ со значением 1 кОм до значения 3 кОм. Тогда постоянная времени будет равна

$$T_{\text{ПЛКТ}}^* = 3 \cdot 10^3 \cdot 14 \cdot 10^{-6} \approx 0,04 \text{ с.}$$

Время задержки ПЛКТ будет

Тогда общее время от момента начала отключения линейного контактора ЛК в силовой цепи до момента перехода реверсивно-тормозного переключателя ПП-004 У2 с моторного в тормозной режим, при котором размыкаются силовые контакты ТП9 и ТП6, составит

$$t_{\text{общ}}^* = t_{\text{пер}} + t_{\text{зад}}^* = 0,25 + 0,12 \approx 0,4 \text{ с.}$$

Для устранения вышеуказанного недостатка необходимо в цепь диодов Д30-Д40 включить оптимальное значение сопротивления резистора $R40$ (рис. 1) с тем, чтобы спадание разрядного тока в указанном контуре при выключении линейного контактора происходило значительно раньше, нежели начнется переход тормозного переключателя с моторного режима в тормозной при разборе схемы.

Вначале произведем расчет спадания разрядного тока без ввода сопротивления $R40$ и без изменения параметров в цепях управления тормозным переключателем.

Постоянная времени в цепи тяговых двигателей с обмотками возбуждения равна, с

$$T = \frac{4L_{\text{дв}}}{4R_{\text{дв}}} = \frac{4L_{\text{дв}}}{4R_{\text{дв}}} = \frac{24 \cdot 10^{-3}}{0,22} = 0,1,$$

где $R_{\text{дв}} = R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ов}} = 0,22 \text{ Ом}$;

$$L_{\text{дв}} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Разрядный ток в контуре спадает по следующему закону:

$$i = I_{\text{дв(мак)}} e^{-\frac{t}{T}}.$$

1. Если выключение схемы происходит при токе $I_{\text{дв(мак)}} = 600 \text{ А}$, то ток уменьшается по такой зависимости:

$$i(t) = 600 e^{-\frac{t}{0,1}} = 600 e^{-10t} = I_{\text{доп}}.$$

Если время поворота тормозного переключателя из моторного режима в тормозной составляет 0,3 с, то ток разряда будет равен:

$$i(0,3 \text{ с}) = 600 e^{-\frac{0,3}{0,1}} = 600 e^{-3} = 30 \text{ А.}$$

Т.к. контакторы тормозного переключателя выполнены без дугогашения, то такого тока при разрыве силовой цепи допустить нельзя.

Поэтому необходимо в цепи разрываемого контура включить резистор $R_{40} = 0,5$ Ом. Тогда

$$T_1 = \frac{24 \cdot 10^{-3}}{0,5 + 0,22} = \frac{24 \cdot 10^{-3}}{0,72} = 0,033 \text{ с}, \quad \frac{1}{T_1} = 30.$$

$$i(0,3 \text{ с}) = 600e^{-30t} = 600e^{-30 \cdot 0,3} = 0,08 \text{ А}.$$

Поэтому принимаем расчетную величину резистора $R_{40} = 0,5$ Ом.

2. Если произвести указанные изменения на задержку отключения повторителя ПЛКТ на 0,05 с, то общее время переключения тормозного переключателя составит 0,4 с. Тогда разрывной ток тормозным переключателем будет равен

$$i(0,4 \text{ с}) = 600e^{-30 \cdot 0,4} = 600e^{-12} = 0,004 \text{ А},$$

т.е. практически без разрыва тока, на что он и предназначен.

Следует отметить, что в цепь диодов Д30-Д37 и Т₉ необходимо обязательно включить сопротивление резистора R40 для ограничения аварийных токов при появлении указанных ранее неисправностей.

Тепловой расчет сопротивления R40

По величине эффективного тока сопротивление резистора определяем из числа параллельно включенных элементов фехралевых сопротивлений

$$a = \frac{I_{\text{эф}}}{I_{\text{дл}(\text{э})}},$$

где $I_{\text{дл}(\text{э})}$ – длительный допустимый ток выбранного элемента $I_{\text{дл}(\text{э})} = 52$ А, $R_3 = 1,05$ Ом;

$I_{\text{эф}}$ – эффективный ток, протекающий в цепи через резистор R40, ТП9, Т₉-Д37-Д30 во время отключения силовой цепи тяговых двигателей моторного вагона электропоезда ЭР2Т (ЕПЛ2Т).

Определяется по следующей формуле [4]:

$$I_{\text{эф}} = I_{\text{дл}(\text{э})} \sqrt{1 - e^{-\frac{t}{T}}},$$

где T – тепловая постоянная времени элемента, равная

$$T = \frac{C \cdot M_{\text{пэ}}}{B};$$

C – удельная теплоёмкость проводникового материала элемента, равная 700 Вт/рад;

$M_{\text{пэ}}$ – масса проводникового материала элемента резистора в кг, равная 3,96 кг;

B – коэффициент теплопередачи элемента резистора в Вт/рад, который определяется

$$B = \frac{I_{\infty}^2 \cdot R_{\text{эл}}}{\tau_{\delta}},$$

где $R_{\text{эл}}$ – сопротивление элемента;

τ_{δ} – допустимый перегрев при продолжительном токе, $\tau_{\delta} = 350$ °С;

I_{∞} – продолжительный ток выбранного элемента, равный $I_{\infty} = 52$ А.

Подставляя данные, получим

$$T = \frac{700 \cdot 3,96}{8,11} = 341 \text{ с}.$$

Длительный ток фехралевого элемента КФ определяется

$$I_{\infty \text{эл}} \leq I_{\text{дл}(\text{ман})} \sqrt{1 - e^{-\frac{t}{T}}} = I_{\text{дл}(\text{ман})} \sqrt{1 - e^{-\frac{t}{341}}}.$$

Примем средний маневровый ток при трогании электропоезда 300 А и среднюю длительность повторно-кратковременного включения тока 7 с. Тогда

$$I_{\infty \text{эл}} \leq 300 \sqrt{1 - e^{-\frac{7}{341}}} = 300 \cdot 0,14 = 42 \text{ А} < 52 \text{ А}.$$

Этот комплект сопротивления необходимо разместить под вагоном возле ящика с сопротивлениями ослабления возбуждения тяговых двигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Просвирин, Б. К. Электропоезда постоянного тока с электрическим торможением [Текст] / Б. К. Просвирин. – М.: Транспорт, 2000. – 328 с.
2. Просвирин, Б. К. Электрические схемы электропоезда ЭД4М [Текст] / Б. К. Просвирин // Локомотив. – 2001. – № 5. – М.: Транспорт, 2001. – С. 17-22.
3. Басов, Г. Г. Развитие электричного моторвагонного подвижного состава [Текст] / Г. Г. Басов. – Х.: Аспект, 2005. – С. 123-161.
4. Ротанов, Н. А. Проектирование систем управления электроподвижным составом [Текст] / Н. А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1986. – С. 17-40.

Поступила в редколлегию 01.02.2010.

Принята к печати 04.02.2010.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТА ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОГТЕОБРАЗНЫМИ ПОЛЮСАМИ

Розглянуто особливості конструкції та розрахунку вентильного електродвигуна з кігтеобразними полюсами.

Рассмотрены особенности конструкции и расчета вентиального электродвигателя с когтеобразными полюсами.

The peculiarities of structure and calculation of the semiconductor rectifier electric engine with beak-shaped poles have been considered.

Введение

Основными типами бесконтактных электродвигателей, используемых в регулируемом электроприводе, в частности тяговом, являются асинхронные и вентильные. В настоящей работе рассмотрены вентильные двигатели (ВД), как одно из быстроразвивающихся научно-технических направлений. Действительно, электропривод на основе вентильных двигателей все более широко используется в таких областях техники и промышленности, как приборная автоматика, станкостроение и робототехника, автоматизированные технологические линии, транспорт, аэрокосмическая техника, насосное и компрессорное оборудование и др. [1], где ранее в основном использовали асинхронные двигатели. Этому, кроме развития силовой полупроводниковой техники, в основном способствовало внедрение бесконтактной конструкции вентильных двигателей.

Преимущества бесконтактной конструкции очевидны: простота и технологичность производства, практически полное отсутствие технического обслуживания в процессе эксплуатации, высокая ремонтпригодность. Такой конструкцией обладают следующие ВД: индукторные, реактивные, с постоянными магнитами, с когтеобразными полюсами и с вращающимися трансформаторами. ВД с вращающимися трансформаторами в электроприводе не применяются поскольку, несмотря на бесконтактность, конструктивно являются еще более сложными, чем машины со скользящими контактами.

В настоящее время наиболее перспективными для применения в диапазоне малых мощностей являются реактивные ВД, малых и средних мощностей – ВД с постоянными магнитами [1], средних и больших мощностей – индуктор-

ные. Однако, для применения в тяговом приводе наибольший интерес представляют собой индукторные ВД и ВД с когтеобразными полюсами.

Особенности конструкции и расчета

Ниже представлены особенности конструкции и расчета ВД с когтеобразными полюсами как наименее изученного и представляющего большой интерес как основа для тягового привода, охватывающего весь диапазон мощностей.

Статор и якорная обмотка у ВД с когтеобразными полюсами такие же, как и в обычных синхронных и асинхронных машинах. В остальном имеются существенные отличия. Ротор не имеет обмоток и состоит из вала с немагнитной вставкой (три части вала сварены трением) и двух полюсных систем северной и южной полярности, каждая из которых представляет собой цилиндрическую стальную отливку с когтеобразными полюсными выступами (рис. 1 и рис. 2).

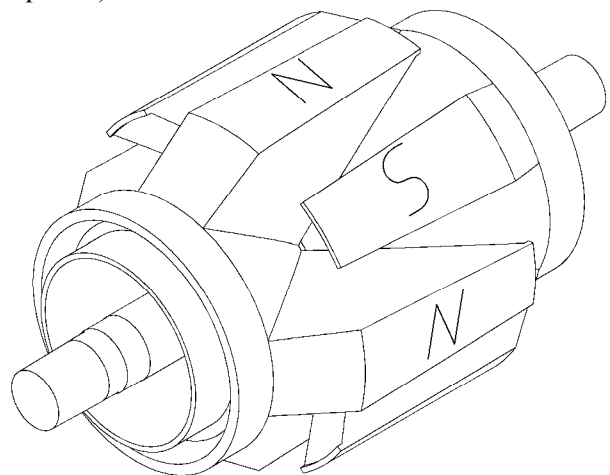


Рис. 1. Общий вид ротора с когтеобразными полюсами

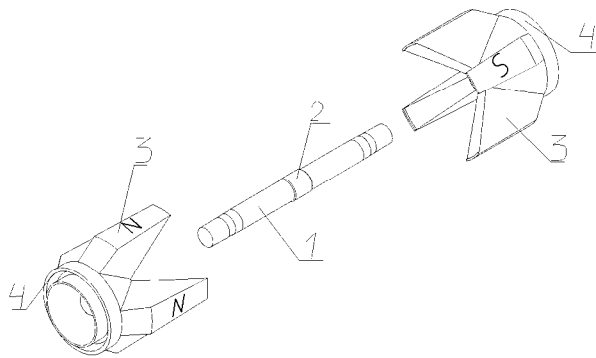


Рис. 2. Составные части когтеобразного ротора:
1 – вал; 2 – немагнитная вставка; 3 – когтеобразные полюсные выступы; 4 – цилиндры полюсных систем

Обмотку возбуждения располагают на статоре и выполняют в виде двух колец.

Роль магнитопровода выполняют не только ротор и статор, но также подшипниковые щиты и станина [2] (рис. 3).

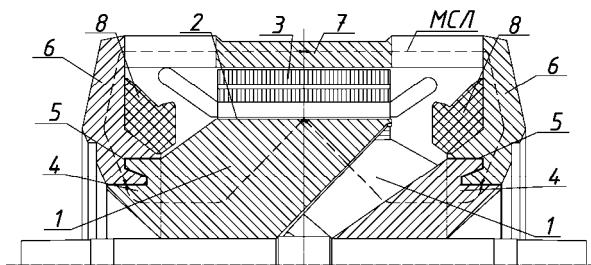


Рис. 3. Магнитная цепь ВД с когтеобразными полюсами:

1 – полюс; 2 – воздушный зазор; 3 – статор;
4 – цилиндр полюсных систем; 5 – дополнительный воздушный зазор; 6 – подшипниковый щит; 7 – станина;
8 – обмотка возбуждения; МСЛ – магнитная силовая линия

Особенностями расчета ВД с когтеобразными полюсами являются расчеты: магнитной цепи, индуктивных сопротивлений и добавочных потерь.

Как указано в [2], магнитная цепь ВД с когтеобразными полюсами является сложной благодаря своей трехмерной пространственной конфигурации и наличию развитых магнитных потоков рассеяния. Упрощенная схема замещения магнитной цепи двухполюсного ВД с когтеобразными полюсами представлена на рис. 4 [3]. Обозначения без штрихов относятся к левой половине, а обозначения со штрихами – к правой половине машины относительно оси поперечной симметрии машины на рис. 3. Элементы магнитной цепи представлены в виде источников МДС и магнитных сопротивлений. Однако в инженерной практике используется метод магнитных проводимостей [4]. Приведенная в [4] методика расчета магнитной цепи синхронных машин с когтеобразными полюса-

ми для малой и средней мощности после проведенного расчета ВД мощностью 1220 кВт оказалась применимой и для машин большой мощности [2].

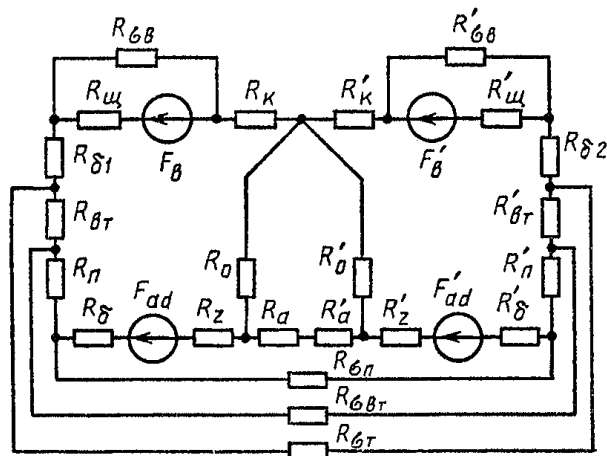


Рис. 4. Упрощенная схема замещения магнитной цепи ВД с когтеобразными полюсами:

F_b – МДС одной ОВ; F_{ad} – МДС якоря на один полюс, приведенная к ОВ; $R_k, R_{щ}, R_{\delta 1}, R_{\delta \tau}, R_{\delta}, R_z, R_a, R_0$ – соответственно, магнитные сопротивления половины наружного корпуса, левого бокового щита, дополнительного зазора, цилиндра полюсных систем, полюса, зубцового слоя якоря, спинки якоря (на полюс), пакета якоря между рабочим зазором и корпусом для полюса одной полярности; $R_{св}, R_{стп}, R_{свт}, R_{ст}$ – соответственно, магнитные сопротивления рассеяния вокруг ОВ, между полюсами, между цилиндрами полюсных систем, между торцами пакета якоря и выступающими за пределы активной зоны участками полюсов

При расчете магнитного поля в воздушном зазоре ВД с когтеобразными полюсами, как и для явнополюсных машин, пользуются следующими коэффициентами: расчетной полюсной дуги α_i , формы поля возбуждения k_Φ и k_f , формы поля реакции якоря по продольной k_{ad} и k_a и поперечной k_{aq} осей и приведения МДС реакции якоря к МДС обмотки возбуждения k_d и k_q .

Несмотря на то, что у ВД с когтеобразными полюсами воздушный зазор между активными поверхностями выполняется равномерным, расчет магнитного поля в воздушном зазоре в общем случае усложняется. Этому способствует не только указанная выше сложная конфигурация магнитопровода и значительная протяженность пути потока, но также аксиальная составляющая магнитного потока в полюсах и, как следствие, переменная ширина активных поверхностей полюсов [5]. Переменная ширина активных поверхностей полюсов необходима

для уменьшения неравномерного распределения индукции по поверхности полюса.

В связи с этим в расчетные формулы для α_i , k_f , k_{ad} , k_a , k_d и k_q введены поправки, уменьшающие эти коэффициенты в зависимости от величины скоса полюсов.

В результате проведенного расчета ВД большой мощности выяснилось, что рекомендуемая оптимальная геометрия активной поверхности полюса, при которой средняя относительная полюсная дуга равна 0,6...0,62, а максимальная – 0,9...0,95 [6] не улучшает добротность магнитопровода, а только увеличивает магнитные потоки рассеяния, делая невозможным размещение обмотки возбуждения таких размеров, чтобы создать требуемый основной магнитный поток. Опытным путем удалось установить, что для ВД с когтеобразными полюсами большой мощности более оптимальной будет средняя полюсная дуга, равная $\approx 0,583$ и максимальная $\approx 0,664$. В связи с этим, формулы для определения вышеназванных коэффициентов можно использовать без поправок, что упрощает расчет. Более сильное же искажение кривой противо-ЭДС, чем в случае с большим скосом полюсов, не имеет существенного значения для ВД.

Как отмечалось в [2], одними из важнейших параметров определяющих работу ВД в переходных режимах, являются сверхпереходные индуктивные сопротивления. Однако расчетное определение их для машин традиционной конструкции и для машин с когтеобразными полюсами идет двумя разными путями. В общем случае сопротивление магнитопровода протекающим по нему вихревым токам является комплексным. В расчетах машин традиционной конструкции можно легко отдельно определить его мнимую составляющую, являющую собой индуктивное сопротивление. Но в машинах с когтеобразными полюсами это сделать невозможно.

В этом случае расчет выполняется так же, как и для машин с массивными полюсами [7]. В данной работе определение сверхпереходных параметров производится при помощи теоремы Умова-Пойнтинга, записанной в виде:

$$\underline{S} = \frac{1}{2} \int_S \underline{E}_m \cdot \underline{H}_m dS = \frac{1}{2} \cdot I_m^2 \cdot (r_{di} + jX_{di}), \quad (1)$$

откуда

$$r_{di} + jX_{di} = \frac{2 \cdot \underline{S}}{I_m^2}, \quad (2)$$

где \underline{E}_m и \underline{H}_m – комплексные амплитуды напряженностей магнитного и электрического полей на поверхности полюса;

I_m – комплексная амплитуда вихревых токов в полюсе;

\underline{S} – комплексная мощность, выделяемая в полюсе.

В работе [8] проведено уточнение расчетных формул и даны рекомендации по выбору поверхностей полюсов, поглощающих мощность \underline{S} .

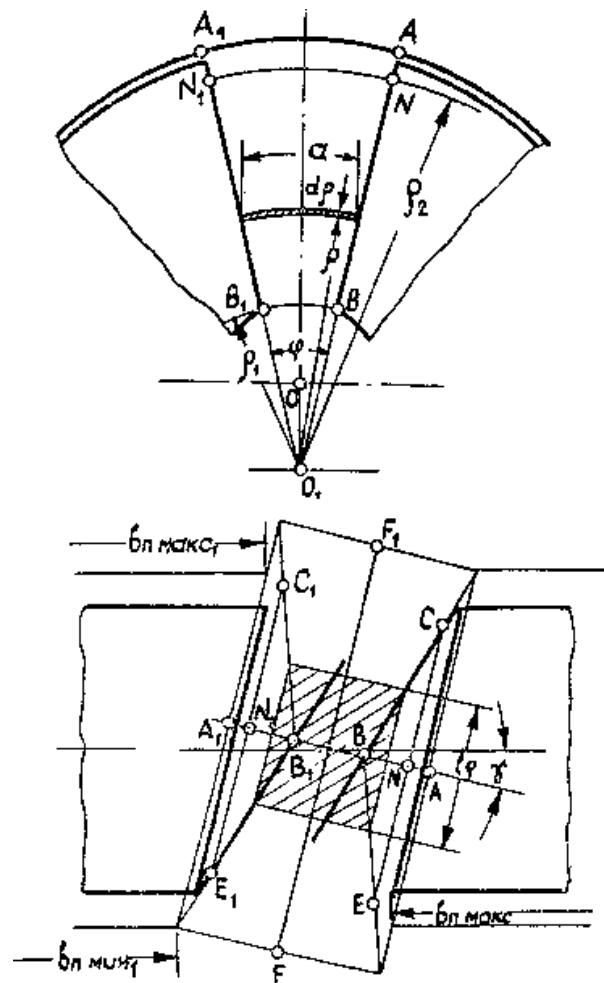


Рис. 5. Область тангенциального рассеяния

Т.к. площадь междуполюсного пространства необходимо определить точно, то для этого можно воспользоваться исходными положениями для расчета магнитных проводимостей междуполюсного рассеяния [4]. После некоторых преобразований получаем весьма удобные для инженерных расчетов формулы. В [4] поверхность междуполюсного рассеяния подразделяется на ряд идеализированных составляющих: тангенциальную, торцевую, угловую и

внутреннюю. Область тангенциального рассеяния имеет вид рис. 5.

Площадь тангенциального рассеяния определяется по формуле

$$S_{\tau} = \text{ctg} \beta'_1 \cdot (\rho_2^2 - \rho_1^2) - 2 \cdot \rho_2 \cdot \text{ctg} \beta'_1 \cdot (\rho_2 - \rho_1), \quad (3)$$

где $\text{ctg} \beta'_1$ – котангенс расчетного угла скоса полюса;

ρ_1, ρ_2 – радиусы, проведенные из точки пересечения условных продолжений поверхностей тангенциального рассеяния полюсов [4].

Область торцевого и углового рассеяния имеет вид рис. 6.

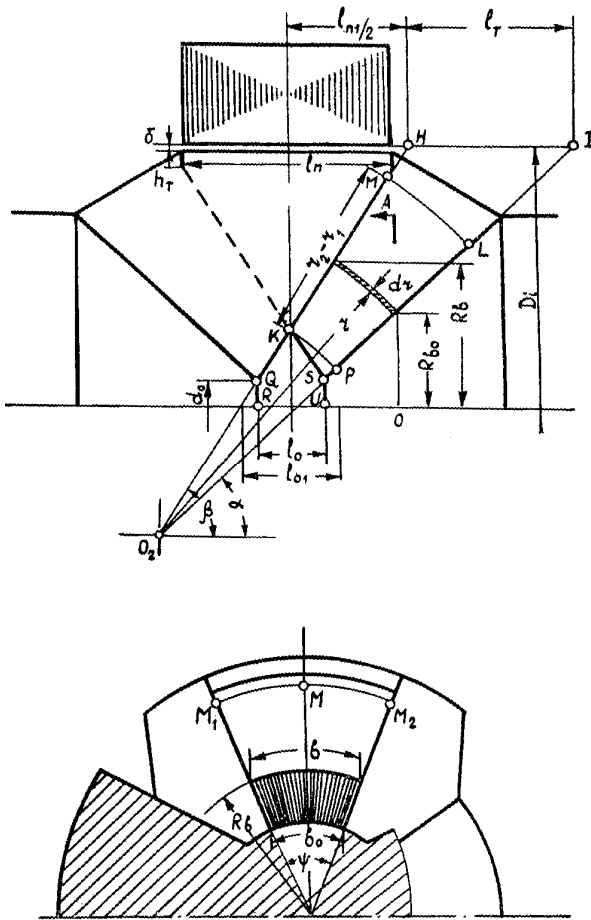


Рис. 6. Область торцевого и углового рассеяния

Площадь углового рассеяния пренебрежимо мала по сравнению с остальными поверхностями, поэтому ею можно пренебречь. Площадь торцевого рассеяния определяется по формуле:

$$S_T = \frac{\pi \cdot \alpha_{\min 1}}{p} \left(\frac{\sin \beta}{2} \cdot (r_2^2 - r_1^2) + \frac{\sin \alpha}{2} \times$$

$$\times (r_2^2 - r_1^2) - B \cdot (r_2 - r_1) \right), \quad (4)$$

где $\alpha_{\min 1}$ – расчетный коэффициент минимального полюсного перекрытия;

β – угол скоса полюса;

r_1, r_2 – радиусы нижней и верхней границы области рассеяния;

α – угол скоса поверхности полюсной системы другой полярности, расположенной напротив торца полюса, площадь поверхности которого определяется;

B – размер [4];

p – число пар полюсов.

Область внутреннего рассеяния имеет вид рис. 7.

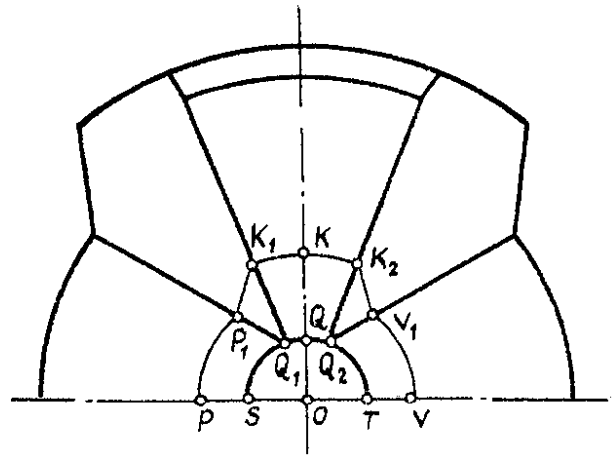


Рис. 7. Область внутреннего рассеяния

Площадь внутреннего рассеяния определяется по формуле:

$$S_i = \frac{\pi \cdot R_{\min 1}^2}{p} + \frac{(2 \cdot R_{\min 1} + \frac{l_0}{2} \text{tg} \beta) \cdot \frac{l_0}{2} \text{tg} \beta}{p}, \quad (5)$$

где $R_{\min 1}$ – радиус основания полюса;

l_0 – расстояние между цилиндрами полюсных систем [4].

Площадь поверхности рассеяния полюса определяется как сумма площадей идеализированных составляющих

$$Q_{\sigma} = 2S_{\tau} + S_T + S_i. \quad (6)$$

Далее определяются параметры элементов схемы замещения машины по продольной и поперечной осям (в переходных режимах). Сверхпереходные сопротивления определяются

как входные сопротивления по отношению к зажимам машины [8] (рис. 8).

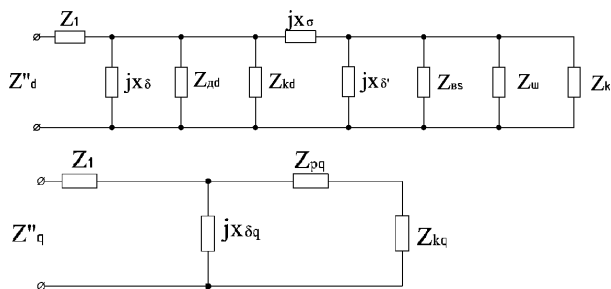


Рис. 8. Схемы замещения по двум осям синхронной машины с когтеобразными полюсами для расчета сверхпереходных индуктивных сопротивлений:

Z_d'' и Z_q'' – полные сверхпереходные сопротивления, соответственно, по продольной и поперечной осям; Z_1 – полное индуктивное сопротивление обмотки якоря; jX_δ и $jX_{\delta q}$ – индуктивное сопротивление основного воздушного зазора, соответственно, по продольной и поперечной осям; Z_{ld} и Z_{pq} – полные сопротивления, отображающие демпфирующие контуры массивных полюсов, соответственно, по продольной и поперечной осям; Z_{kd} и Z_{kq} – –– короткозамыкающих колец, соответственно, по продольной и поперечной осям; Z_{bs} – –– обмотки возбуждения; $Z_{ш}$ – –– подшипниковых щитов; Z_k – –– станины; jX_σ – индуктивное сопротивление междуполюсного рассеяния; $jX_{\delta'}$ – индуктивное сопротивление дополнительного воздушного зазора

Мнимая составляющая Z_d'' и Z_q'' будет искомым сверхпереходным индуктивным сопротивлением, соответственно, по продольной и поперечной осям.

Добавочные потери в синхронных машинах с когтеобразными полюсами, как правило, больше, чем в синхронных машинах обычного исполнения. Прежде всего, это связано с наличием массивного ротора, ферромагнитных щитов и станины по которым замыкается основной магнитный поток.

Добавочные потери состоят из: добавочных потерь в лобовых частях обмотки якоря, добавочных потерь в пазовой части обмотки якоря, добавочных потерь в обмотке возбуждения, добавочных потерь в сердечнике якоря, добавочных потерь в станине и щитах [9]. Это можно отнести и к ВД с когтеобразными полюсами. Причем точное расчетное определение их настолько сложно, что для синхронных машин с когтеобразными полюсами их определяют экспериментально и на основании эксперимента даются приближенные формулы. Также можно

воспользоваться методом физического моделирования и определить добавочные потери по переводной формуле [9].

Данные выражения целесообразно применять для высокоскоростных синхронных машин повышенной частоты. Для ВД, работающего с номинальной частотой 80 Гц, на начальном этапе проектирования допустимым является приближенная оценка добавочных потерь. В проектируемом ВД добавочные потери, рассчитанные по переводной формуле, оказались равными 0,3 % от номинальной мощности. Более точное определение добавочных потерь требует новых исследований в области именно вентильных двигателей.

Выводы

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что ВД с когтеобразными полюсами является огромной неисследованной областью, которой могут быть посвящены десятки научных и инженерных работ, которые, наряду с оптимальным проектированием, могут создать мощную базу для электрической тяги и иных областей управляемого электропривода.

Продольный разрез тягового ВД с когтеобразными полюсами представлен на рис. 9.

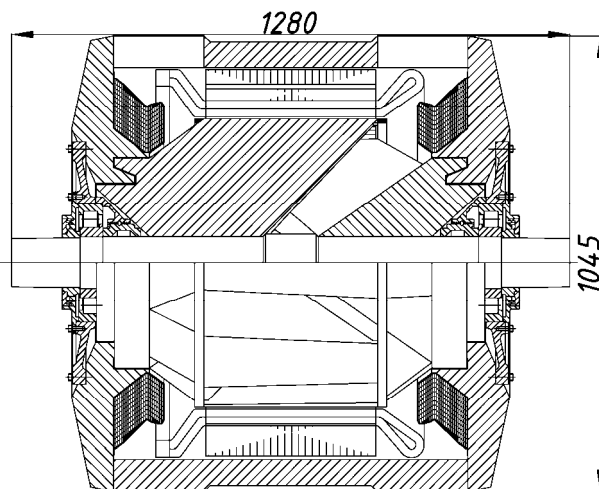


Рис. 9. Продольный разрез тягового ВД с когтеобразными полюсами

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников, И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе [Текст] : курс лекций / И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
2. Друбецкий, А. Е. Особенности конструкции вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами [Текст] / А. Е. Друбецкий // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 83. – С. 104-110.

3. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины [Текст] : учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов / Д. А. Бут. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
4. Рыжков, В. С. Методика расчета магнитной проводимости междуполосного рассеяния в машинах с когтеобразными полюсами [Текст] / В. С. Рыжков // Бесконтактные электрические машины. – 1968. – т. 7. – С. 137-157.
5. Рыжков, В. С. Расчет магнитного поля в воздушном зазоре синхронной машины с когтеобразными полюсами [Текст] / В. С. Рыжков // Бесконтактные электрические машины. – 1975. – Вып. 14. – С. 134-160.
6. Ротор синхронной машины с когтеобразными полюсами [Текст] : а. с. № 313259 (СССР) / Л. А. Зильберштейн, Г. А. Минаева, В. А. Потенко и др. // Открытия, изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки. – 1971. – № 26.
7. Пик-Пичак, А. А. К расчету массивного ротора [Текст] / А. А. Пик-Пичак. // Вестник электропромышленности. – 1959. – № 6. – С. 36-44.
8. Туманов, В. И. Расчетное и экспериментальное определение сверхпереходных параметров синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком [Текст] / В. И. Туманов // Вестник электропромышленности. – 1962. – № 6. – С. 41-44.
9. Рыжков, В. С. Добавочные потери в бесконтактных синхронных машинах с когтеобразным ротором [Текст] / В. С. Рыжков // Электротехника. – 1967. – № 5. – С. 31-35.

Поступила в редколлегию 09.03.2010.

Принята к печати 17.03.2010.

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ ЇХ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ

Проведено дослідження, які дають можливість запропонувати методику визначення коефіцієнта завантаження, при якому один з двох паралельно працюючих живлячих силових трансформаторів доцільно відключити з метою зменшення втрат активної електроенергії в трансформаторах.

Проведены исследования, дающие возможность предложить методику по определению коэффициента загрузки, при котором один из двух паралельно работающих питающих силовых трансформаторов целесообразно отключить с целью уменьшения потерь активной электроэнергии в трансформаторах.

The research to propose methods of determination of the load factor, at which it is advisable to switch off one of two parallel working power feeding transformers in order to reduce the losses of active energy in transformers, has been carried out.

В якості критерію для визначення доцільності виключення одного з двох паралельно працюючих трансформаторів пропонується прийняти зменшення втрат активної електроенергії. Згідно методики [1] втрати активної електроенергії в трансформаторах ΔW_a , (кВт·год) визначаються за формулою:

$$W_a = P_{xx} \cdot \tau_{\Pi} + k_3^2 \cdot P_{кз} \tau_p, \quad (1)$$

де P_{xx} – активні втрати потужності в сталі трансформатора (втрати холостого ходу), кВт;

τ_{Π} – час приєднання трансформатора до мережі, год.;

k_3 – коефіцієнт завантаження трансформатора, що дорівнює відношенню середнього фактичного навантаження трансформатора до його номінальної потужності;

$P_{кз}$ – активні втрати потужності в міді обмотки трансформатора (втрати короткого замикання) при номінальному завантаженні, кВт;

τ_p – час роботи під навантаженням, год.

В [1] відмічається, що при зниженні завантаження трансформатора до значення $K_3 \leq 0,3$, у випадку паралельної роботи трансформаторів, один трансформатор має бути відключений у резерв (для підприємств та об'єктів III категорії за надійністю електропостачання).

З точки зору зменшення втрат активної потужності електроенергії в трансформаторах ΔW_a (формула (1)) на значення цих втрат впливає не тільки k_3 , а й τ_p . Тобто, можливо, що при різ-

них τ_p раціональне значення k_3 може відрізнятися від $K_3 \leq 0,3$.

Розглянемо $W_a = f(k_3, \tau_p)$ при різних k_3 та τ_p . Приймаємо $\tau_p = 200$ год. на місяць (для підприємств, що працюють в одну зміну), $\tau_p = 450$ год. на місяць (для підприємств, що працюють в дві зміни), $\tau_p = 700$ год. на місяць (для підприємств, що працюють в три зміни) [1].

Вважаємо, що на паралельну роботу ввімкнені два однакових трансформатора. При повному виконанні умов паралельної роботи трансформаторів навантаження між ними розподілиться порівну [2]. Очевидно, що з точки зору забезпечення споживачів відключення одного з трансформаторів у резерв можливе при $0 < K_3 \leq 0,5$. Якщо відключення одного трансформатора здійснити при $K_3 = 0,5$, то другий буде працювати при $K_3 = 1$. Завантажувати трансформатор з $K_3 > 1$ неприпустимо.

Приймаємо $\tau_p = 744$ год., що відповідає місяцям, які мають тридцять одну добу (січень, березень, травень, липень, серпень, жовтень, грудень).

Якщо при відключення одного трансформатора другий працює з $K_3 \leq 1$ і при цьому втрати активної енергії у порівнянні з варіантом, коли працюють обидва, зменшуються, то відключення є раціональним.

Розглянемо вищевикладене на конкретному прикладі. Нехай споживач живиться від двох

однакових трансформаторів з наступними даними для кожного [3].

Номинальна потужність $S_{\text{ном}} = 400$ кВА;

Втрати холостого ходу $P_{\text{хх}} = 0,95$ кВт;

Втрати короткого замикання $P_{\text{кз}} = 5,5$ кВт.

Приймаємо $\tau_p = 200$ год.; $K_3 = 0,3$.

За місяць при включенні обох трансформаторів:

$$W'_a = 2(0,95 \cdot 744 + 0,3^2 \cdot 5,5 \cdot 200) = 1611,6 \text{ кВт\cdotгод}$$

Якщо один трансформатор відключити, то втрати активної електроенергії W''_a за місяць у трансформаторі, що залишився у роботі, з урахуванням, що для нього $K_3 = 0,6$, дорівнюють:

$$W''_a = 0,95 \cdot 744 + 0,6^2 \cdot 5,5 \cdot 200 = 1102,8 \text{ кВт\cdotгод.}$$

$$W''_a = 1102,8 \text{ кВт\cdotгод} < W'_a = 1611,6 \text{ кВт\cdotгод.}$$

Тобто відключення одного з трансформаторів при $K_3 = 0,3$, $\tau_{\text{п}} = 744$ год., $\tau_p = 200$ год. є доцільним.

Аналогічні розрахунки виконані для різних значень K_3 та $\tau_{\text{п}}$.

Результати зведені у табл. 1 (Зуваження. Параметри з одним штрихом відносяться до режиму, коли працюють обидва трансформатори, параметри з двома штрихами – до режиму, коли працює один трансформатор).

Таблиця 1

| № п/п | Коефіцієнт завантаження | | τ_p , год | $\tau_{\text{п}}$, год | $P_{\text{хх}}$, кВт | $P_{\text{кз}}$, кВт | W''_a , кВт\cdotгод | W'_a , кВт\cdotгод | Висновок |
|-------|-------------------------|--------|----------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| | K_3'' | K_3' | | | | | | | |
| 1 | K_3'' | 0,6 | 200 | 744 | 0,95 | 5,5 | 1102,8 | 1611,6 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,3 | | | | | | | |
| 2 | K_3'' | 0,6 | 450 | 744 | 0,95 | 5,5 | 1859,1 | 1597,8 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,3 | | | | | | | |
| 3 | K_3'' | 0,6 | 700 | 744 | 0,95 | 5,5 | 2092,8 | 2106,6 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,3 | | | | | | | |
| 4 | K_3'' | 0,4 | 200 | 744 | 0,95 | 5,5 | 882,8 | 1501,6 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,2 | | | | | | | |
| 5 | K_3'' | 0,4 | 450 | 744 | 0,95 | 5,5 | 1102,8 | 1611,6 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,2 | | | | | | | |
| 6 | K_3'' | 0,4 | 700 | 744 | 0,95 | 5,5 | 1322,8 | 1721,6 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,2 | | | | | | | |
| 7 | K_3'' | 0,8 | 200 | 744 | 0,95 | 5,5 | 1410,8 | 1765,6 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,4 | | | | | | | |
| 8 | K_3'' | 0,8 | 450 | 744 | 0,95 | 5,5 | 2686,8 | 2205,6 | $W''_a > W'_a$ |
| | K_3' | 0,4 | | | | | | | |
| 9 | K_3'' | 0,8 | 700 | 744 | 0,95 | 5,5 | 3170,8 | 26445,6 | $W''_a > W'_a$ |
| | K_3' | 0,4 | | | | | | | |
| 10 | K_3'' | 1 | 200 | 744 | 0,95 | 5,5 | 1806,8 | 1963,6 | $W''_a < W'_a$ |
| | K_3' | 0,5 | | | | | | | |
| 11 | K_3'' | 1 | 450 | 744 | 0,95 | 5,5 | 3181,8 | 2651,1 | $W''_a > W'_a$ |
| | K_3' | 0,5 | | | | | | | |
| 12 | K_3'' | 1 | 700 | 744 | 0,95 | 5,5 | 4556,8 | 3338,6 | $W''_a > W'_a$ |
| | K_3' | 0,5 | | | | | | | |

Із табл. 1 видно, що при $\tau_p = 200$ год. маємо $W_a'' < W_a'$, також при відключенні одного трансформатора при $K_3' = 0,4$ (рядок 7), при $K_3' = 0,5$ (рядок 10). Тобто, в залежності від значення τ_p доцільність відключення другого трансформатора може бути не тільки при $K_3' \leq 0,3$, як це рекомендується в [1], а й при більших значеннях K_3' при певних значеннях τ_p . При $K_3' \leq 0,3$ відключення одного з трансформаторів доцільно при всіх значеннях τ_p .

Пропонується наступна методика визначення коефіцієнта завантаження, при якому доцільно відключити один з двох паралельно працюючих живлячих споживача трансформаторів з урахуванням реальних значень τ_p .

1. Згідно паспортних даних (або відповідних стандартів) приймаємо значення P_{XX} , P_{K3} для кожного з двох трансформаторів.

2. Приймаємо значення τ_{Π} та τ_{p_i} згідно [1].

3. Задаємо декілька значень в інтервалі $0 < K_3' \leq 0,5$. (Наприклад, $K_3' = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$).

4. Визначаємо $K_3'' = 2K_3'$ відповідно при всіх значеннях K_3' .

5. Знаходимо W_a' як суму втрат у кожному трансформаторі.

$$W_a' = (P_{XX_1} \cdot \tau_{\Pi} + K_{3_1}'^2 \cdot P_{K_{3_1}} \cdot \tau_{p_i}),$$

де τ_{Π} – кількість годин у тому місяці, для якого ведеться розрахунок;

$\tau_{p_i} = 200; 450; 700$ год. [1].

6. Знаходимо W_a'' відповідно до:

$$W_a'' = P_{XX_n} \cdot \tau_{\Pi} + (2K_{3_n}')^2 \cdot P_{K_{3_n}} \cdot \tau_{p_i},$$

де P_{XX_n} , $P_{K_{3_n}}$, K_{3_n}' – відповідно, втрати холостого ходу, короткого замикання, коефіцієнта завантаження трансформатора, який залишився включеним.

7. Із вищенаведеного знаходимо K_3' та τ_p , при яких $W_a'' < W_a'$.

Висновок

Питання про відключення одного з двох паралельно працюючих трансформаторів доцільно вирішувати не за ознакою зниження коефіцієнта завантаження до $K_3 \leq 0,3$, а за ознакою $W_a'' < W_a'$.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Методика визначення нераціонального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів [Текст] / Національне агентство України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів. – К.: Державна інспекція з енергозбереження, 2009.
2. Дубинець, Л. В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини [Текст] : навч. посібник / Л. В. Дубинець, О. І. Момот, О. Л. Маренич. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 206 с.
3. ГОСТ 12022-76. Параметры холостого хода и короткого замыкания трехфазных масляных силовых трансформаторов общего назначения классов напряжения 10 и 35 кВ мощностью 25-630 кВА [Текст].

Надійшла до редколегії 16.03.2010.

Прийнята до друку 29.03.2010.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ АВАРІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

2. КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ З ЕЛЕКТРОРУХОМИМ СКЛАДОМ

У статті викладено математичну модель системи тягового електропостачання з навантаженням у режимі короткого замикання, а також результати розрахунків цього аварійного процесу. Визначено перехідні величини та характер їх зміни, які можна використовувати для визначення аварійних режимів.

В статье изложена математическая модель системы тягового электроснабжения с нагрузкой в режиме короткого замыкания, а также результаты расчетов этого аварийного процесса. Определены переходные величины, а также характер их изменения, которые можно использовать для определения аварийных режимов.

The article deals with the description of mathematical model of the system of traction electric power supply with load in the short circuit condition as well as the calculation results of this emergency process. The transition values as well as the character of their change, which can be used for detection of emergency processes, have been determined.

У роботі [1] автори почали досліджувати системи електричної тяги (СЕТ) 3,3 кВ постійного струму в аварійних режимах. Вперше було розроблено математичну модель СЕТ для одного з найрозповсюджених аварійних режимів системи: коротке замикання (КЗ) без електрорухомого складу (ЕРС). Ця модель ґрунтувалася на законах класичної електротехніки та описувалася рівняннями електромагнітного стану. Слід зазначити, що автору невідомі подібні роботи інших науковців в області електрифікації та електропостачання залізничного транспорту. Крім цього, зацікавленість цією проблемою викликана відсутністю публікацій, присвячених аварійним режимам в такій складній динамічній системі, відсутністю аналізу роботи існуючих систем захисту (СЗ) фідерів 3,3 кВ тягових підстанцій (ТП) постійного струму, а також впровадження сучасних СЗ, оснований на мікропроцесорній та мікроконтролерній базі.

Результатом другорядного ставлення до цієї важливої, з точки зору авторів, проблеми стало те, що функції захисту системи «тягова підстанція (ТП) – тягова мережа (ТМ) – електрорухомий склад (ЕРС)» до сьогодення виконують швидкодіючі вимикачі (ШВ) серій АБ 2/4, ВАБ-28, в кращому разі ВАБ-43. Лише до недавнього часу на українських залізницях почали впроваджувати ВАБ-49, які в деяких близьких закордонних країнах уже вважаються морально застарілими.

Актуальність викладеної проблеми підтверджують результати моніторингу роботи існуючих СЗ фідерів 3,3 кВ тягової мережі постійного струму стосовно основних вимог до надійності їх роботи, що проведені автором на шести дистанціях електропостачання (ЕЧ1-Нікополь, ЕЧ2-Нижньодніпровськ-Вузол, ЕЧ3-Верхівцево, ЕЧ4-Запоріжжя, ЕЧ6-Кривий-Ріг, ЕЧ7-Павлоград) ДП «Придніпровська залізниця». Дійсно з кругової діаграми рис. 1 видно, що значну частку вимикань ШВ (~ 31 %) спричиняють пошкодження електрорухомого складу і 30 % – це невизначені причини. Останні спрацьовування в своїй більшості неселективні та нез'ясовані взагалі внаслідок недостатньої кількості інформації про режими роботи СЕТ.

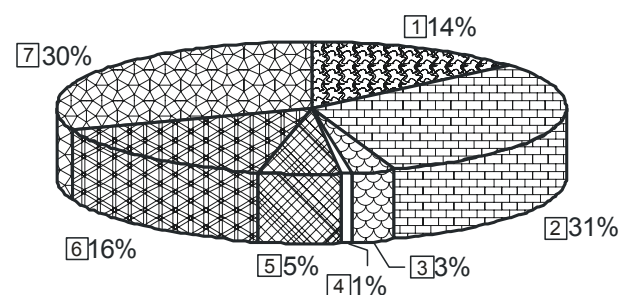


Рис. 1. Частки основних причин вимикань ШВ тягових підстанцій:

- 1 – перенавантаження; 2 – несправність ЕРС;
- 3 – короткі замикання; 4 – земляний захист;
- 5 – хибне спрацювання; 6 – гроза;
- 7 – причини невизначені

Слід зазначити, що за останні п'ять років (2001-2006 рр.), по яких було проведено моніторинг, спостерігається явна тенденція до зростання кількості неселективних та невизначених вимикань ШВ, що призводить до зменшення надійності роботи існуючих СЗ фідерів 3,3 кВ постійного струму. Враховуючи вищезазначене, автор вважає викладену проблему вельми актуальною і перспективною.

В даній роботі, яка є логічним продовженням попередньої, розглянемо більш складні випадки: КЗ в СЕТ з навантаженням. Прийняті в [1] припущення, які є невід'ємною частиною математичного моделювання будь-якої за складністю системи, є чинними і в цій роботі. СЕТ, що розглядається, представлена на рис. 2. На цьому рис.: позначенням (1) визначено режим КЗ поза електровозом; позначенням (2) – на

електровозі; ТП1, ТП2 – тягові підстанції; ШВ1, ШВ2 – швидкодіючі вимикачі тягових підстанцій, які діють на певній фідерній зоні; ЕРС – електровоз, що рухається (навантаження); l – довжина фідерної зони; $x_{ел}$ – координата електровоза на фідерній зоні; $x_{кз}$ – координата місця КЗ у разі випадку (2), $x_{ел} = x_{кз}$.

Розглянемо режим (1): КЗ в СЕТ поза електровозом, що рухається. Електровоз знаходиться в середині фідерної зони, тобто $x_{ел} = \frac{l}{2}$. Точка

КЗ знаходиться в координаті $x_{кз} = \frac{x_{ел}}{2}$. Схема замінення для цього випадку представлена на рис. 3.

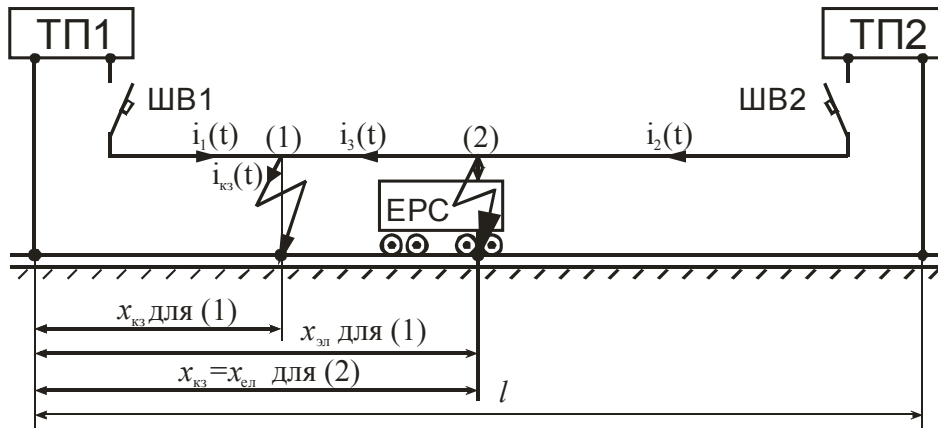


Рис. 2

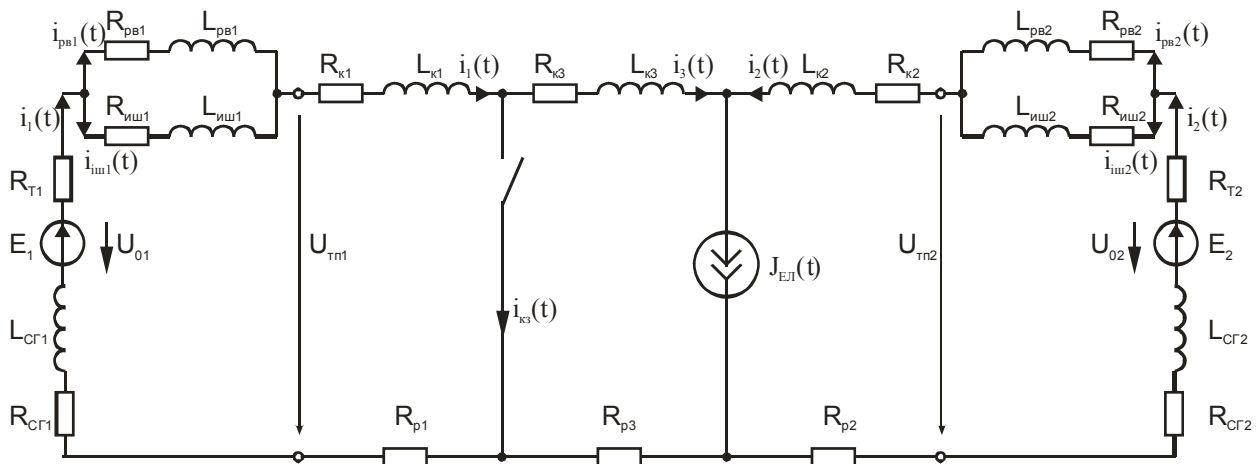


Рис. 3

На схемі рис. 3:
 $U_{01}, U_{02} = 3450$ В – напруга х.х. ТП;
 $U_{ТП1}, U_{ТП2}$ – напруга на затискачах ТП;
 $R_{Т1}, R_{Т2} = 0,14$ Ом [2] – внутрішній активний опір ТП;

$R_{пв1} = R_{пв2} = R_{пв} = 30 \cdot 10^{-6}$ Ом, $L_{пв1} = L_{пв2} =$
 $= L_{пв} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_{иш1} = R_{иш2} = R_{иш} =$
 $= 5,65 \cdot 10^{-6}$ Ом, $L_{иш1} = L_{иш2} = L_{иш} = 2,54 \cdot 10^{-6}$ Гн

– параметри схем заміщення ШВ типу ВАБ-43 фідерів ТП [2, 3];

$R_{CF1} = R_{CF2} = R_{CF} = 9 \cdot 10^{-3}$ Ом, $L_{CF1} = L_{CF2} = L_{CF} = 6,1 \cdot 10^{-3}$ Гн – параметри згладжуючих реакторів типу РБФА-У-6500/3250 тягових підстанцій;

R_{K1} та L_{K1} , R_{K2} та L_{K2} , R_{K3} та L_{K3}
 $R_{K1} = R_{K2} = R_{K3} = R_K = 0,0424$ Ом/км, $L_{K1} = L_{K2} = L_{K3} = L_{K4} = 0,00225$ Гн/км – внутрішній активний опір та індуктивність відповідної ділянки контактної мережі з підвіскою, що складена за схемою М-120+2МФ-100+А-185 [4];

$R_{P1} = R_{P2} = R_{P3} = R_P = 15,38 \cdot 10^{-3}$ Ом/км – внутрішній активний опір відповідної ділянки рейок.

Розрахунок перехідних процесів виконано операторним методом з ненульовими початковими умовами, тобто, при $J_{ЕЛ} = 1500$ А, $i_1(0) = 750$ А, $i_2(0) = 750$ А.

Після розв'язання системи рівнянь в операторній формі для схеми після комутації отримали зображення струмів віток схеми. Для визначення оригіналів перехідних струмів застосовано теорему розкладання [5]:

$$L^{-1} \left\{ \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \right\} = f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2(p_k)} e^{p_k t}, \quad (1)$$

де $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n$ – прості корені характеристичного рівняння $F_2(p) = 0$.

Результати розрахунків, тобто, вирази перехідних струмів віток, а також струму короткого замикання мають вигляд:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= 6610,48 + 250,0 \cdot e^{-16,8t} \times \\ &\times (23,44(\sinh(13,25t) - \cosh(13,25t))) \text{ А}; \\ i_2(t) &= 3530,40 + 250,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (11,12(\sinh(12,01t) - \cosh(12,01t))) \text{ А}; \\ i_3(t) &= 2030,40 + 250,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (11,12(\sinh(12,01t) - \cosh(12,01t))) \text{ А}; \\ i_{K3}(t) &= 8640,88 + 250,0 \cdot \left(e^{-16,8t} \times \right. \\ &\times (23,44 \cdot (\sinh(13,25t) - \cosh(13,25t)) + \\ &\left. + e^{-15,9t} \cdot (11,12 \cdot (\sinh(12,01t) - \cosh(12,01t))) \right) \text{ А}; \\ i_{PB1}(t) &= 2203,49 + 250,0 \cdot e^{-16,8t} \times \\ &\times (-7,8 \cosh(13,25t) + 30,74 \sinh(13,25t)) \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{PB2}(t) &= 1176,8 + 750,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (-1,23 \cosh(12t) + 4,9 \sinh(12t)) \text{ А}; \\ i_{ин1}(t) &= 4407,0 + 250,0 \cdot e^{-16,8t} \times \\ &\times (-15,6 \cosh(13,25t) - 7,3 \sinh(13,25t)) \text{ А}; \\ i_{ин2}(t) &= 2353,6 + 250,0 \cdot e^{-15,9t} \times \\ &\times (-7,4 \cosh(12t) - 3,6 \sinh(12t)) \text{ А}. \end{aligned}$$

Часові залежності цих струмів представлені на рис. 4, 5 і 6, при цьому усталені значення струмів тягових підстанцій дорівнюють $I_{y1} = 6610,5$ А, $I_{y2} = 3530,3$ А. Значення уставки релейно-струмової СЗ на обох ТП $I_{уст1} = I_{уст2} = 3500$ А.

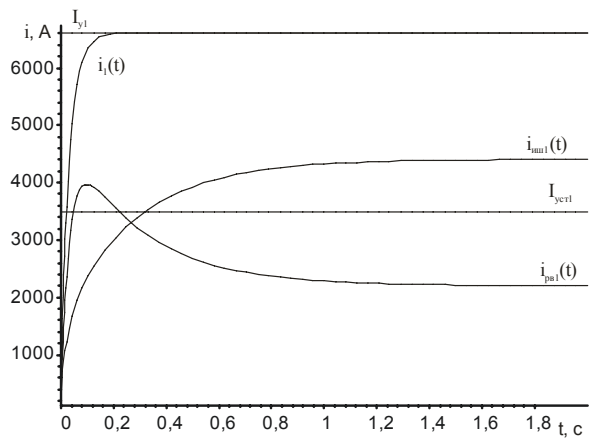


Рис. 4

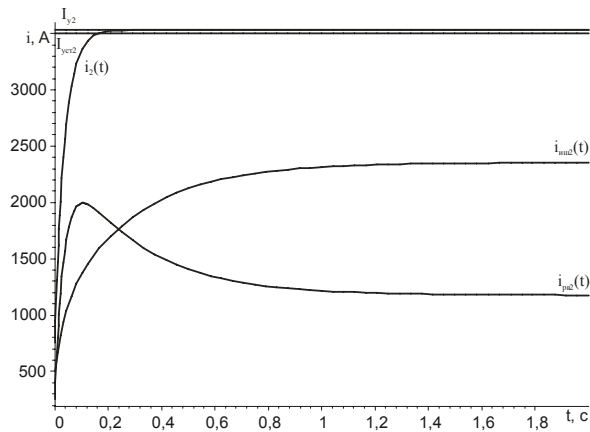


Рис. 5

Практичний інтерес представляють значення перехідних напруг на затискачах тягових підстанцій; в аналітичній формі вони мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u_{ТП1}(t) &= 1911,1 + 288,83e^{-16,89t} \times \\ &\times (\cosh(13,25t) - \sinh(13,25t)) \text{ В}; \end{aligned}$$

$$u_{\text{ТП2}}(t) = 2328,2 + 179 \cdot e^{-15,9t} \times (\cosh(12t) - \sinh(12t)) \text{ В.}$$

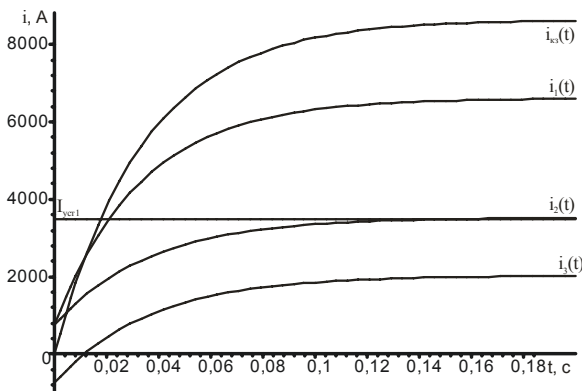


Рис. 6

Графіки зміни напруги на затискачах ТП1 представлено на рис. 7.

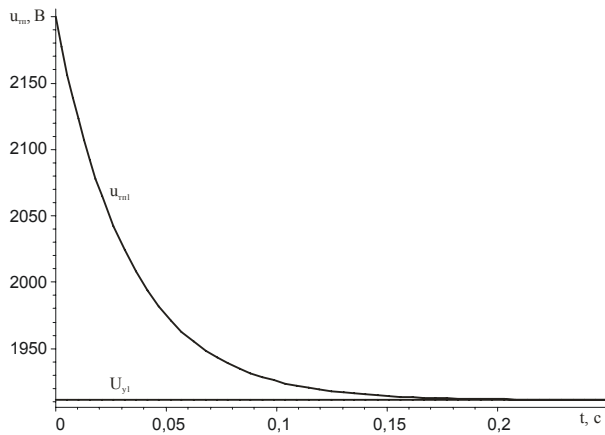


Рис. 7

Характер зміни напруги на ТП2 такий же, як і на ТП1 з тією лише різницею, що спостеріга-

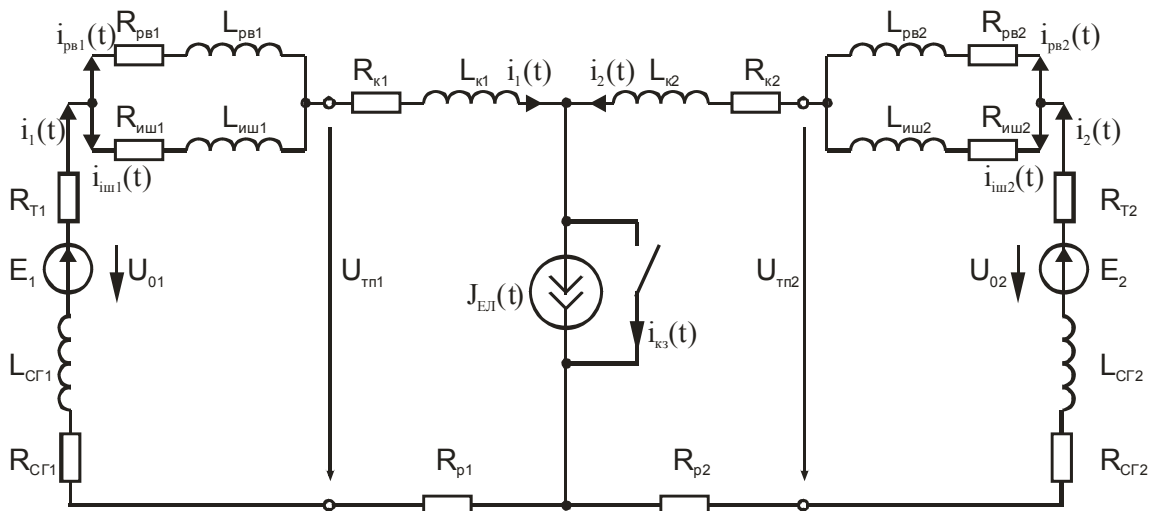


Рис. 8

Аналізуючи представлені вище графіки, бачимо математичне підтвердження тих положень, що висувалися в роботах [3, 4, 6]: при

ються дещо інші значення напруги. Усталені значення напруги на затискачах при КЗ поза електровозом для ТП1, ТП2 відповідно складають: $U_{y1} = 1911,1 \text{ В}$, $U_{y2} = 2628,2 \text{ В}$.

Далі розглянемо випадок режиму (2), а саме – глухе коротке замикання на електровозі. Схема заміщення цього випадку представлена на рис. 8.

Розрахунок цього режиму виконано аналогічно попередньому.

Аналитичні вирази перехідних струмів віток мають наступний вигляд:

$$i_1(t) = i_2(t) = 4253,9 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (56,83(\sinh(12,4t) - \cosh(12,4t))) \text{ А;}$$

$$i_{кз}(t) = 8507,86 + 123,3 \cdot e^{-15,9t} \times (56,83(\sinh(12,4t) - \cosh(12,4t))) \text{ А;}$$

$$i_{рв1}(t) = i_{рв2}(t) = 1417,9 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (75 \sinh(12,4t) - 56,83 \cosh(12,4t)) \text{ А;}$$

$$i_{иш1}(t) = i_{иш2}(t) = 2835,95 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (-37,9 \cosh(12,4t) - 18,16 \sinh(12,4t)) \text{ А.}$$

Часові залежності цих струмів представлені на рис. 9, 10.

Напруга на затискачах тягових підстанцій описується виразом:

$$u_{\text{ТП1}}(t) = u_{\text{ТП2}}(t) = 2459,73 + 209,5e^{-15,9t} \times (\cosh(12,4t) - \sinh(12,4t)) \text{ В.}$$

Графіки представлено на рис. 11.

виникненні КЗ в СЕТ за наявності навантаження струми фідерів ТП різко збільшуються, а напруга різко зменшується. Рис. 5 підтверджує

те твердження, що при далеких КЗ існуючі СЗ можуть не розпізнати їх, оскільки значення струмів фідерів значно менші у порівнянні струмів близьких ТП. Усталений струм КЗ на ТП2 близький до уставки ШВ2, тобто $I_{y2} \approx I_{уст2}$.

Слід зазначити, що значні похибки в математичні моделі, що розглянуті в цій та попередній роботах автора, вносить класичне представлення навантаження (електровоза, що рухається) як ідеального джерела струму, що є не зовсім коректним з точки зору класичної електротехніки та самого визначення джерела струму як фізичного об'єкту. У таких моделях губляться процеси, що протікають у силових колах електровоза, що, на думку автора, неприпустимо, оскільки вони є невід'ємною частиною складної динамічної нелінійної СЕТ. Тому автор вважає, з метою подальших розробок сучасних СЗ, що базуватимуться на мікроконтролерах чи мікропроцесорах, провести дослідження СЕТ в різноманітних режимах її роботи з врахуванням силових кіл електровозів. Ці питання будуть розглядатися в подальших роботах автора.

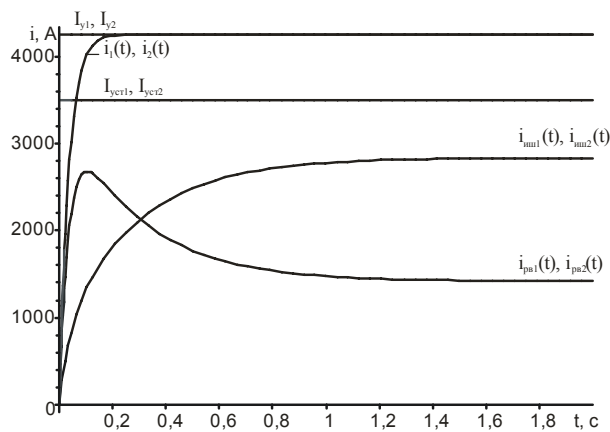


Рис. 9

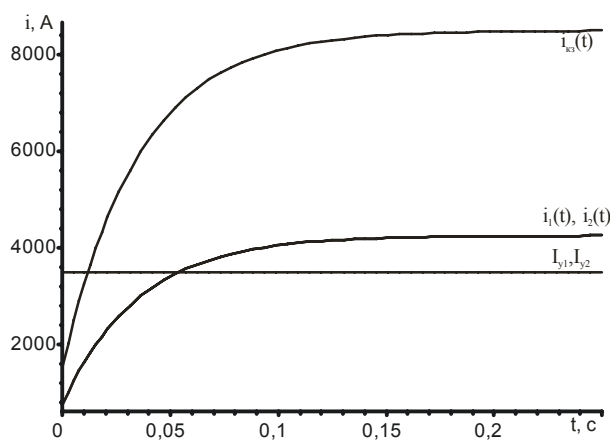


Рис. 10

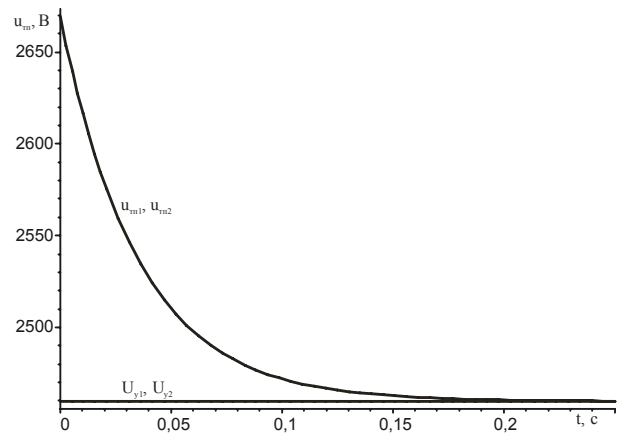


Рис. 11

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Костин, Н. А. Математическое моделирование переходных аварийных электромагнитных процессов в системе электрической тяги постоянного тока. 1. Короткое замыкание без тяговой нагрузки [Текст] / Н. А. Костин, П. Е. Михаличенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 66-71.
2. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов. – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
3. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.
4. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
5. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей [Текст] / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
6. Пупынин, В. Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах [Текст] / дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МИИТ, 1986. – 340 с.

Надійшла до редколегії 16.04.2010.
Прийнята до друку 20.04.2010.

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Викладено результати досліджень, що вказують на можливість використання деяких додаткових показників якості електроенергії в системі електричної тяги постійного струму на вході та виході тягової підстанції. Показано, що ці показники істотно спрощують аналіз якості електроенергії, яка поступає в тягову мережу.

Изложены результаты исследований, указывающие на возможность использования показателей качества электроэнергии в системе электрической тяги постоянного тока на входе и выходе тяговой подстанции. Показано, что эти показатели существенно упрощают анализ качества электроэнергии, поступающей в тяговую сеть.

The research results showing an opportunity to use a power quality rating in a system of direct current electric traction on a traction substation input and output are stated. It is demonstrated that these ratings essentially simplify the quality analysis of power coming into traction circuits.

Вступ

ГОСТ 13109-97 [1] дозволяє чітко розподіляти електроенергію на ту, що відповідає нормам якості, та ту, яка цим нормам не відповідає. Критеріями оцінки цієї самої якості прийняті одинадцять показників якості електроенергії (ПЯЕ). Саме вони і регламентують так звані «нормально допустимі» та «гранично допустимі» норми якості електроенергії (ЯЕ). Тобто ГОСТ 13109-97 встановлює «допустимі» відхилення різних фізичних величин (напруги, її гармонійного складу, частоти та ін.) від певних номінальних значень. Вихід ПЯЕ за ці рамки означає, що електроенергія не може рахуватися як якісна. Також треба зазначити, що цей документ стосується лише електричних мереж систем електропостачання загального призначення змінного однофазного та трифазного струму частотою 50 Гц. Однак відомо, що більше ніж 50% залізничного транспорту України, весь шахтний, міський та кар'єрний електротранспорти живляться випрямленою («постійною») напругою. І, таким чином, постає питання: яким критеріям повинна відповідати електроенергія всередині системи постійного струму, тобто на стороні випрямленої напруги?

Як відомо, висока якість електроенергії необхідна для споживача з багатьох причин. Тому показники якості електроенергії (ПЯЕ) оцінюють відносно точок, в яких споживач приєднаний до системи електропостачання. В системах електричної тяги як постійного, так і змінного струмів джерелом і споживачем електроенергії можна вважати різні підсистеми (рис. 1) і тому, за нашою думкою, значення ПЯЕ потрібно (і можливо) оцінювати відносно таких точок:

1-1', якщо джерелом вважати лише живлячу ЛЕП, а навантаженням – усю систему тяги. При

цьому знайдені ПЯЕ будуть ПЯЕ усієї системи тяги;

2-2', якщо джерелом вважати ЛЕП і тягову підстанцію (ТП), а споживачем – тягову мережу (ТМ) і електрорухомий склад (ЕРС). При цьому знайдені ПЯЕ будуть ПЯЕ на виході усієї ТП чи фідерів;

3-3', якщо навантаженням вважати лише ЕРС. При цьому знайдені ПЯЕ будуть ПЯЕ на струмоприймачі ЕРС.

У випадку точок 1-1' необхідні ПЯЕ визначаються відносно системи змінного струму 50 Гц і вони регламентуються ГОСТ 13109-97. Деякою особливістю є оцінка ПЯЕ в точках 2-2' і 3-3', тобто на стороні випрямлених (але які змінюються в часі) напруги і струму. В [2] зазначено, що і для електромереж постійного струму існують ПЯЕ і вони являють собою: відхилення, колювання і коефіцієнт пульсації напруги.

До зазначеного вище додамо, що в іноземній, і все частіше вітчизняній, літературі під якістю електроенергії часто розуміють не лише збереження параметрів напруги живлячої мережі, але й параметрів струму, який споживається із мережі. Ці ПЯЕ обумовлені реакцією зворотної дії навантаження на джерело електроенергії.

Нижче виконано оцінку ряду (не всіх) ПЯЕ відносно зазначених точок у системі електротяги постійного струму.

Поняття і результати чисельних розрахунків ПЯЕ

Основним документом, що регламентує роботу залізниць України, є «Правила технічної експлуатації залізниць України». В частковому випадку роботу споруд та пристроїв електропо-

стачання залізниць встановлює його розділ 7. Проте, на відміну від систем змінного струму загального призначення, де встановлюються ПЯЕ, по чисельних значеннях яких можливо зробити висновок про відповідність електро-

енергії нормам якості, до системи постійного струму застосовують лише два терміна, що встановлюють тільки рівні напруг: найбільше та найменше.

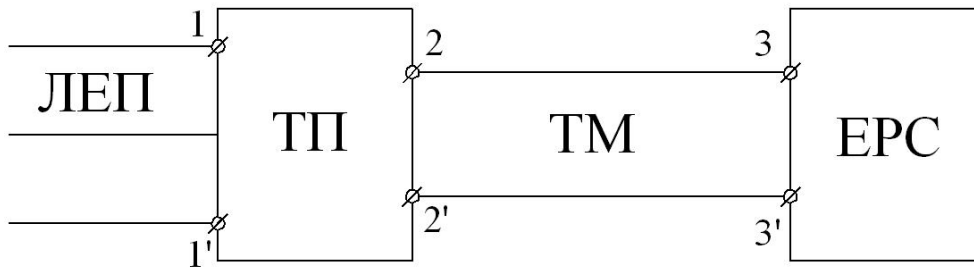


Рис. 1

Під найбільшою напругою розуміють найбільше допустиме значення напруги на шинах тягової підстанції (ТП) та струмоприймача електрорухомого складу (ЕРС) за будь-яких експлуатаційних умов, за виключенням комутаційних режимів. Найбільша напруга на шинах ТП та ЕРС не повинна перевищувати 3850 В на ділянках, де не застосовують рекуперативне гальмування, та 4000 В, де такий вид гальмування застосовують.

Номінальна напруга на шинах ТП складає 3300 В, а на струмоприймачі ЕРС 3000 В.

Під найменшою напругою розуміють найменше допустиме значення напруги на струмоприймачах ЕРС за будь-яких експлуатаційних умов, за виключенням комутаційних режимів. Найменша напруга на струмоприймачах ЕРС має бути не меншою за 2700 В. Найменша напруга на шинах ТП не нормується.

Вимірювання ж напруги на залізничному

транспорті України виконують саме на шині «+» ТП двічі на рік протягом 24 годин (в режимну добу). При цьому день вибирають довільно, а дані фіксують дискретно за показаннями вольтметра з частотою одне значення на годину. На рис. 2 (крива 1) показана крива напруги, що знята в режимну добу на одній з ТП Придніпровської залізниці. Звичайно, такий підхід не дає відповіді на питання: а яке ж дійсне значення напруги на струмоприймачі ЕРС при русі його в міжпідстанційній зоні (МПЗ)? Він навіть не дає інформації про дійсне значення напруги на шинах ТП, бо в проміжках між фіксуваннями значень напруги вона може істотно змінюватися, і таким чином впливає, що отримана крива є якоюсь усередненою і до того ж випадковою. На рис. 2 (крива 2) показана дійсна крива напруги (знята в той же час за допомогою самозаписуючого пристрою).

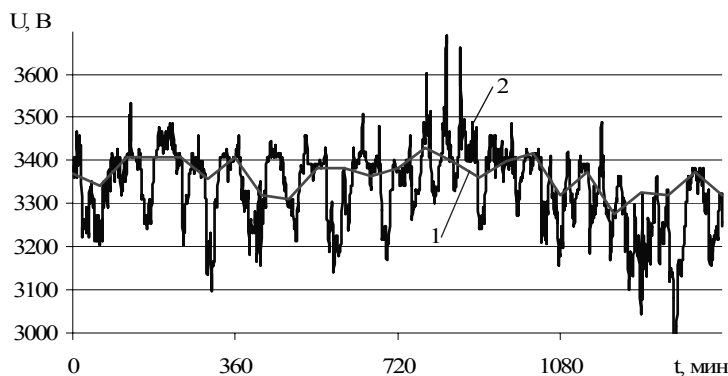


Рис. 2

Таким чином, постає питання про уведення певних ПЯЕ, за допомогою яких можливо робити висновок щодо ЯЕ на виході ТП. Спробуємо визначити деякі з них. Для цього були записані та оброблені 10 реалізацій добових напруг на шині «+3,3 кВ» та осцилограми вхідних

струмів ТП «Горяїново» та ТП «Нижньодніпровськ-Вузол» Придніпровської залізниці.

Відхилення напруги визначають, як відносна різниця між фактичним U та номінальним $U_{ном}$ значеннями напруги на шині «+ 3,3 кВ» ТП:

$$\delta U_0 = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де U – усереднене значення напруги на шині «+3,3 кВ» за хвилину;

$U_{\text{ном}} = 3,3$ кВ – номінальна напруга на шині «+3,3 кВ».

В [3] під відхиленням напруги для ТМ пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка призводить до зміни швидкості руху ЕРС. При цьому слід рахувати відхилення позитивним, якщо $U > U_{\text{ном}}$, та від'ємним, якщо $U < U_{\text{ном}}$.

Дані мінімальних та максимальних значень відхилення напруги на шинах ТП, тобто в точках 2-2', наведені в табл. 1.

Таблиця 1

| Доба | Відхилення напруги, % | |
|------|-----------------------|-------|
| | max | min |
| 1 | 15,93 | -8,43 |
| 2 | 14,19 | -6,91 |
| 3 | 10,67 | -7,62 |
| 4 | 11,80 | -9,82 |
| 5 | 6,57 | -8,80 |
| 6 | 9,15 | -9,39 |
| 7 | 10,62 | -8,82 |
| 8 | 9,50 | -7,03 |
| 9 | 17,41 | -8,65 |
| 10 | 7,97 | -6,6 |

В системі змінного струму ЯЕ по усталеному відхиленню напруги в точці загального приєднання до електричної мережі вважають такою, що відповідає нормам ГОСТ, якщо всі виміряні за кожну хвилину, на протязі встановленого періоду часу (24 години), значення усталеного відхилення напруги знаходяться в інтервалі, що обмежений гранично допустимими значеннями, а не менше 95 % виміряних за той же період часу значень усталеного відхилення напруги знаходяться в інтервалі, що обмежений нормально допустимими значеннями.

Нормально допустимі значення усталеного відхилення напруги для системи постійного струму не встановлені.

Оцінку ПЯЕ в точках 3-3' проводили деякі дослідники і раніше [4]. Для порівняння можна навести отримані значення відхилення напруги на струмоприймачі першого українського електровоза ДЕ-1. Відхилення за максимальним значенням склало 36,7 %, а за мінімальним – 24,45 %.

Під коливаннями напруги розуміють швидкі зміни напруги, що протікають зі швидкістю 1...2 % за секунду. В [3] під коливанням напруги для ТМ пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка не призводить до зміни швидкості руху ЕРС.

Коливання напруги характеризують амплітудою (розмахом) коливань:

$$\delta U_0 = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Провал напруги характеризують довжиною $\Delta t_{\text{П}}$ та глибиною провала $\delta U_{\text{П}}$. Глибину провала визначають за формулою:

$$\delta U_{\text{П}} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Також не можна залишати без уваги і струм, який протікає між енергопостачальною організацією та ТП постійного струму. Якщо порівняти форми підведеної до ТП напруги та споживаний нею струм (рис. 3 і 4), можна зробити однозначний висновок про те, що крива струму значно більше спотворена, ніж крива напруги.

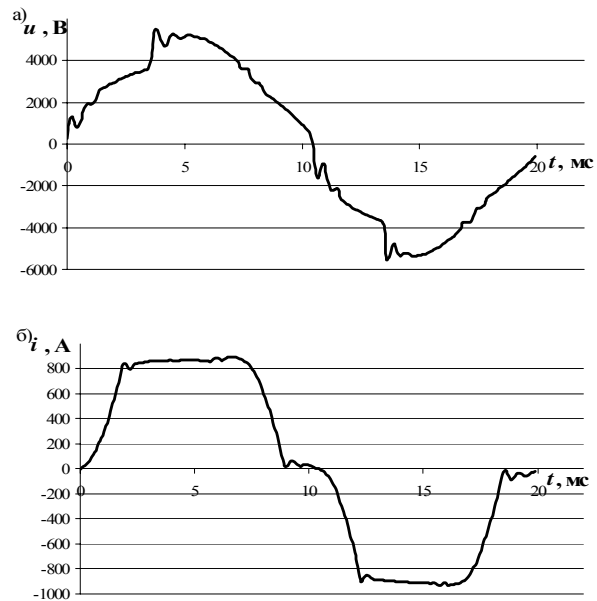


Рис. 3

- а) Осцилограма вхідної напруги до ТП з 6-пульсовим випрямлячем;
б) Осцилограма вхідного струму до ТП

В той же час ГОСТ 13109-97 регламентує ПЯЕ по напрузі, залишаючи осторонь струм. Але при аналізі фізичних процесів виходить, що саме струм, який спотворений комутацією силових випрямлячів на ТП та комутацією на колекторах тягових електричних двигунів (ТЕД) в ЕРС, викликає зворотне спотворення синусоїдної напруги. З огляду на це, можна сказати, що існуючий підхід нормування ПЯЕ є

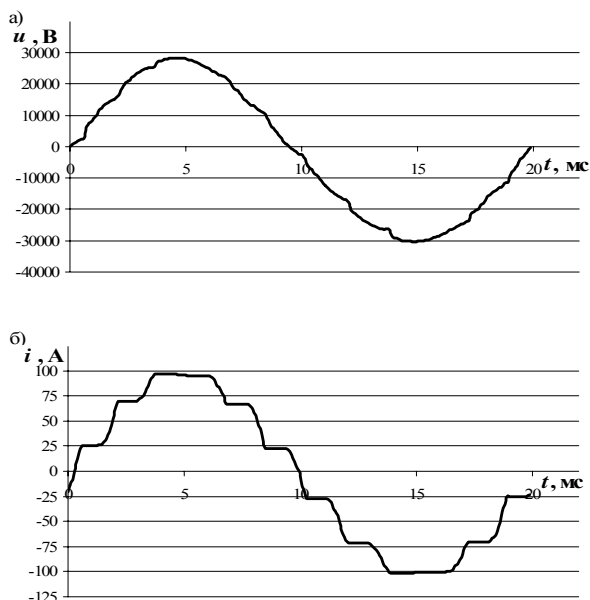


Рис. 4

а) Осцилограма вхідної напруги до ТП з 12-ти пульсовим випрямлячем;

б) Осцилограма вхідного струму до ТП

недостатньо ефективним, адже він направлений на подолання наслідків погіршення ЯЕ, а не на

подолання причини. Як було зазначено вище, за кордоном такий взаємозв'язок враховують. Сумарні спотворення струму в живлячій мережі оцінюють, згідно стандарту IEEE 519-1981, інтегральним коефіцієнтом гармонійного складу струму, $I_{\text{TND}} (\%)$ [5]:

$$I_{\text{TND}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{49} I^{(k)^2}}}{I^{(1)}}, \quad (4)$$

де $I^{(k)}$, $I^{(1)}$ – діючі значення, відповідно, вищих та першої гармонік струму мережі;

TND – Total Harmonic Distortion (Загальне Гармонійне Спотворення).

Допустиме значення коефіцієнта залежить від співвідношення струмів короткого замикання (к.з.) та номінального (табл. 2).

Показник гармонійного складу вхідного до ТП струму був отриманий для приєднання, від якого живляться лише тягові споживачі, тобто в точках 1-1'. Його значення отримане на рівні 9,91 % для 12-пульсної та 17,1 % для 6-пульсної схеми випрямлення.

Таблиця 2

| $I_{\text{КЗ}}/I_{\text{Н}}$ | < 20 | 20...50 | 50...100 | 100...1000 | > 1000 |
|------------------------------|------|---------|----------|------------|--------|
| $I_{\text{TND}} (\%)$ | 5,0 | 8,0 | 12,0 | 15,0 | 20,0 |

Висновки

Таким чином, введення додаткових ПЯЕ, які обмежують ненормальні відхилення електричних величин, дозволить:

1. Вдосконалити систему оцінювання ЯЕ.
2. Ще більш різнобічно розглядати проблему покращення її.
3. Стимулювати як постачальника, так і споживача електроенергії шукати шляхи її вирішення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст].
2. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / Р. Р. Ма-

мошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.
4. Мищенко, Т. Н. Показатели качества электроэнергии в тяговой сети на токоприемниках электровозов постоянного тока [Текст] / Т. Н. Мищенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 23. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 114-116.
5. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) [Текст] / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский // Электротехника. – 1998. – Вып. 3. – С. 10-17.

Надійшла до редколегії 01.04.2010.

Прийнята до друку 14.04.2010.

Д. В. УСТИМЕНКО (ДІПТ)

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ВІД СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Представлено мікропроцесорний пристрій захисту кіл електричних машин від струмів короткого замикання, в якому здійснюється вимикання струму короткого замикання до досягнення ним ударного значення.

Представлено микропроцессорное устройство защиты электрических цепей машин от токов короткого замыкания, в котором отключение тока короткого замыкания осуществляется до достижения ним ударного значения.

The microprocessor device of protection of electric chains of electric motors from short circuit currents, in which switching-off of a short circuit current is carried out before it achieves a shock value, is presented.

Функціонуванню електричних машин властиві штатні і нештатні аварійні режими роботи, яким разом із засобами захисту, що призначені для їх відпрацювання, надають першорядного значення для збереження і подовження строку експлуатації електрообладнання.

З цієї причини особливої актуальності набувають питання діагностики, моніторингу стану електрообладнання в процесі експлуатації; забезпечення надійними засобами захисту попередження передаварійних і аварійних ситуацій.

Сучасний рівень розвитку комп'ютерних технологій і наявність вимірювально-обчислювальних засобів дозволяють вирішувати задачу надійної експлуатації електричних машин і попередження передаварійних і аварійних ситуацій.

Представлено мікропроцесорний пристрій захисту кіл електричних машин від струмів короткого замикання (к.з.), в якому здійснюється вимикання струму к.з. до досягнення ним ударного значення. На рис. 1 наведено структурну схему пристрою.

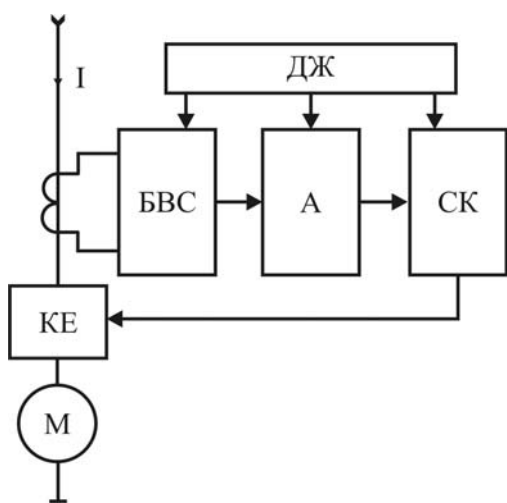


Рис. 1. Структура пристрою захисту

Принцип дії пристрою заснований на порівнянні поточного значення струму з його еталонним значенням і формуванні керуючого сигналу, який діє на швидкодіючий комутаційний елемент в електричному колі машини.

В електричне коло машини (М) ввімкнено вимірювальний пристрій, що входить в склад блоку вимірювання струму (БВС). БВС пов'язаний з аналізатором (А), вихідний сигнал якого через силовий ключ (СК) керує роботою комутаційного елемента (КЕ).

В нормальному режимі роботи комутаційний елемент знаходиться в замкнутому стані, машина отримує живлення, і через її електричне коло протікає струм $I_{\text{норм}}$ (рис. 2).

В аварійному режимі інформація з блоку вимірювання струму надходить до аналізатора. У випадку, коли зміна струму $\Delta I \geq \delta I$ (δI – уставка, що визначається режимом експлуатації), режим контрольної точки є аварійним і силовий ключ формує сигнал керування, який вимикає комутаційний елемент. Комутаційний елемент розриває коло живлення двигуна і вимикає струм к.з.

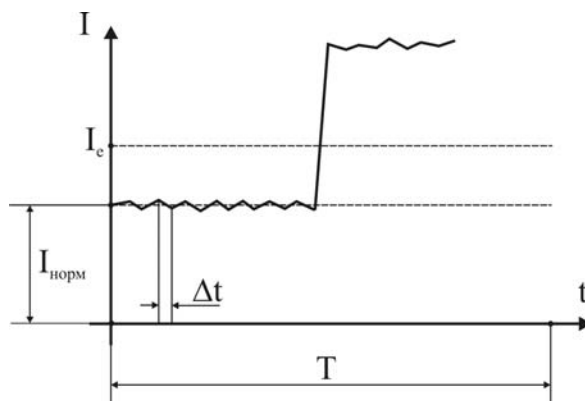


Рис. 2. Графік струму в силовому колі електричної машини

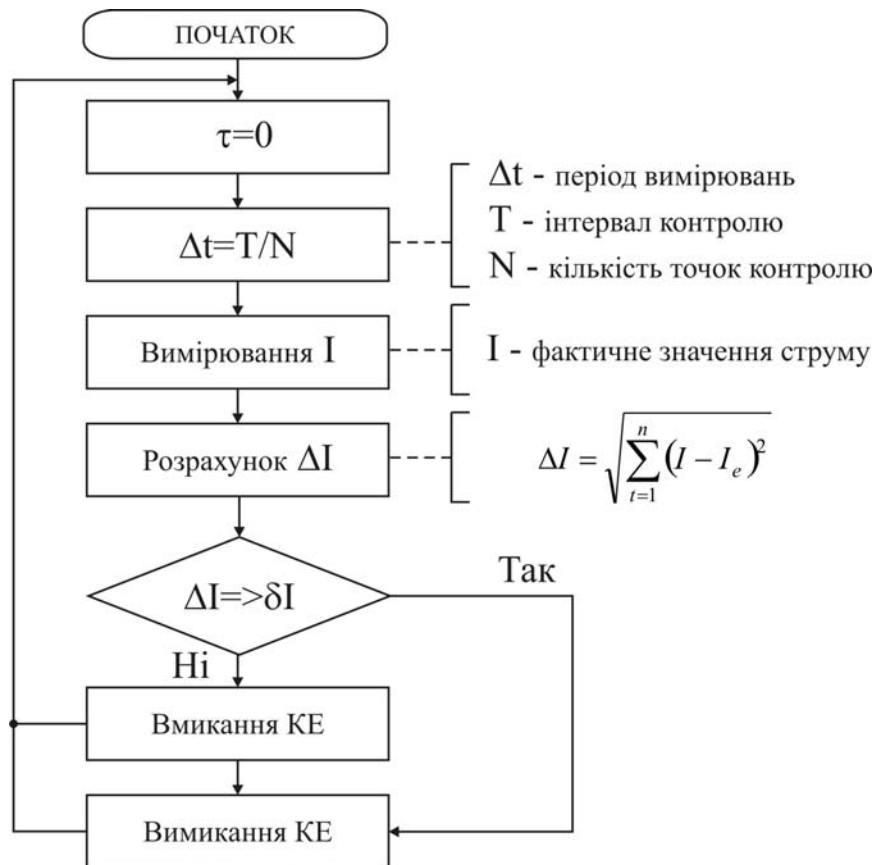


Рис. 3. Алгоритм роботи пристрою захисту

Періодично через відрізки часу $\Delta t = T/N$, де N – кількість точок контролю (рис. 2), вимірюють величину фактичного струму в колі електричної машини I в точках контролю за період T . Потім вираховується величина неузгодженості ΔI між фактичним значенням струму I і заданим (еталонним) I_e струмом за контрольований період часу T , тобто:

$$\Delta I = \sqrt{\sum_{i=1}^n (I - I_e)^2}, \quad (1)$$

де I_e – величина заданого (еталонного) струму, що враховує умови пуску електродвигуна.

У випадку, коли $\Delta I \geq \delta I$ формується сигнал керування, який вимикає комутаційний елемент.

Алгоритм роботи пристрою захисту наведено на рис. 3.

Функцію обрахування величини ΔI у відповідності з виразом (1) виконує аналізатор, який реалізується на мікроконтролері. Цифровий мі-

кроконтролер повинен мати необхідну швидкість і обчислювальну потужність для розрахунку і видачі сигналу керування. Оскільки, чим менший відрізок часу Δt , тим більша вірогідність, що двигун буде відключено від мережі до того, як струм I досягне ударного значення к.з. На сучасному етапі розвитку цифрової інформаційної електроніки більшість спеціалізованих мікроконтролерів відповідають таким вимогам. Наприклад, сімейство PICmicro фірми Microchip [1].

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Однокристалные 8-разрядные FLASH CMOS микроконтроллеры компании Microchip Technology Incorporated: PIC 16F873, PIC 16F874, PIC 16F876, PIC 16F877 [Текст]. – М.: ООО «Микро-Чип», 2002. – 183 с.

Надійшла до редколегії 17.03.2010.

Прийнята до друку 19.03.2010.

РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНОГО ВИПРОБУВАННЯ НА МІЦНІСТЬ СТРІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ ТИПУ Р65 МАРКИ 1/11 ПРОЕКТУ 65111Ж

Наведено результати натурального випробування на міцність стрілочного переводу типу Р65 марки 1/11 проекту 65111Ж.

Изложены результаты натурального испытания на прочность стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта 65111Ж.

The results of full-scale strength test of the switch type R65 mark 1/11 of the design 65111Zh are presented.

Дослідний перевід типу Р65 марки 1/11 проекту 65111Ж запроектовано ДІПТом та Науково-конструкторським технологічним бюро колійного господарства Укрзалізниці й виготовлено ВАТ «Дніпропетровський стрілочний завод».

У порівнянні з аналогом – переводом проекту 1740 – дослідний перевід проекту 65111Ж має такі принципові відмінності: збільшена ширина колії по боковому напрямку з 1 520 мм до 1 530 мм, а радіус перевідної кривої з 300 000 мм до 338 095 мм; використано пружне проміжне кріплення (клеми типів КП-2 та КП-3); суттєво збільшені відстані між залізобетонними брусами. За однакових довжин переводів у комплекті брусів для переводу проекту 65111Ж на дев'ять брусів менше, ніж у переводі проекту 1740. Крім того, на відміну від проекту 1740, у дослідному переводі застосовуються: суцільнолита хрестовина, гостряк гнучкого типу, контррейковий вузол із незалежним кріпленням контррейки, підкладки з виштампуваними ребордами, «гасителі динамічних ударів».

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ

Дослідний стрілочний перевід укладений на головній колії ст. Івківка Придніпровської залізниці (перевід № 3). На початок випробування по ньому було пропущено близько 55 млн т вантажу брутто, з них близько 15 млн т – по боковому напрямку. Стан переводу на початку та протягом випробування відповідав вимогам чинної на той час «Інструкції по устрою та утриманню колії залізниць України» (ЦП/050) [1].

Під час випробування використовувався спеціальний дослідний поїзд: для реалізації швидкостей до 80 км/год включно він складався з двох електровозів серії ВЛ8, двох порожніх

та двох завантажених щеченом піввагонів на візках моделі 18-100 з таким навантаженням на вісь: порожні вагони 5,5...5,6 т, перший завантажений – 18,2 т, другий – 24,5 т; для швидкостей більше 80 км/год як дослідний поїзд використовувався один локомотив серії ЧС7.

Поїздки виконувалися човником (туди і назад) зі швидкостями 5, 20, 40, 60, 80, 100, 120 і 140 км/год по прямому напрямку та 5, 15, 25, 40, 50 – по боковому. З кожною швидкістю було зроблено від 8 до 16 заїздів (половина заїздів у протишерстному напрямку, половина – у шерстному).

Під час випробування досліджувалися напруження в кромках рейкових елементів; вертикальні та горизонтальні сили, що діють на металеві частини, та відповідні їм переміщення рейкових елементів. Допустимі величини сил, деформацій та напружень в елементах стрілочного переводу становлять (відповідно до рекомендацій, розроблених експертами V комісії ОСЗ):

1. Напруження в кромках рейкових елементів, МПа:

| | |
|------------------------|-----|
| – гостряки | 275 |
| – контррейки | 330 |
| – решта елементів..... | 250 |

2. Вертикальні сили взаємодії колеса та рейки у межах стрілки та з'єднувальної частини, кН.....

| | |
|--|-----|
| | 200 |
| 3. Переміщення рейкових елементів, мм: | |
| – вертикальні | 10 |
| – горизонтальні | 4 |

Місця встановлення приладів були визначені з урахуванням результатів раніше виконаного випробування стрілочного переводу проекту 65109Ж-01 [2]. Схеми установки приладів по прямому й боковому напрямках дослідного переводу наведені на рис. 1.

Випробування та розшифровка одержаних даних виконані Колієвипробувальною ГНДЛ ДНУЗТ. Характеристики приладів, методику їх установки та обробки одержаних результатів, техніка статистичної обробки та аналізу одержаних даних не відрізнялися від наведених у [2].

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПЕРЕВОДУ ПІД ЧАС РУХУ ДОСЛІДНОГО ПОЇЗДА ПО ПРЯМОМУ НАПРЯМКУ

Одержані результати відповідно до типу екіпажа та швидкості його руху наведено в табл. 1-5.

Максимальні значення напружень, сил та деформацій завжди реєструвалися під колесами локомотивів серій ВЛ8 і ЧС7 та піввагона з навантаженням на вісь 24,5 т при швидкостях руху дослідного поїзда 80 або 140 км/год.

Для всіх показників та екіпажів спостерігається зростання досліджуваних величини зі збільшенням швидкості. Зміна швидкості з 5 км/год до 80 (140) км/год призводить до збільшення напружень у рейкових елементах та вертикальних сил на 7...26 % (електровоз серії ВЛ8 та піввагони) й на 3...67 % (локомотив серії ЧС7), а горизонтальних сил у 1,5 разу для ВЛ8 та піввагона та в 3,6 разу – для ЧС7.

Напруження в рейкових елементах. Крім гостряка, напруження в кожному перерізі рейки визначалися в трьох точках: в обох кромках

підшови та в неробочій кромці головки. Як уже зазначалося в [2], напруження в неробочій кромці головки необхідно знати для визначення горизонтальної сили, що діє на рейку, за методикою д-ра техн. наук О. П. Єршкова, тому як самостійна величина вони не аналізувались.

Найбільші напруження для всіх типів екіпажів та швидкостей руху дослідного поїзда спостерігались у зовнішній кромці підшови рейки. Їх максимальні ймовірні величини перевищували відповідні напруження у внутрішніх кромках у середньому на 34...39 % (для різних екіпажів), а максимальна різниця складала 83...123 %. Тому подальші висновки стосуються лише їх.

Величини напружень залежать від місця розташування приладу: для гостряка різниця між найменшим та найбільшим значеннями доходила до 44 %, для з'єднувальної частини – до 79 %. Для різних швидкостей розташування максимумів теж не було постійним, хоча при однакових швидкостях положення максимумів для різних екіпажів не дуже відрізнялися між собою. Максимальні значення напружень у межах рамних рейок склали 141,5 МПа, гостряка – 121,7 МПа (прилад «б»), з'єднувальної частини – 143,6 МПа, що не перевищує відповідних допустимих значень.

Напруження в контррейці. Гістограма напружень у неробочій грані контррейки не дає змоги використати для вирівнювання цих даних

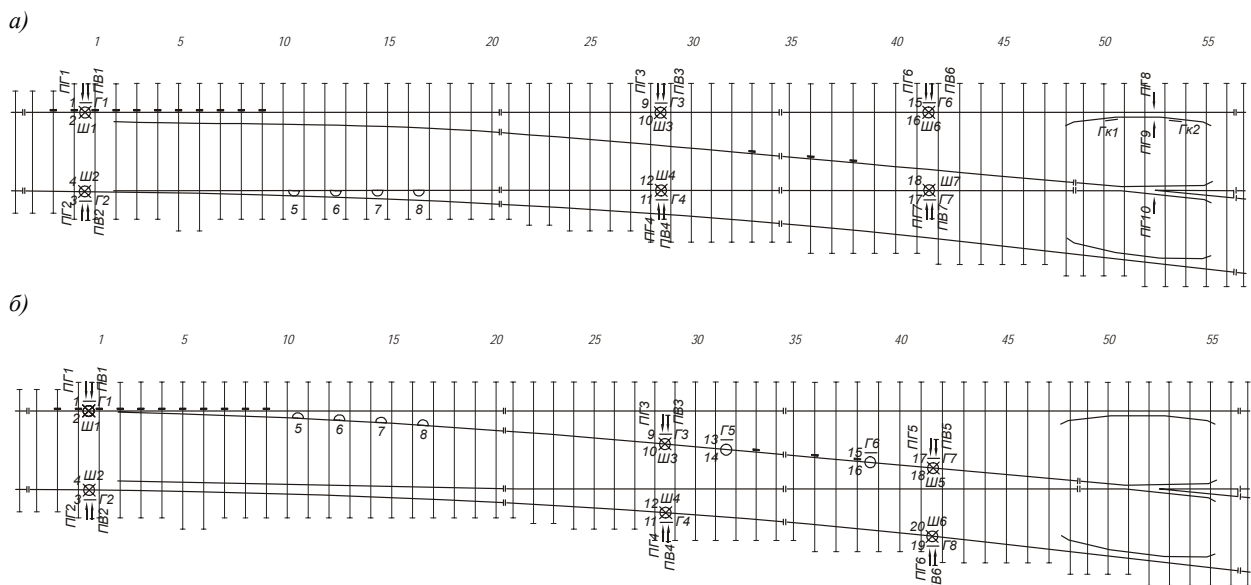


Рис. 1. Схеми установки приладів: а – по прямому напрямку переходу; б – по боковому

- Умовні позначення:
- × – прилад для вимірювання вертикальних сил, що діють на рейкові елементи;
 - D, — – прилади для вимірювання напружень відповідно в кромці підшови та головки рейки;
 - ↑, ↓ – прилади для вимірювання відповідно вертикальних і горизонтальних переміщень рейки;
 - Гк – прилад для вимірювання напружень у неробочій грані контррейки;
 - ⊕ – «гаситель динамічних ударів»

Середні ($\bar{\sigma}$) та максимальні ймовірні (σ_{\max}^i) величини напружень у рейкових елементах, одержані під час руху дослідного поїзда по прямому напрямку, МПа

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | 5 | | 20 | | 40 | | 60 | | 80 | | 100 | | 120 | | 140 | |
| | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 92,9 | 124,0 | 94,0 | 123,3 | 94,6 | 122,0 | 103,7 | 134,3 | 106,2 | 141,5 | – | – | – | – | – | – |
| Порожній піввагон | 40,4 | 62,0 | 44,5 | 62,1 | 44,7 | 65,6 | 44,9 | 70,4 | 51,3 | 86,2 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | 76,5 | 103,4 | 79,7 | 109,2 | 85,7 | 118,3 | 84,0 | 113,4 | 95,5 | 127,4 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | 96,3 | 118,3 | 92,9 | 119,3 | 96,1 | 123,7 | 94,9 | 129,9 | 103,6 | 138,7 | – | – | – | – | – | – |
| ЧС7 | 92,3 | 118,9 | – | – | – | – | 103,9 | 116,8 | 107,1 | 120,6 | 90,4 | 114,9 | 80,0 | 122,6 | 97,8 | 139,9 |
| Гостряк | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 85,6 | 117,7 | 76,2 | 100,3 | 81,0 | 111,4 | 83,1 | 113,8 | 81,0 | 111,2 | – | – | – | – | – | – |
| Порожній піввагон | 30,5 | 46,7 | 22,8 | 45,6 | 25,1 | 43,4 | 26,9 | 41,9 | 25,3 | 53,6 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | 67,1 | 85,3 | 61,1 | 75,1 | 69,6 | 92,7 | 64,4 | 96,6 | 86,0 | 118,7 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | 87,0 | 104,2 | 76,0 | 100,6 | 94,3 | 121,0 | 81,3 | 110,2 | 88,1 | 121,7 | – | – | – | – | – | – |
| ЧС7 | 65,7 | 79,0 | – | – | – | – | 63,4 | 97,4 | 76,2 | 94,6 | 81,2 | 101,5 | 81,2 | 103,9 | 86,6 | 113,6 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 73,2 | 96,7 | 69,0 | 95,5 | 67,8 | 97,0 | 69,9 | 100,9 | 78,1 | 112,0 | – | – | – | – | – | – |
| Порожній піввагон | 19,0 | 31,6 | 19,1 | 33,2 | 22,7 | 37,2 | 22,2 | 34,7 | 25,2 | 58,8 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | 54,4 | 71,8 | 50,4 | 67,1 | 46,7 | 72,6 | 57,1 | 85,1 | 64,9 | 97,4 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | 67,3 | 94,2 | 62,2 | 91,7 | 81,0 | 105,0 | 71,3 | 104,3 | 84,4 | 118,5 | – | – | – | – | – | – |
| ЧС7 | 74,8 | 85,8 | – | – | – | – | 69,1 | 88,2 | 70,3 | 95,1 | 84,2 | 114,7 | 76,0 | 117,9 | 79,2 | 143,6 |

нормальний закон розподілу – на ній присутні два максимуми. Перший, більший за модулем, розташований у від'ємній частині осі абсцис (-20...0 МПа), другий, менший, – у додатній (40...70 МПа).

Це пояснюється тим, що під час руху по прямому напрямку переводу більшість осей екіпажа проходить контррейку без контакту з нею (напруження стискання, більший максимум). Лише деяка частина осей направляється контррейкою, що й обумовлює удар колеса об неї та, як наслідок, появу напружень розтягнення.

Зважаючи на це, у табл. 2 наведено лише інтервали експериментально одержаних напружень. Максимальне значення напруження складає 185,7 МПа, що майже в 1,8 разу менше за допустиму величину.

Вертикальні сили та переміщення рейок. Максимальні значення сил у межах рамних рейок досягли 189,8 кН, з'єднувальної частини – 194,0 кН. Причому в обох випадках ці величини зареєстровано під колесами піввагона, завантаженого до повної вантажопідйомності.

Найбільше вертикальне переміщення зафіксовано в передньому вильоті рамних рейок теж

під колесами піввагона з навантаженням на вісь 24,5 т при швидкості руху 80 км/год та складає майже 6,0 мм (за межами переднього вильоту вертикальні переміщення не досягали 2,7 мм).

Величини сил та переміщень не перевищують допустимих у всьому діапазоні швидкостей.

Горизонтальні сили та переміщення рейок. Максимальні значення горизонтальних сил у межах рамних рейок складають 52,0 кН, з'єднувальної частини – 55,2 кН.

У зв'язку з тим, що прилади для реєстрації горизонтальних переміщень рейок були розташовані в кожному перерізі колії один навпроти іншого, найчастіше один із них фіксував переміщення рейки всередину колії (від'ємна величина), а інший – назовні. Але модулі від'ємних значень перевищували додатні значення на 30...40 %. Це можна пояснити відсутністю на переводі підхилу рейок та незначними горизонтальними силами, що діють на металеві частини під час руху поїздів по прямому напрямку. Найбільше значення переміщення по довжині переводу складає -2,2 мм.

Таблиця 2

Напруження в неробочій грані контррейки, МПа

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | |
|-------------------|------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
| | 5 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
| ВЛ8 | -19,4...115,3 | -15,1...97,8 | -15,5...146,4 | -19,0...81,4 | -14,6...164,9 | – | – | – |
| Порожній піввагон | -10,9...16,5 | -13,4...30,1 | -13,4...32,3 | -18,6...30,6 | -21,2...43,9 | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | -14,6...-6,6 | -13,4...-9,9 | -11,6...-8,6 | -19,9...103,4 | -27,1...74,5 | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | -15,4...48,1 | -16,8...43,1 | -16,8...23,7 | -23,7...75,4 | -27,5...-16,8 | – | – | – |
| ЧС7 | -1,7...5,4 | – | – | -1,7...7,5 | -1,5...10,2 | -1,5...86,8 | -21,3...134,3 | -18,3...185,7 |

Середні (\bar{P}) та максимальні ймовірні (P_{\max}^i) величини вертикальних сил, одержані під час руху дослідного поїзда по прямому напрямку, кН

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | 5 | | 20 | | 40 | | 60 | | 80 | | 100 | | 120 | | 140 | |
| | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 117,8 | 143,2 | 116,5 | 153,8 | 118,1 | 151,8 | 125,0 | 150,0 | 115,7 | 157,8 | – | – | – | – | – | – |
| Порожній піввагон | 24,6 | 44,8 | 21,1 | 52,9 | 31,9 | 52,7 | 30,5 | 50,7 | 34,5 | 63,1 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | 91,8 | 110,6 | 88,7 | 136,8 | 98,5 | 141,2 | 97,8 | 139,0 | 96,1 | 149,8 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | 129,5 | 155,8 | 126,9 | 161,9 | 134,2 | 183,3 | 137,2 | 177,2 | 120,1 | 189,8 | – | – | – | – | – | – |
| ЧС7 | 110,7 | 132,8 | – | – | – | – | 114,6 | 132,1 | 118,7 | 141,3 | 104,3 | 140,7 | 120,8 | 151,8 | 122,0 | 165,9 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 119,4 | 149,2 | 119,5 | 147,9 | 129,3 | 155,3 | 129,1 | 159,1 | 136,3 | 176,4 | – | – | – | – | – | – |
| Порожній піввагон | 28,4 | 46,4 | 31,0 | 47,4 | 30,9 | 64,2 | 31,7 | 62,3 | 40,7 | 71,0 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | 97,5 | 122,0 | 91,5 | 121,7 | 94,3 | 145,9 | 102,9 | 142,8 | 114,2 | 167,7 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | 137,8 | 165,9 | 130,8 | 163,0 | 138,7 | 185,6 | 132,0 | 181,8 | 156,0 | 194,0 | – | – | – | – | – | – |
| ЧС7 | 117,5 | 128,6 | – | – | – | – | 128,7 | 147,0 | 121,4 | 143,9 | 131,7 | 159,0 | 132,0 | 165,9 | 137,8 | 192,8 |

Ходова рейка та контррейка в межах хрестовинного вузла на кожному кінці бруса розміщені на одній підкладці, тому їх переміщення пов'язані між собою. Розподіли цих переміщень практично не відрізняються від нормальних, спостерігається тільки невелика позитивна асиметрія для переміщень рейки та негативна – для переміщень контррейки. Цілком імовірно, що за наявності більшої кількості горизонтальних ударів – як це спостерігалось під час випробування переводу проекту 65109Ж-01 [2] – розподіл був би двомодальним. Переміщення хрестовини відповідають нормальному закону краще. Найбільші значення переміщень рейки досягають -2,3 мм, контррейки 3,6 мм, хрестовини -1,3 мм.

Таким чином, горизонтальні переміщення елементів дослідного стрілочного переводу теж не перевищують допустимої величини.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ПЕРЕВОДУ ПІД ЧАС РУХУ ДОСЛІДНОГО ПОЇЗДА ПО БОКОВОМУ НАПРЯМКУ

Результати досліджень напружень, сил та деформацій, одержані під час руху дослідного поїзда по боковому напрямку, наведено в табл. 6-10. У всіх випадках найбільші значення показників зареєстровано під колесами електровоза серії ВЛ8 та піввагона з навантаженням на вісь 24,5 т.

Напруження в рейкових елементах. Аналогічно випробуванням [2], напруження в зовнішніх та внутрішніх кромках підшви рейок відрізняються більшою мірою, ніж під час руху дослідного поїзда по прямому напрямку (у зовнішніх кромках напруження більші в середньому в 1,7...1,8 разу при максимальній різниці в 3,2 разу).

У передньому вильоті рамних рейок найбільші напруження реєструвалися приладом «1»

Таблиця 4

Середні (\bar{H}) та максимальні ймовірні (H_{\max}^i) величини горизонтальних сил, одержані під час руху дослідного поїзда по прямому напрямку, кН

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | 5 | | 20 | | 40 | | 60 | | 80 | | 100 | | 120 | | 140 | |
| | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 10,2 | 37,6 | 5,1 | 29,8 | 5,2 | 28,5 | 5,8 | 32,5 | 8,9 | 38,3 | – | – | – | – | – | – |
| Порожній піввагон | 0,6 | 10,4 | 2,1 | 11,7 | 2,1 | 12,3 | 2,1 | 14,2 | 4,5 | 22,1 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | 2,7 | 21,3 | 2,2 | 21,5 | 4,8 | 29,7 | 6,5 | 23,8 | 16,4 | 42,0 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | 9,5 | 29,7 | 4,9 | 21,9 | 9,6 | 31,8 | 10,4 | 34,2 | 13,6 | 42,2 | – | – | – | – | – | – |
| ЧС7 | 11,2 | 26,6 | – | – | – | – | 11,4 | 36,7 | 10,5 | 31,3 | 8,2 | 22,5 | 8,2 | 40,7 | 12,0 | 52,0 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 6,0 | 26,2 | 5,8 | 27,2 | 6,2 | 29,3 | 7,4 | 34,2 | 10,2 | 38,6 | – | – | – | – | – | – |
| Порожній піввагон | -1,4 | -10,5 | -1,7 | -10,6 | -1,2 | -9,8 | -2,4 | -11,3 | 6,4 | 28,5 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 18,2 т/в | 0,2 | 15,5 | 3,8 | 16,2 | 8,6 | 15,5 | 6,4 | 21,0 | 8,3 | 35,5 | – | – | – | – | – | – |
| Піввагон 24,5 т/в | 2,8 | 30,7 | 1,1 | 31,3 | 11,2 | 26,8 | 6,2 | 26,7 | 14,8 | 30,0 | – | – | – | – | – | – |
| ЧС7 | 3,0 | 15,5 | – | – | – | – | 3,7 | 20,3 | 9,6 | 28,3 | 16,7 | 46,2 | 9,5 | 46,5 | 7,8 | 55,2 |

Горизонтальні переміщення ходової рейки, контррейки та хрестовини, мм

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | 5 | | 20 | | 40 | | 60 | | 80 | | 100 | | 120 | | 140 | |
| | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i |
| Ходова рейка | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | -0,31 | -1,81 | -0,28 | -2,15 | -0,24 | -1,68 | -0,26 | -1,81 | -0,39 | -1,78 | - | - | - | - | - | - |
| Порожній піввагон | -0,33 | -0,73 | -0,36 | -0,88 | -0,28 | -0,75 | -0,26 | -1,06 | -0,13 | -1,01 | - | - | - | - | - | - |
| Піввагон 18,2 т/в | -0,69 | -1,10 | -0,73 | -1,25 | -0,68 | -1,30 | -0,52 | -1,69 | -0,43 | -1,81 | - | - | - | - | - | - |
| Піввагон 24,5 т/в | -0,62 | -1,59 | -0,74 | -1,60 | -0,96 | -1,66 | -0,78 | -1,65 | -0,73 | -2,24 | - | - | - | - | - | - |
| ЧС7 | -0,87 | -1,46 | - | - | - | - | -1,18 | -1,48 | -1,28 | -1,74 | -0,37 | -1,78 | -0,72 | -1,45 | -0,69 | -1,28 |
| Контррейка | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 0,79 | 2,34 | 1,05 | 3,26 | 1,17 | 3,58 | 1,16 | 3,24 | 1,34 | 3,40 | - | - | - | - | - | - |
| Порожній піввагон | 0,27 | 0,80 | 0,33 | 0,92 | 0,42 | 0,93 | 0,45 | 1,10 | 0,49 | 1,54 | - | - | - | - | - | - |
| Піввагон 18,2 т/в | 0,36 | 0,54 | 0,34 | 0,68 | 0,56 | 1,18 | 0,59 | 1,36 | 0,94 | 2,39 | - | - | - | - | - | - |
| Піввагон 24,5 т/в | 0,41 | 1,31 | 0,47 | 1,43 | 0,66 | 2,17 | 0,73 | 1,83 | 0,87 | 1,83 | - | - | - | - | - | - |
| ЧС7 | 0,32 | 0,97 | - | - | - | - | 0,83 | 1,56 | 0,99 | 1,82 | 1,69 | 2,96 | 0,47 | 0,89 | 0,44 | 0,95 |
| Хрестовина | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | -0,28 | -0,81 | -0,20 | -0,66 | -0,11 | -0,83 | -0,05 | -0,81 | -0,13 | -1,28 | - | - | - | - | - | - |
| Порожній піввагон | -0,16 | -0,45 | -0,13 | -0,64 | -0,09 | -0,41 | -0,06 | -0,56 | -0,10 | -0,81 | - | - | - | - | - | - |
| Піввагон 18,2 т/в | -0,21 | -0,72 | -0,19 | -0,79 | -0,13 | -0,56 | -0,10 | -0,72 | -0,15 | -0,97 | - | - | - | - | - | - |
| Піввагон 24,5 т/в | -0,29 | -0,78 | -0,17 | -0,75 | -0,12 | -0,48 | -0,11 | -0,77 | -0,24 | -1,26 | - | - | - | - | - | - |
| ЧС7 | -0,20 | -0,36 | - | - | - | - | 0,02 | 0,36 | 0,04 | 0,24 | -0,13 | -0,54 | -0,25 | -0,54 | -0,36 | -0,78 |

у випадку пошерстного напрямку руху дослідного поїзда. Найбільше значення одержано при швидкості 40 км/год – 208,3 МПа. Хочеться відмітити, що зі збільшенням швидкості дослідного поїзда з 5 км/год до 50 км/год напруження збільшилися лише на 8 %.

Максимальні напруження в підшві гостряка спостерігалися теж у повному перерізі (як і під час випробування переводу проекту 65109Ж-01 [2]), але ближче до кінця стругання (прилади «5» та «6»). Найбільша величина зареєстрована в разі протишерстного напрямку руху дослідного поїзда зі швидкістю 50 км/год і складає 181,5 МПа.

Розташування максимумів напружень у підшві рейок з'єднувальної частини для піввагонів та локомотива відрізняються між собою. Для ВЛ8 найбільші напруження були зареєстровані приладом «9», а для піввагонів – приладами «15», «17» та «19» (при швидкості 25 км/год та більше – тільки приладами, що розміщувалися на зовнішній рейці). Максимальне значення одержано при швидкості 50 км/год – 179,2 МПа.

Таким чином, напруження у рейкових елементах дослідного стрілочного переводу допустимих не перевищують.

Таблиця 6

Середні ($\bar{\sigma}$) та максимальні ймовірні (σ_{\max}^i) величини напружень у рейкових елементах, одержані під час руху дослідного поїзда по боковому напрямку, МПа

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | 5 | | 15 | | 25 | | 40 | | 50 | |
| | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i | $\bar{\sigma}$ | σ_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 150,6 | 184,6 | 151,8 | 184,6 | 142,7 | 178,4 | 156,7 | 188,7 | 166,5 | 199,2 |
| Порожній піввагон | 58,2 | 78,2 | 57,0 | 74,3 | 49,7 | 77,7 | 60,8 | 83,8 | 60,5 | 89,0 |
| Піввагон 18,2 т/в | 115,5 | 145,9 | 125,3 | 145,7 | 117,2 | 134,6 | 137,7 | 160,4 | 134,2 | 170,4 |
| Піввагон 24,5 т/в | 156,2 | 192,3 | 151,2 | 191,1 | 148,6 | 185,3 | 168,7 | 208,3 | 171,5 | 203,1 |
| Гостряк | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 105,7 | 141,2 | 104,2 | 133,8 | 99,3 | 139,5 | 117,1 | 150,8 | 139,2 | 181,5 |
| Порожній піввагон | 33,4 | 54,0 | 32,5 | 47,9 | 35,4 | 64,0 | 35,9 | 49,0 | 39,1 | 55,1 |
| Піввагон 18,2 т/в | 60,2 | 90,1 | 63,8 | 83,9 | 64,0 | 87,0 | 65,9 | 100,2 | 73,7 | 103,8 |
| Піввагон 24,5 т/в | 82,5 | 116,6 | 78,6 | 108,4 | 78,3 | 103,6 | 95,4 | 130,5 | 97,8 | 128,7 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 136,3 | 155,0 | 130,9 | 165,4 | 122,4 | 161,1 | 137,4 | 178,9 | 135,8 | 179,2 |
| Порожній піввагон | 22,6 | 41,5 | 25,7 | 40,4 | 20,2 | 38,8 | 24,9 | 45,1 | 26,8 | 44,7 |
| Піввагон 18,2 т/в | 65,6 | 83,3 | 67,2 | 88,7 | 71,5 | 95,8 | 74,0 | 107,6 | 75,2 | 116,3 |
| Піввагон 24,5 т/в | 76,7 | 109,3 | 81,0 | 113,7 | 91,6 | 121,0 | 100,2 | 130,4 | 99,4 | 135,8 |

Вертикальні сили та переміщення рейок. Максимальні значення вертикальних сил одержано при швидкості 50 км/год і вони складають 193,5 кН для переднього вильоту рамних рейок та 195,7 кН для з'єднувальної частини. Допустима величина в обох випадках не перевищена.

Різниця між вертикальними переміщеннями рейок, одержаними під час руху дослідного по-

їзда по боковому та по прямому напрямках, практично відсутня.

Горизонтальні сили та переміщення рейок, зміна ширини колії. Якісні картини напружень, горизонтальних сил та переміщень головки рейки добре збігаються між собою, що підтверджує тісний зв'язок між напруженнями в зовнішніх кромках та горизонтальними силами.

Таблиця 7

Середні (\bar{P}) та максимальні ймовірні (P_{\max}^i) величини вертикальних сил, одержані під час руху дослідного поїзда по боковому напрямку, кН

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | 5 | | 15 | | 25 | | 40 | | 50 | |
| | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i | \bar{P} | P_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 129,8 | 163,3 | 121,2 | 153,7 | 117,9 | 154,0 | 128,4 | 166,4 | 144,3 | 188,7 |
| Порожній піввагон | 29,8 | 59,3 | 28,3 | 53,4 | 29,7 | 52,5 | 29,5 | 50,6 | 29,0 | 57,8 |
| Піввагон 18,2 т/в | 90,9 | 126,1 | 101,0 | 119,4 | 90,0 | 130,8 | 100,0 | 139,3 | 102,5 | 130,2 |
| Піввагон 24,5 т/в | 135,7 | 162,4 | 127,4 | 162,1 | 132,6 | 161,7 | 156,1 | 178,9 | 149,6 | 193,5 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 135,1 | 159,3 | 142,4 | 171,1 | 138,2 | 168,9 | 141,2 | 183,0 | 147,0 | 185,8 |
| Порожній піввагон | 33,2 | 49,5 | 35,0 | 54,1 | 28,6 | 51,1 | 34,4 | 64,7 | 31,0 | 54,6 |
| Піввагон 18,2 т/в | 98,1 | 112,5 | 100,7 | 121,8 | 98,4 | 125,6 | 97,7 | 135,4 | 100,1 | 126,2 |
| Піввагон 24,5 т/в | 133,3 | 155,9 | 121,4 | 167,9 | 129,9 | 168,9 | 147,3 | 180,9 | 146,7 | 195,7 |

Таблиця 8

Середні (\bar{H}) та максимальні ймовірні (H_{\max}^i) величини горизонтальних сил, одержані під час руху дослідного поїзда по боковому напрямку, кН

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | 5 | | 15 | | 25 | | 40 | | 50 | |
| | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i | \bar{H} | H_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 41,8 | 57,4 | 70,3 | 85,8 | 66,2 | 88,3 | 80,3 | 104,6 | 75,4 | 107,0 |
| Порожній піввагон | 14,6 | 34,8 | 19,2 | 28,0 | 13,1 | 26,3 | 24,4 | 35,4 | 22,9 | 33,2 |
| Піввагон 18,2 т/в | 35,3 | 45,0 | 52,4 | 73,6 | 53,4 | 61,2 | 64,8 | 84,0 | 56,6 | 71,7 |
| Піввагон 24,5 т/в | 50,7 | 64,9 | 52,8 | 81,0 | 61,4 | 88,2 | 70,4 | 91,3 | 79,4 | 88,7 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 35,7 | 67,3 | 59,3 | 93,0 | 64,8 | 93,8 | 85,5 | 110,4 | 84,2 | 107,0 |
| Порожній піввагон | 5,3 | 17,5 | 10,1 | 22,1 | 11,8 | 28,2 | 4,9 | 32,5 | 11,0 | 25,0 |
| Піввагон 18,2 т/в | 23,2 | 41,9 | 26,4 | 56,7 | 39,6 | 52,8 | 38,0 | 59,2 | 38,0 | 64,5 |
| Піввагон 24,5 т/в | 21,8 | 49,8 | 33,0 | 52,2 | 37,1 | 62,5 | 43,7 | 66,6 | 41,4 | 71,6 |

Таблиця 9

Середні (\bar{y}) та максимальні ймовірні (y_{\max}^i) величини горизонтальних переміщень рейкових елементів, одержані під час руху дослідного поїзда по боковому напрямку, мм

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| | 5 | | 15 | | 25 | | 40 | | 50 | |
| | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i | \bar{y} | y_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 0,72 | 1,38 | 1,24 | 2,05 | 1,40 | 2,14 | 1,42 | 2,28 | 1,53 | 2,07 |
| Порожній піввагон | -0,40 | -0,86 | -0,22 | -0,69 | 0,53 | 0,86 | 0,53 | 0,77 | 0,82 | 1,06 |
| Піввагон 18,2 т/в | -0,47 | -0,80 | 0,72 | 1,22 | 0,98 | 1,37 | 1,22 | 1,78 | 1,27 | 1,59 |
| Піввагон 24,5 т/в | 0,53 | 0,96 | 0,60 | 1,07 | 1,08 | 1,55 | 1,55 | 2,01 | 1,34 | 1,81 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 0,96 | 1,53 | 2,17 | 2,87 | 2,10 | 2,65 | 2,54 | 3,31 | 2,55 | 3,09 |
| Порожній піввагон | -0,35 | -0,78 | 0,49 | 1,19 | 0,51 | 1,34 | 0,60 | 1,26 | 0,62 | 1,04 |
| Піввагон 18,2 т/в | -0,69 | -0,84 | 0,64 | 0,97 | 0,74 | 1,15 | 0,56 | 1,30 | 0,98 | 1,41 |
| Піввагон 24,5 т/в | 0,27 | 0,82 | 0,61 | 0,87 | 0,70 | 1,12 | 0,74 | 1,39 | 0,76 | 1,08 |

**Середні ($\bar{\Delta}$) та максимальні ймовірні (Δ_{\max}^i) величини зміни ширини колії,
одержані під час руху дослідного поїзда по боковому напрямку, мм**

| Рухомий склад | Швидкість руху, км/год | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | 5 | | 15 | | 25 | | 40 | | 50 | |
| | $\bar{\Delta}$ | Δ_{\max}^i | $\bar{\Delta}$ | Δ_{\max}^i | $\bar{\Delta}$ | Δ_{\max}^i | $\bar{\Delta}$ | Δ_{\max}^i | $\bar{\Delta}$ | Δ_{\max}^i |
| Рамні рейки | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 0,95 | 1,44 | 1,12 | 1,78 | 1,51 | 1,92 | 1,37 | 2,09 | 1,81 | 2,58 |
| Порожній піввагон | -0,55 | -1,01 | 0,30 | 0,87 | 0,67 | 1,36 | 0,27 | 0,70 | 0,50 | 1,05 |
| Піввагон 18,2 т/в | 0,53 | 1,04 | 1,30 | 1,73 | 1,79 | 1,94 | 1,38 | 2,27 | 1,56 | 1,86 |
| Піввагон 24,5 т/в | 1,02 | 1,67 | 0,97 | 1,45 | 1,62 | 2,24 | 2,25 | 2,88 | 2,27 | 2,32 |
| З'єднувальна частина | | | | | | | | | | |
| ВЛ8 | 1,02 | 1,53 | 1,73 | 2,43 | 1,53 | 2,24 | 2,90 | 3,54 | 2,39 | 3,12 |
| Порожній піввагон | -0,55 | -1,16 | -0,69 | -1,46 | 1,12 | 1,44 | 0,75 | 1,17 | 0,63 | 1,13 |
| Піввагон 18,2 т/в | 0,41 | 1,11 | 0,66 | 1,29 | 0,66 | 1,19 | 1,14 | 2,07 | 1,23 | 2,21 |
| Піввагон 24,5 т/в | 0,77 | 1,50 | 0,82 | 1,26 | 0,64 | 1,14 | 1,43 | 2,10 | 1,27 | 1,73 |

Максимальні значення горизонтальних сил та переміщень у межах рамних рейок складають, відповідно, 107,0 кН та 2,3 мм, для з'єднувальної частини – 110,4 кН і 3,3 мм, що перебуває в межах інтервалу допустимих величин. Максимуми зареєстровано при швидкостях дослідного поїзда 40...50 км/год. Напрямок переміщення рейок збігається з напрямком дії горизонтальної сили.

Залежність зміни ширини колії від швидкості теж добре збігається з графіками горизонтальних сил. Максимальне збільшення ширини колії складає 2,9 мм для переднього вильоту рамної рейки та 3,5 мм для з'єднувальної частини.

ВИСНОВОК

Показники напружено-деформованого стану стрілочного переводу типу Р65 марки 1/11 проекту 65111Ж, одержані під час його натурального

випробування на міцність, не перевищують допустимих величин при всіх реалізованих швидкостях руху дослідного поїзда (по прямому напрямку – до 140 км/год, по боковому – до 50 км/год).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Інструкція по устрою та утриманню колії залізниць України. ЦП-0050 [Текст]: затв.: Наказ Укрзалізниці 06.04.98. № 82-Ц. – К.: Транспорт України, 1999. – 248 с.
2. Орловський, А. М. Результати натурального випробування на міцність стрілочного переводу типу Р65 марки 1/9 проекту 65109Ж-01 [Текст] / А. М. Орловський, В. П. Гнатенко, К. В. Мойсєєнко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 129-137.

Надійшла до редколегії 15.12.2009.

Прийнята до друку 28.12.2009.

И. П. КОРЖЕНЕВИЧ (ДИИТ), О. А. СУСЛОВ (ИрГУПС),
Б. И. ТОРОПОВ (КИЕВГИПРОТРАНС)

ПЛАН ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ, ПРОБЛЕМЫ ЕГО СЪЕМКИ, РАСЧЕТОВ И РЕАЛИЗАЦИИ

Розглянуто сучасні проблеми плану залізничної колії від зйомки до реалізації проекту і запропоновано напрями їх вирішення.

Рассмотрены современные проблемы плана железнодорожного пути от съемки до реализации проекта и предложены направления их решения.

The modern problems of plan of railway track from survey to realization of project are considered and the directions of their solution are offered.

В настоящее время ни у кого не возникает сомнений по поводу влияния состояния плана железнодорожного пути в кривых и прямых участках на комфортность езды, износ рельсов и подвижного состава [1]. Особенно актуальна эта проблема при повышении скоростей движения поездов и на грузонапряженных линиях.

Следует отметить, что сегодня в цепочке «изыскатель – проектировщик – инженер ПМС – инженер ПЧ» каждое звено работает практически само по себе без какой-либо реальной увязки с проектом. Часть вины в этом лежит и на проектировщиках, т.к. они не предлагают ПМС и ПЧ систем, позволяющих реализовать и контролировать проектные решения.

Для контроля состояния плана и оценки его параметров сегодня рекомендуют (зачастую совершенно необоснованно) использовать разнообразную «чудо-технику», оснащенную гироскопами, спутниковыми приемниками, бесконтактными системами измерений. При расчетах плана в ряде случаев применяют эвольвентные методы, которые не дают точного положения пути в плане. Многие программы, используемые для проектирования плана, не обеспечивают соблюдение габаритных ограничений до опор контактной сети и до соседних путей. Практически отсутствует авторский надзор за выполнением работ по приведению плана в соответствие с проектом.

Для приведения плана пути «в проектное положение» используют путерихтовочные машины с измерением асимметричных стрел и мерным колесом. Такие системы (даже при обещанной точности измерения стрелы 0,1 мм) не обеспечивают нахождения правильного пространственного положения пути из-за быстро накапливающейся ошибки (двойное интегриро-

вание стрел) и не позволяют выполнять проверку соблюдения габаритов, особенно между соседними путями. Имеющиеся на некоторых дорогах реперные системы не ориентированы на использование их в текущем состоянии и при выполнении рихтовочных работ.

Рассмотрим подробнее некоторые проблемы плана железнодорожного пути.

Съемка плана и пути повышения её достоверности

При съемке плана сравнивают, как правило, две противоположные системы – координатную съемку и съемку стрел. В первом случае мы измеряем непосредственно пространственное положение пути, имеем относительно небольшую погрешность по длине пути, но в соседних точках точность определения координат часто оказывается на уровне тех рихтовок, которые получают в расчетах. При измерении стрел для перехода к пространственному положению пути необходимо выполнить двойное интегрирование кривизны (двойное суммирование стрел). В результате, при достаточно высокой точности измерения кривизны в соседних точках погрешность определения пространственного положения нарастает очень быстро.

Опыт показывает, что использование того или иного способа измерений определяется прежде всего тем, с какой целью они выполняются.

Если на основе измерений будет разрабатываться проект переустройства плана с заменой рельсошпальной решетки, то достаточно выполнить координатную съемку по оси пути или по одному из рельсов с точностью определения координат отдельных точек ± 30 мм. Такая точность может обеспечиваться полярной съемкой

с использованием электронных тахеометров и трехштативной системы или дифференциальной GPS съемкой со стоянками на точках измерений не меньше 15..30 с. При этом приемник устанавливается на головку одного из рельсов либо непосредственно, либо на штатной вешке с круглым уровнем.

Расстояние между точками принимается 5..20 м в зависимости от кривизны. Обязательно берутся точки в местах расположения объектов, в районе которых необходимо контролировать рихтовки (мосты, переезды, опоры контактной сети и т.п.). Следует избегать точек с маленьким (меньше 0,5 м) расстоянием между ними.

В точках съемки измеряются ширина колеи для переноса съемки на ось пути (при отсутствии существенных отклонений можно считать ширину постоянной) и возвышение наружного рельса (для контроля габаритов и скоростей). Непрерывная GPS съемка на движущихся тележках дает точность съемки не лучше ± 300 мм, поэтому категорически недопустима для проектных целей. Высокая штанга на таких тележках делает съемку кривых еще более грубой [2].

Если на основе измерений будет выполняться рихтовка пути в точках измерений, участок рихтовки небольшой по протяженности (300..500 м) и состоит из ярко выраженных прямых, между которыми находится кривая, а сами величины рихтовок не приводят к изменению габаритов отдельных точек пути, то в таких случаях могут применяться традиционные стреловые способы измерений. При этом рекомендуется выполнять двойной независимый промер или использовать модифицированный способ стрел [3].

Во всех остальных случаях следует применять комбинированную съемку с уравниванием результатов измерений [4]. При этом весь участок разбивается на отрезки и снимается каким-либо стреловым способом (лучше всего модифицированным) по одному из рельсов по всей длине. В отдельных точках пути на расстоянии 50..200 м (в зависимости от кривизны) измеряются координаты при помощи тахеометров или GPS. Точки, в которых необходимо контролировать рихтовки, либо снимаются тахеометром или GPS, либо (что проще и достаточно точно) «заплюсовываются». В этом случае измеряется расстояние от ближайшей разбивочной точки и определяются характерные размеры для контроля. При выполнении расчетов в РВПлан ко-

ординаты таких точек достаточно просто получают через сплайны.

При сильном износе рельсов в кривых и при постановке пути на ось без смены рельсов съемку следует осуществлять по наружным рельсам таких участков. В этом случае разбивка на отрезки выполняется для каждой кривой отдельно, а при расчете измеренные стрелы уравниваются на координаты отдельных точек и пересчитываются по нормальям на ось пути. Затем координаты отдельных кривых объединяются в одну общую модель для расчетов проектного положения плана.

Такие подходы к измерениям позволяют достичь требуемой точности в каждой из рассмотренных ситуаций.

Расчеты плана.

Учет ограничений, габаритов, объемов работ и стоимости. Определение возвышений и допускаемых скоростей

Сегодняшний рынок программных продуктов предлагает достаточно широкий выбор программ для расчетов плана железнодорожного пути. Часть из них ориентирована или только на задачи текущего содержания, или только на проектные задачи.

Из программ, которые позволяют выполнять универсальные расчеты, можно отметить Aquila и РВПлан [5].

Aquila, входящая сегодня в состав КАПРЕМ, является на сегодня единственной программой, которая может в автоматическом режиме отыскивать проектное решение на участках, состоящих из нескольких кривых. В то же время, учет ограничений на рихтовки в отдельных точках, на пикетаж и параметры отдельных элементов плана, а также габаритных ограничений для объектов и соседних путей в автоматическом режиме практически невозможен. Поэтому после нахождения первоначального решения необходимо «вручную» обеспечивать такие требования. В реальных проектных случаях это связано с достаточно большими затратами времени, причем не всегда достигается результат.

РВПлан сегодня не дает автоматического решения сложных участков, но позволяет программно порезать такой участок на куски по съемке или проектному решению и выполнить расчет каждого куска с учетом самых разнообразных ограничений на проектные параметры, пикетаж, рихтовки и габариты (в каждой точке может одновременно задаваться до 25 видов ограничений). Все эти ограничения автомати-

чески учитываются в процессе оптимизации. После расчета каждого куска они программно склеиваются, и далее расчет доводится для всего участка в целом. При выборе в качестве критерия оптимизации суммы затрат на выполнение работ при расчете сразу получаем объемы работ и материалов, а также общую стоимость выполнения работ.

Также только в РВПлан возможно выполнение оптимизации решения с обеспечением заданного уровня скоростей движения и автоматизированного обеспечения междупутных габаритов при любом плане соседних путей.

При наличии у проектировщика обеих систем можно получить при помощи Aquila в автоматическом режиме первоначальное решение, затем в РВПлан порезать участок на куски по прямым этого решения. После этого каждый из кусков рассчитывается с обеспечением нужных скоростей движения и нормативных требований, ограничений на пикетаж, рихтовки и габариты. Затем полученные решения склеиваются в одно.

Решение, полученное в РВПлан, может впоследствии использоваться в различных САПР (Robur Rail, CREDO, GeoniCS), данные могут экспортироваться также в ACAD, Excel, текстовые документы. Все форматы РВПлан представляют собой открытые текстовые файлы.

Также РВПлан предоставляет проектировщику широчайший набор инструментов для расчетов и контроля возвышений наружного рельса в соответствии с различными нормативными документами. Уникальные инструменты РВПлан позволяют подобрать возвышения на участке из условий обеспечения заданных скоростей, минимальных непогашенных ускорений, уменьшения износа рельсов и подвижного состава. Расчеты показали, что изменение возвышения всего на 5 мм может существенно изменять боковое воздействие поездов на путь, поэтому к расчетам возвышений и их контролю следует относиться с особым вниманием.

Нормативные требования и их влияние на результат проектирования

Хотя нормативная база постоянно совершенствуется, тем не менее, проектирование и отображение много радиусных кривых, проектирование изломов, расчеты возвышений и допускаемых скоростей (особенно в много радиусных кривых) на сегодня являются не до конца урегулированными.

Неэффективное использование геодезической техники при строительстве железных до-

рог и «зарихтовывание» пути при последующих ремонтах привели к тому, что на железных дорогах практически отсутствуют прямые участки. Для приведения таких участков к прямым требуются очень большие рихтовки, иногда достигающие десятков, а то и сотен сантиметров. Единственным выходом в таких ситуациях является применение изломов. В этом случае отрезки прямых соединяются короткими круговыми кривыми очень большого радиуса. Во многих странах сегодня в том или ином виде нормировано применение изломов, в то же время в России и Украине такое нормирование практически отсутствует.

До сих пор нет единства в понимании геометрии много радиусных кривых и отображении таких участков на продольном профиле. Порой сами проектировщики через некоторое время не могут сказать, что же означает величина «К» и какой геометрический смысл имеют значения углов отдельных кривых, показанные на профиле. Отсутствие единства в понимании геометрии приводит к тому, что даже в Руководствах ОАО «РЖД» даны примеры с довольно странными параметрами кривых.

В качестве положительного решения данной проблемы можно отметить технические указания Укрзалізниця по проверке плана и продольного профиля железнодорожных путей (2004 г.), в которых четко оговорено, что показывается на профилях. В частности, как «К» показываются «чистые» длины всех круговых кривых без добавления целых значений или половинок переходных кривых. Угол поворота показывается только для всей кривой без деления его по отдельным кривым.

Есть ряд вопросов и к нормативам относительно расчетов возвышений наружного рельса и допускаемых скоростей движения по кривым. В свое время в монографиях по этой теме [6] и в нормативных документах (Приказ № 41 от 12.11.2001 МПС России, ЦП 0056 1999 г., Укрзалізниця) особое внимание уделялось определению допускаемых скоростей на много радиусных кривых и на участках с короткими прямыми вставками. Как показывали расчеты, на таких участках далеко не всегда определяющим фактором являлся радиус. В то же время, в последних нормативных документах по расчету возвышений отсутствуют требования по проверке допускаемых скоростей в таких ситуациях. Неужели необходимость решения кубических уравнений для нахождения ограничивающих скоростей является сегодня непреодолимой преградой?

Следует отметить, что множество современных нормативных документов выглядят так, будто самый мощный вычислительный инструмент у инженера – арифмометр, а решение каких-то уравнений или даже простое умножение подменяется различными графиками и номограммами, как и 50 лет назад.

Необходимо, кроме научных работников, привлекать к созданию нормативных документов практикующих проектировщиков (как из желдорпроектов, так и гипротрансов), а также опытных работников передовых ПМС и ПЧ.

Реализация и контроль полученных решений. Реперные системы и их возможности

В современных условиях проектировщики получают проектное решение в виде координатной модели в какой-либо системе координат. В то же время отсутствуют технологии и опыт укладки пути по проектным координатам, проблемным также является мониторинг плана на его соответствие проекту.

Необходимо прекращать практику, при которой ПМС использовал проект только для качественной оценки участка, а работа укладчиков и путерихтовочных машин никак не связывалась с проектными координатами пути.

При производстве ремонтных работ путь необходимо приводить в проектное координатное положение, как при укладке новой рельсошпальной решетки, так и при его выправке машинами тяжелого типа. В зависимости от конкретной задачи должна применяться соответствующая ей технология геодезических работ, обеспечивающих реализацию проектного решения «в натуре» и контроль получаемого результата.

Для выноса координат проектной оси можно использовать ее привязку к створам реперов специальной реперной системы. Кроме привязки к реперным створам, можно использовать вынос проектного положения по расстояниям от точек с известными координатами (например, точек на втором пути). Для реализации этого способа перед укладкой на втором пути координируются тахеометром или GPS отдельные точки, от которых с помощью простейших инструментов (рулетка, наугольник) при укладке откладываются рассчитанные проектные междупутья.

Конструктивно специальные реперные системы могут выполняться разного типа. На электрифицированных участках рабочие репера могут находиться на опорах контактной сети. За-

служивает внимания предложение ученых из Екатеринбурга [7] по нанесению реперных меток на опоры краской. На двухпутных участках следует также рассмотреть возможность установки рабочих реперов в виде труб диаметром 15...20 мм и длиной 1000...1200 мм в междупутье.

Частота установки определяется предназначением реперов. Для целей мониторинга при уравнивании стреловых измерений достаточно определять координаты отдельных точек на расстоянии 50...200 м в зависимости от кривизны. На таком расстоянии устраиваются пары (лучше тройки) реперов.

Для мониторинга полученных после укладки координат пути и расчета окончательных сдвигов для постановки его в проектное положение следует применять стреловые измерения с уравниванием на координаты отдельных точек, которые могут определяться линейными засечками от специальной реперной системы.

Опасным является «слепое» доверие данным современных путеизмерителей КВЛ-П и ЦНИИ-4 по параметрам плана железнодорожного пути. Измерительные системы, заложенные в этих вагонах, не позволяют надежно и с достаточной точностью определять параметры плана. Но в то же время сегодня многие дистанции пути самоустранились от работы по контролю и паспортизации параметров плана.

Понятно, что создание специальной рабочей реперной сети потребует дополнительных затрат, но, как точно подметил Г. Форд, «точные измерения стоят дорого, но неточные обходятся гораздо дороже». Эпоха пренебрежения точностью плана привела к «зарихтовыванию», образованию много радиусных кривых, заводин. Все это дает чрезмерный износ рельсов и подвижного состава и некомфортную езду. Чем раньше мы начнем реализовывать действительно проектное положение плана, тем быстрее улучшится ситуация с износом и комфортностью. Следует отметить, что для таких технологий необходимы в основном организационные затраты и практически не требуются дополнительные средства, т.к. затраты на съемку и так предусмотрены сметами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корженевич, И. П. План железнодорожного пути как один из основных факторов для снижения расходов и повышения скоростей [Текст] / И. П. Корженевич, Б. И. Торопов // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. с международным

- участием (Иркутск, 20–24 апреля 2009 г.). – Иркутск: ИрГУПС, 2009. – Т. 2. – С. 105-110.
2. Корженевич, И. П. Точность съемки плана железнодорожного пути и пути ее повышения [Текст] / И. П. Корженевич, О. А. Суслов // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием (Иркутск, 20–24 апреля 2009 г.). – Иркутск: ИрГУПС, 2009. – Т. 2. – С. 110-116.
 3. Корженевич, И. П. Новые подходы к расчетам выправки (переустройства) плана железнодорожного пути [Текст] / И. П. Корженевич // Повышение эффективности работы путевого хозяйства и инженерных сооружений железных дорог: Сб. науч. тр. УрГУПС. – Екатеринбург, 2006. – Вып. 45 (128). – С. 16-26.
 4. Корженевич, И. П. Комбинированный способ съемки плана железнодорожной линии [Текст] / И. П. Корженевич // Вестник Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вып. 14. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2007. – С. 81-86.
 5. Интеллектуальные рельсовые системы. RWPlan – реконструкция и выправка кривых [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://brailsys.com/RWPlan_0.htm
 6. Каменский, В. Б. Содержание железнодорожного пути в кривых [Текст] / В. Б. Каменский, Э. Я. Шац. – М.: Транспорт, 1987. – 189 с.
 7. Резницкий, Ф. Е. Геодезия и информационные технологии на железнодорожном транспорте [Текст] / Ф. Е. Резницкий, Е. Ю. Ерохина, Р. Г. Абраров // Геоинформационные технологии, путевое хозяйство и искусственные сооружения: Сб. науч. тр. УрГУПС. – Екатеринбург, 2002. – Вып. 22 (104). – С. 3-12.

Поступила в редколлегию 15.03.2010.

Принята к печати 18.03.2010.

РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО ЗБИТКУ І ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ПРИ АВАРІЯХ З НАФТОПРОДУКТАМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Запропоновано принципи оцінки збитків, що спричиняються аварійними розливами нафтопродуктів компонентам навколишнього середовища, і методичні підходи до оцінки екологічного ризику функціонування залізничних магістралей.

Предложены принципы оценки ущербов, которые наносятся компонентам окружающей среды аварийными разливами нефтепродуктов, и методические подходы к оценке экологического риска функционирования железнодорожных магистралей.

The principles of estimation of losses to the environment components caused by the emergency spills of petroleum products and the methodical approaches to estimation of ecological risk of functioning of railways are offered.

Актуальність розробки і впровадження методів підвищення безпеки залізничних перевезень небезпечних вантажів і заходів, направлених на зниження різних збитків від транспортних аварій, обумовлена значним зносом основних виробничих фондів, інтенсифікацією перевізного процесу, прогресуючим ускладненням середовища руху з погляду потенційної небезпеки, а також змінами умов роботи залізничного транспорту, пов'язаними з технологічним і організаційним реформуванням галузі.

Показано, що наукова база визначення основних кількісних показників ризиків будується на основі статистичної моделі безпеки перевезень залізничним транспортом і статистичного обґрунтування типу потоку випадкових подій. Це дозволяє вибрати конкретну модель, що описує стан безпеки руху за допомогою отримання кількісних оцінок показників ризиків.

Для формування бази даних та електронних карт рецептивного статусу і комплексних природно-техногенних ризиків уздовж основних маршрутів руху потягів з небезпечними вантажами по мережі залізниць запропоновано методологію перерахунку інтенсивностей чинників природних небезпек в оцінці ризиків аварій при залізничних перевезеннях. При аналізі природних і техногенних ризиків враховувався ступінь завантаженості залізничних ліній (вантажонапруженість).

З позиції природної складової ризиків повинні враховуватися дії наступних чинників небезпеки навколишнього середовища:

- сейсмологічні;
- смерчів, паводків, штормів, для прибережних районів країни;

- обвальних процесів.

Необхідність обліку саме цих видів природних небезпек пов'язана зі специфікою роботи залізничного транспорту, за якої пошкодження інфраструктури своєчасно ідентифікуються і рух на небезпечних ділянках перекривається. З позиції збереження безпеки руху вказані недостатньо прогнозовані швидкоплинні процеси несуть основну небезпеку.

З позиції техногенної складової ризиків для побудови карт повинні використовуватися галузеві дані про аварійність, зібрані на попередніх етапах дослідження.

Техногенні ризики включають:

- ризики катастроф і аварій з причини ненормативного стану елементів інфраструктури;
- ризики від наявності взаємодії при перетинах з магістралями трубопровідного транспорту;
- ризики від взаємодії при перетинах з автомобільними магістралями і дорогами на переїздах.

Відсутність єдиної методики оцінки збитку, що завдається аварійними розливами нафти компонентам навколишнього середовища, і методичних підходів до оцінки екологічного ризику функціонування залізничних магістралей ускладнюють розробку екологічно ефективних рішень із мінімізації наслідків аварійних ситуацій для навколишнього середовища.

До основних видів дії аварійних ситуацій при транспортуванні нафтопродуктів відносяться забруднення земель і утворення нафто-

забрудненого ґрунту на етапі ліквідації наслідків розливів.

У разі неможливості відновлення нафтозабрудненого ґрунту на місці розливу, нафтозабруднені ґрунти повинні бути вивезені з місця розливу і перероблені на спеціально облаштованих технологічних комплексах.

Існуюча схема функціонування об'єктів переробки нафтозабруднених ґрунтів не є ефективною з екологічної і економічної точок зору, що створює загрозу вторинного забруднення навколишнього середовища.

Для зниження екологічних ризиків утилізації нафтовміщуючих відходів і підвищення екологічної ефективності етапу ліквідації наслідків аварійних ситуацій необхідне створення системи знешкодження відходів, що включає вибір оптимальних технологій відновлення забруднених ґрунтів і утилізації нафтовміщуючих відходів, обґрунтування потужностей і оптимізацію місць розміщення технологічних комплексів із прийому і знешкодження нафтовміщуючих відходів.

Негативна дія на навколишнє середовище пов'язана з експлуатацією практично всіх об'єктів здобичі і транспортування нафти, що працюють як у штатному режимі, так і при виникненні аварійних ситуацій. Найбільшого збитку навколишньому середовищу завдається саме в результаті аварійних розливів нафти і нафтопродуктів, що відбуваються при їх транспортуванні.

Стратегія мінімізації дії на навколишнє середовище повинна здійснюватися як на етапі запобігання аварійним ситуаціям (профілактика, своєчасна діагностика, заміна), так і на етапах локалізації і ліквідації наслідків аварійних розливів нафти і нафтопродуктів. В цьому випадку особлива увага повинна приділятися методам відновлення нафтозабруднених територій і знешкодження нафтовміщуючих відходів і ґрунтів.

В даний час існує тенденція облаштування майданчиків переробки нафтовідходів поза межами технологічних комплексів на окремо відведених земельних ділянках, що приводить до довгострокового вилучення земельних ресурсів і збільшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище. В той же час, зменшення числа майданчиків приводить до зростання витрат на транспортування нафтозабруднених ґрунтів до місць переробки [1, 4].

У зв'язку з цим виникає необхідність підвищення екологічної безпеки етапу ліквідації аварійних ситуацій при транспортуванні наф-

топродуктів шляхом рішення оптимізаційної задачі визначення оптимальної кількості, місцезнаходження і потужностей комплексів, технологічне забезпечення яких дозволяє переробляти весь об'єм нафтовміщуючих відходів, що утворюються в результаті технологічних процесів і аварійних ситуацій, забезпечуючи при цьому вимоги екологічної безпеки.

Враховуючи всі вищезазначені аспекти, запропоновано методику оцінки екологічного ризику аварій на залізничному транспорті при транспортуванні нафтопродуктів. Знання вірогідності виникнення аварійних ситуацій і величин збитків, які вони заподіють навколишньому середовищу, дозволяє прогнозувати площі нафтозабруднених територій і кількості нафтовміщуючих відходів, що утворюються на етапі ліквідації наслідків аварійних розливів нафти і нафтопродуктів.

На підставі аналізу інформації про експлуатацію, власних досліджень і експертних оцінок отримані висновки про постійне зростання кількості відмов у роботі і відповідно зростання витрат на ліквідацію відмов і їх наслідків [3, 4].

Аварійні ситуації на залізничних магістралях завдають значного збитку компонентам навколишнього середовища. Враховуючи, що збитки компонентам навколишнього середовища завдаються як при безпосередньому розливі нафти або нафтопродуктів і забрудненні земель або водного об'єкту, так і при ліквідації наслідків розливів і знешкодженні нафтовміщуючих відходів і ґрунтів, розроблено метод оцінки комплексного збитку, що наноситься навколишньому середовищу в результаті розливів нафти і нафтопродуктів та подальшої переробки нафтозабруднених ґрунтів, що утворюються (рис. 1).

Збиток ($Z_{\text{ш}}$), що заподіюється компонентам навколишнього середовища при аваріях на залізницях з урахуванням проведення робіт по переробці нафтозабруднених ґрунтів, визначається як сума прямого збитку від розлиття нафти або нафтопродуктів і збитку, що заподіюється навколишньому середовищу технологічним комплексом по переробці нафтозабруднених ґрунтів.

На підставі запропонованої моделі оцінки збитків компонентам навколишнього середовища були оцінені структури екологічного збитку при різних варіантах протікання аварійної ситуації (розливи нафти на поверхні землі, попадання нафти в поверхневий водний об'єкт, виникнення пожежі). Отримані структури збитку компонентам оточуючого середовища пока-

зують, що найбільшого збитку при аварійних ситуаціях з попаданням нафти на поверхню землі завдається земельним ресурсам, тоді як при попаданні нафти у водні об'єкти величина збитку водним ресурсам у декілька разів перевершує величини збитків іншим компонентам навколишнього середовища.

На підставі отриманої залежності кількості нафтозабруднених ґрунтів, що утворюються, від площі розливу нафти або нафтопродуктів отримана структура повного екологічного збитку, що наноситься безпосередньо аварією і роботами по ліквідації наслідків.

Складова екологічного збитку, нанесеного роботою технологічних комплексів при відновленні нафтозабруднених ґрунтів, достатньо мала у порівнянні зі збитком компонентам навколишнього середовища, який наносить безпосередньо розлив нафти або нафтопродукту.

В той же час, переробка нафтозабруднених ґрунтів на спеціально обладнаних технологічних комплексах дозволяє значно запобігти екологічному збитку, що наноситься розміщенням відходів в навколишньому середовищі.

Оцінка вірогідності виникнення аварійних ситуацій на залізничних магістралях, а також величин збитків, що завдаються компонентам навколишнього середовища, дозволили розрахувати екологічний ризик аварій. Функція екологічного ризику для окремих ділянок залізничних магістралей різна. У загальному вигляді функцію екологічного ризику можна представити у вигляді:

$$R(x) = p(x) \cdot Z_{\text{зн}}(x), \quad (1)$$

де $p(x)$ – функція розподілу вірогідності аварійних ситуацій по довжині магістралі;

$Z_{\text{зн}}(x)$ – функція розподілу можливих наслідків по довжині магістралі.

Оскільки показники ризиків неоднакові для різних ділянок магістралей, то сумарний ризик на даний момент часу може бути представлений у вигляді суми ризиків для ділянок залізниці з однаковою вірогідністю аварійної ситуації і величини збитку. Величину екологічного ризику ділянки залізничної магістралі можна визначити, використовуючи формулу:

$$R_l = P_{\text{авар}} \cdot l \left(\sum_{i=1}^I Z_{\text{зем}_i} l_{\text{зем}_i} + \sum_{j=1}^J Z_{\text{вод}_j} l_{\text{вод}_j} \right), \quad (2)$$

де $P_{\text{авар}}$ – вірогідність виникнення аварії на ділянці магістралі; l – довжина ділянки; $Z_{\text{зем}_i}$ – екологічний збиток при забрудненні нафтою (нафтопродуктами) земель i -тої екологічної

уразливості; $l_{\text{зем}_i}$ – протяжність ділянки магістралі, що проходить по території земель i -того рецептивного статусу (екологічної уразливості); $Z_{\text{вод}_j}$ – екологічний збиток при забрудненні (нафтопродуктами) j -того водного басейну; $l_{\text{вод}_j}$ – протяжність ділянки магістралі, що перетинає або проходить вздовж j -того водного басейну.

За допомогою отриманих даних про сумарний збиток обґрунтовано етапи проведення робіт по відновленню нафтозабруднених земель, розроблено критерії вибору технології рекультиваци порушених територій залежно від ступеню забруднення ґрунтового шару, глибини проникнення забруднення, термінів і технічної можливості проведення робіт. На підставі оцінки важливості вибраних чинників розроблено порядок проведення робіт по відновленню нафтозабруднених ґрунтів і запропоновано підхід до вибору технології рекультиваци порушеної території. Як критерії вибору технології відновлення нафтозабруднених ґрунтів на місці розливу нафти або нафтопродуктів прийняті: надійність і безпека вживаного технологічного устаткування; екологічна безпека технології; величина фінансових витрат на проведення всього циклу робіт; відсутність вторинних джерел забруднення при проведенні робіт; час, необхідний для проведення повного циклу робіт; можливість зниження концентрації нафтопродуктів до допустимого рівня; можливість зниження високих концентрацій нафтопродуктів; застосовність методу в певних кліматичних умовах.

Для обґрунтування набору технологічного устаткування, що використовується на технологічних комплексах, куди привозять вилучені з місця аварії нафтозабруднені ґрунти, було проведено оцінку застосовності основних технологій переробки нафтозабруднених ґрунтів. Для вибору технології переробки нафтозабруднених ґрунтів на технологічних комплексах було вибрано наступні критерії: ефективність знешкодження нафтовміщуючих відходів; екологічна безпека технології переробки нафтовміщуючих відходів; матеріальні, енергетичні і економічні витрати на переробку; вигляд і якість продукту переробки нафтовміщуючих відходів; можливість інтенсифікації процесу переробки нафтовміщуючих відходів; утворення неутилізованих залишків при переробці нафтовміщуючих відходів.

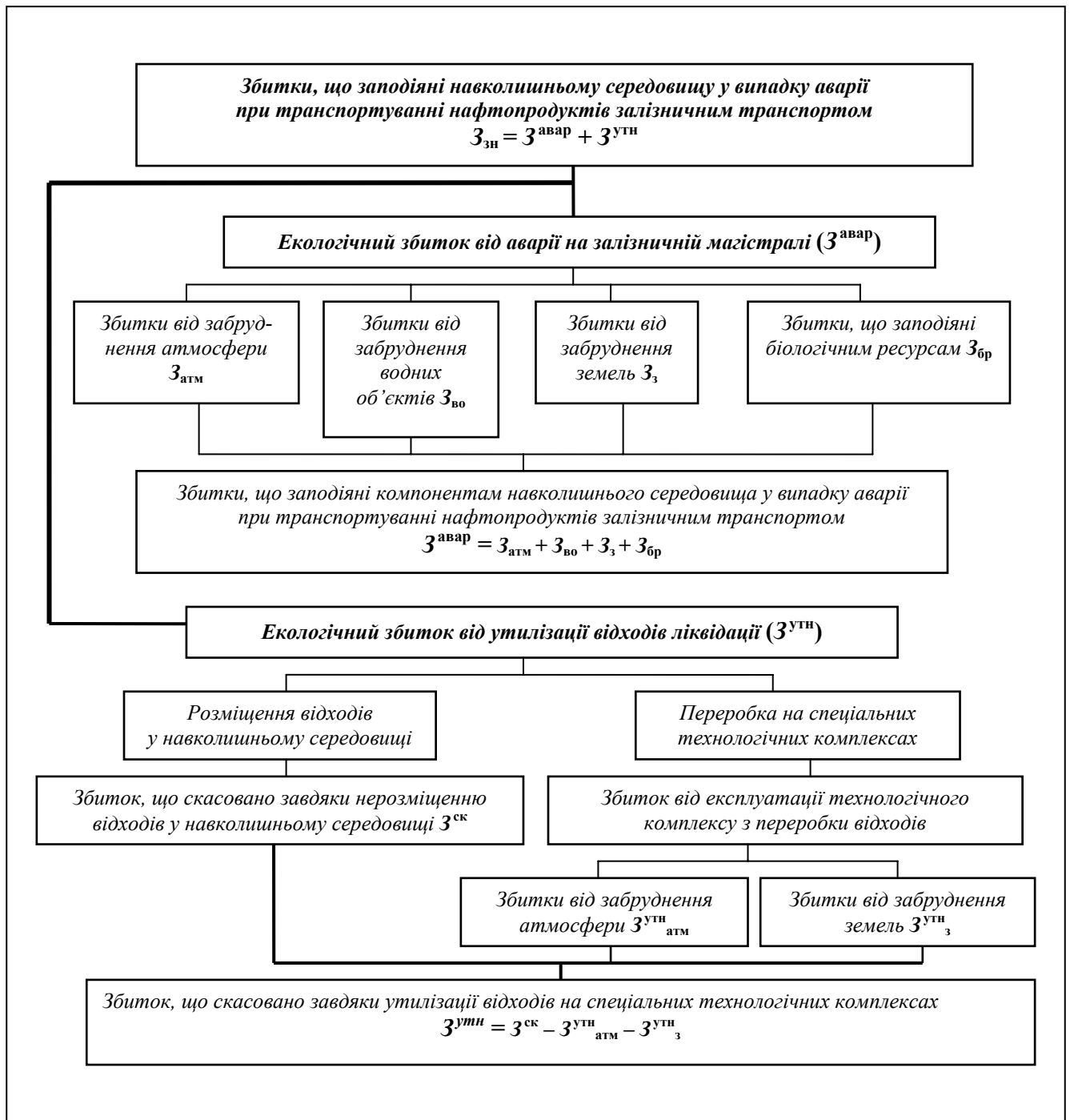


Рис. 1. Алгоритм розрахунку екологічних збитків при аваріях з нафтопродуктами на залізничних магістралях

В результаті порівняння було виявлено, що, не дивлячись на економічну привабливість і відносну простоту таких методів знешкодження нафтозабруднених ґрунтів як випалювання і перемішування, найбільш застосовними є екологічно безпечніші методи (використання твердих сорбентів і мікробіологічна ремедіація). Особливу увагу слід приділяти екологічним аспектам вибору технологій, використовуваним на місцях розливу нафти або нафтопродуктів, оскільки відновлення нафтозабруднених тери-

торій без вивозу нафтозабруднених ґрунтів вимагає достатньо довгого часу, протягом якого нафтопродукти, не дивлячись на проведення відновних робіт, діють на компоненти навколишнього середовища.

На основі оцінки ефективності і застосовності технологій переробки нафтовміщуючих відходів розроблено принципову технологічну схему типового пункту з прийому і комплексного знешкодження нафтовміщуючих відходів від залізничних підприємств, визначено набір

технологічного устаткування, види і об'єми нафтовміщуючих відходів, що переробляються.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Белозеров, Д. С. Организация переработки твердых нефтесодержащих отходов на технологических комплексах [Текст] / Д. С. Белозеров, Н. Н. Слюсарь // Актуальные проблемы дорожно-транспортного комплекса. Охрана окружающей среды: Сб. науч. тр. – Пермь, 2007. – С. 69-76.
2. Мартынюк, И. В. Выбор критериев сравнения оценок риска по различным маршрутам перевозки опасных грузов [Текст] / И. В. Мартынюк // Сб. науч. тр. молодых учёных, аспирантов и докторантов «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта». – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2005. – С. 64-66.
3. Мартынюк, И. В. Выбор оптимальных маршрутов перевозок опасных грузов по результатам оценки рисков возникновения нарушений безопасности движения и ущербов от них [Текст] / И. В. Мартынюк // Вестник РГУПС. – 2006. – № 3. – Ростов-на-Дону, 2006. – С. 103-106.
4. Хлесткин, Р. Н. Ликвидация разливов нефти при помощи синтетических органических сорбентов [Текст] / Р. Н. Хлесткин, Н. А. Самойлов, А. В. Шеметов // Нефтяное хозяйство. – 1999. – № 2. – С. 46-49.

Надійшла до редколегії 07.04.2010.

Прийнята до друку 09.04.2010.

А. В. РАДКЕВИЧ, Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. А. СТЕПАНЕНКО, С. А. ЯКОВЛЕВ,
А. И. ШАПТАЛА, В. М. ЛИСНЯК (ДИИТ)

РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ КОНВЕКТИВНО-ДИФFUЗИОННОГО ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ

На базі тривимірної чисельної моделі виконано розрахунок процесу поширення токсичної речовини у атмосфері. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Наводяться результати обчислювального експерименту щодо прогнозу рівня забруднення атмосфери.

На основе трехмерной численной модели рассчитан процесс переноса токсичного вещества в атмосфере. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозу уровня загрязнения атмосферы.

The 3D CFD model to simulate the pollutant transfer after accidents was developed. The model is based on the transport gradient model. The results of numerical experiments are presented.

Введение

Прогноз загрязнения атмосферы при авариях с химически опасными веществами является первоочередной задачей на этапе разработки ПЛАСа, поскольку дает возможность обосновать размеры зоны поражения и выбрать научно обоснованную стратегию защиты. Для решения этой задачи в настоящее время наибольшее распространение получила модель Гаусса, реализованная в различных коммерческих кодах: *Аммиак*, *Токси*, *SDM*, *PUFF-PLUME* и т.д. Достоинством модели Гаусса является ее простота, но она обладает рядом существенных недостатков и, в частности, не учитывает изменение скорости ветра с высотой, не учитывает геометрическую форму облака, сформировавшегося на месте аварии. Т.е., в данной модели не выполняются критерии геометрического и кинематического подобия. Для более детального моделирования следует применять численное решение уравнения переноса загрязнителя в атмосфере с целью более полного учета особенностей решаемых прогнозных задач.

Целью работы явилось применение трехмерной численной модели (CFD model) для расчета процесса загрязнения атмосферы при аварийном выбросе токсичного газа. Особенностью разработанной модели является то, что она позволяет осуществлять трехмерное моделирование процессов рассеивания токсичного газа с учетом неравномерного профиля ветра, геометрической формы облака, сформировавшегося на месте аварии в течение нескольких секунд.

Математическая модель

Рассматривается процесс загрязнения атмосферы при поступлении в нее токсичного газа в

случае аварии, характеризующейся залповым выбросом загрязнителя. Для расчета процесса загрязнения атмосферы используем трехмерное уравнение переноса примеси (модель градиентного типа):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (1) \end{aligned}$$

где C – концентрация примеси (токсичный газ); u, v, w – компоненты вектора скорости воздушной среды; w_s – скорость оседания примеси; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициенты атмосферной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного газа; $\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ – координаты источника эмиссии токсичного газа.

Данная модель позволяет моделировать различные виды аварийных ситуаций – разлив, утечку и т.д. Если рассматривается авария в виде залпового выброса загрязнителя, то в данном уравнении параметр Q полагается равным нулю, а на месте аварии задается облако (его геометрическая форма), концентрация загрязнителя в нем в начальный момент времени.

В разработанной численной модели используется неравномерный профиль скорости ветра

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad (2)$$

где u_1 – скорость ветра на высоте z_1 ; $n = 0,15$. Постановка краевых условий для рассмотренного уравнения переноса примеси рассмотрена в работах [2, 3].

Метод решения

Численное интегрирование уравнения переноса (1) осуществляется с использованием попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [2] на прямоугольной разностной сетке. На каждом дробном шаге расчет величины концентрации примеси проводится по формуле бегущего счета. Разработанный код реализован на алгоритмическом языке FORTRAN.

Практическая реализация

Рассматривается применение трехмерной численной модели для решения прогнозной задачи о загрязнении атмосферы при залповом выбросе аммиака. В физической модели задачи будем считать, что выброс NH_3 в атмосферу на производстве привел к образованию над местом аварии двух облаков. Известны размеры облаков и концентрация аммиака в них (рис. 1).

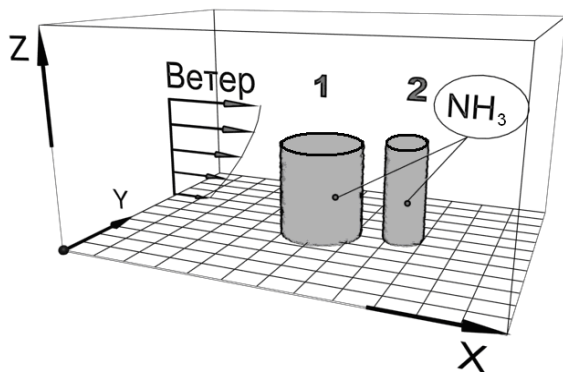


Рис. 1. Схема облаков токсичного газа после аварии: 1, 2 – облака

Ставится задача исследовать динамику загрязнения атмосферы при миграции облаков для известных метеорологических данных.

Расчетная область представляет собой параллелепипед: $0 \leq X \leq 480$ м, $0 \leq Y \leq 380$ м, $0 \leq Z \leq 100$ м. Концентрация загрязнения в облаке в начальный момент времени $t = 0$ полагается равной $C = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³.

Коэффициенты турбулентной диффузии принимаются равными

$$\mu_x \approx \mu_y \approx \mu_z = 2,5 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Рассматривается миграция двух облаков. Размеры первого облака: $l_x = 96$ м, $l_y = 162$ м,

$l_z = 76$ м; размеры второго облака: $l_x = 64$ м, $l_y = 90$ м, $l_z = 76$ м, $\sigma = 0$.

Результаты моделирования показаны на рис. 2–8, где приведены изолинии концентрации NH_3 в атмосфере для различных моментов времени. Хорошо видно, что первоначально распределение NH_3 в облаках равномерно. Это обусловлено заданием начального условия в виде $C = \text{const}$ в каждом облаке. Далее, с течением времени наблюдается «размытие» формы каждого облака, «вытягивание» их в направлении движения ветра и слияние. Это приводит к постепенному уменьшению начальной концентрации NH_3 в облаке.

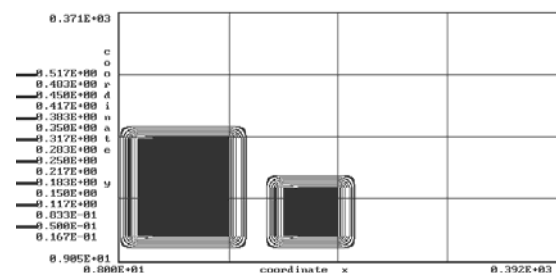


Рис. 2. Изолинии концентрации NH_3 на уровне $Z = 19$ м, $t = 0,1$ с

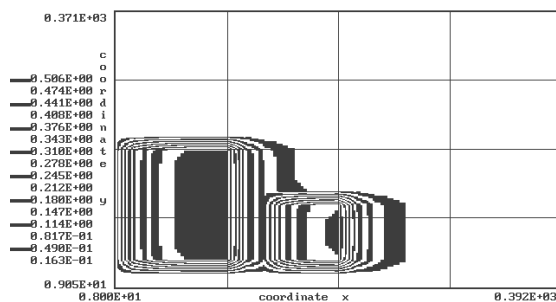


Рис. 3. Изолинии концентрации NH_3 на уровне $Z = 19$ м, $t = 3$ с

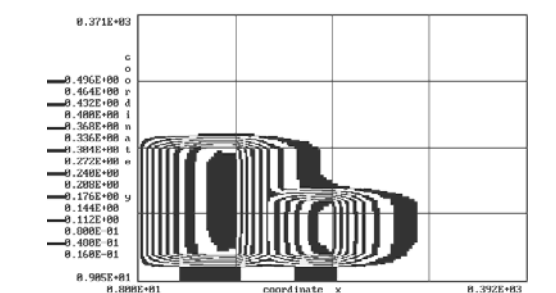


Рис. 4. Изолинии концентрации NH_3 на уровне $Z = 19$ м, $t = 6$ с

Данные результаты позволяют также оценить влияние неравномерного по высоте профиля скорости ветра на процесс рассеивания загрязнителя. Для этого необходимо сравнить, например, рис. 6 и 7. Эта пара рисунков представляет зону загрязнения атмосферы в сходные моменты времени, но в сечениях, расположенных на различной высоте Z от поверхности

земли. Т.к. на верхних слоях атмосферы скорость ветра больше, то и зона загрязнения здесь значительно больше «сдвинута» в направлении воздушного потока и более «разряжена», поскольку ускоренный здесь конвективный поток «стремится» более интенсивно рассеять загрязнитель.

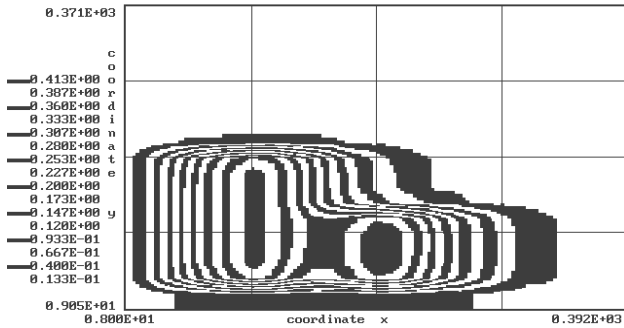


Рис. 5. Изолинии концентрации NH_3 на уровне $Z = 19$ м, $t = 15$ с

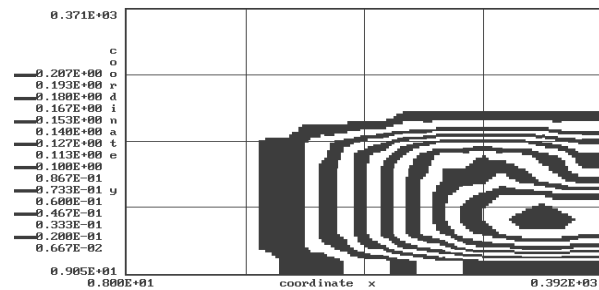


Рис. 6. Изолинии концентрации NH_3 на уровне $Z = 19$ м, $t = 75$ с

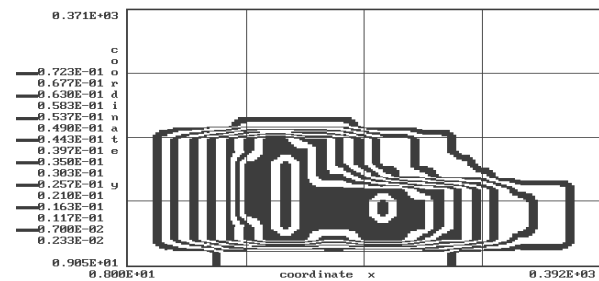


Рис. 7. Изолинии концентрации NH_3 на уровне $Z = 86$ м, $t = 15$ с

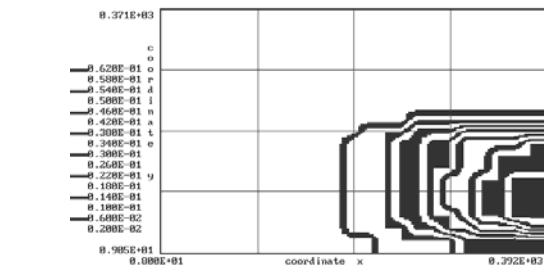


Рис. 8. Изолинии концентрации NH_3 на уровне $Z = 86$ м, $t = 75$ с

На рис. 9 представлена зона загрязнения атмосферы (уровень $Z = 5$ м) для другой задачи – аварийный выброс аммиака, когда на мес-

те аварии образовалось первичное облако и зона разлива, над которой начал формироваться шлейф в силу испарения загрязнителя.

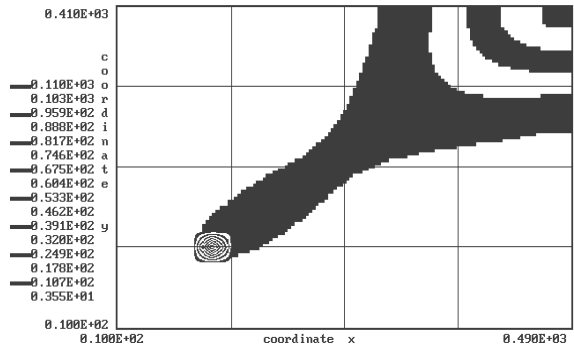


Рис. 9. Изолинии концентрации токсичного газа для момента времени $t = 237$ с (шлейф от зоны разлива и уходящее первичное облако)

Зона загрязнения, представленная на рис. 9, соответствует моменту времени, когда первичное облако практически ушло из расчетной области, а вслед за ним, от зоны разлива, вытянулся шлейф токсичного газа.

В заключение отметим, что расчет с использованием данной численной модели требует около 5...10 с для получения результатов с помощью разработанного кода.

Выводы

В работе на основе трехмерной численной модели выполнен расчет процесса рассеивания токсичного газа в атмосфере. Методом вычислительного эксперимента исследована интенсивность загрязнения атмосферы на различной высоте. Дальнейшее развитие данной модели должно быть направлено на создание численной модели для расчета рассеивания тяжелых газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий [Текст] : учеб. пособие в 5 кн. / под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева). – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 200 с.
2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
4. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті [Текст]. – К., 2001. – 33 с.

Поступила в редколлегию 22.03.2010.

Принята к печати 25.03.2010.

ВІБРОШУМОВА ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ АПАРАТУРИ

У статті розглядається один з варіантів контролю працездатності релейної апаратури залізничної автоматики з використанням методу шумової діагностики (ідентифікація шумових сигналів на основі використання моментів щільності розподілу імовірності випадкових шумових сигналів).

В статье рассматривается один из вариантов контроля работоспособности релейной аппаратуры железнодорожной автоматики с использованием метода шумовой диагностики (идентификация шумовых сигналов на основе использования моментов плотности распределения вероятности случайных шумовых сигналов).

In the article one of variants of checking the operability of relay equipment for railway automation is examined with the use of method of noise diagnostics (an identification of noise signals on the basis of using the moments of density of probability distribution for random noise signals).

Вступ

Сучасна обчислювальна техніка дозволяє удосконалити технологію перевірки параметрів реле залізничної автоматики за рахунок автоматизації процесів вимірювання і використання програмних засобів діагностики. У багатьох країнах, що використовують електромагнітні реле в залізничній автоматичній, розв'язуються питання контролю електричних і часових параметрів електромагнітних реле за допомогою різних автоматичних цифрових пристроїв і систем. Наприклад, автоматична тестова система Automatic Relay Test System INDIA індійського виробництва, RelayPro Automated Relay Tester виробництва MRD Rail Technologies Австралії, автоматичний програмний комплекс ІАПК РТУ російського виробництва.

Відзначимо, що з використанням мікропроцесорної техніки залишаються невирішеними проблеми надійного контролю механічних параметрів електромагнітних реле. Зараз для цього використовуються методи і технології, розроблені у середині минулого сторіччя. Причому виконання ремонтно-профілактичних робіт вимагає високої кваліфікації фахівців, що виконують вручну основний об'єм технологічних операцій по вимірюванню і контролю механічних параметрів реле. Такі роботи передбачають значний час, зокрема розбирання і збирання приладу, що перевіряється, незалежно від його фактичного стану.

Одними з ефективних методів попередження аварій, виявлення несправностей у вузлах двигунів, підшипників, гідросистем, гідролокаторів, електромеханічних вузлів радіоелект-

ронної апаратури (РЕА) є акустичні методи [1]. Акустичні методи діагностування можуть використовуватись для таких електромеханічних пристроїв, як соленоїди, реле, контактори. Зокрема реле генерують електродинамічний і електромагнітний шуми, які можуть бути використані для їх діагностування.

Новітня технологія профілактичних робіт на релейній апаратурі повинна включати тестовий контроль параметрів електромагнітних реле і оптимізацію міжремонтного періоду. Ця проблема розв'язується із застосуванням пристрою і способу для вимірювання і контролю параметрів реле, запропонованого і запатентованого авторами роботи [2].

У даній статті обґрунтовується побудова акустичного каналу у пристрої [2] та розглядається принцип аналізу шумових сигналів електромагнітного реле на прикладі зміни одного з механічних параметрів.

Аналіз шумових сигналів та методів їх ідентифікації

Шумовий сигнал РЕА являє собою суму шумових сигналів від різних джерел. Такий шум може мати деяку тональність, яка визначається частотою, що відповідає максимальній амплітуді в його спектрі. Спектр шуму може бути рівномірним, позбавленим будь-якої тональності.

Однією з найбільш інформативних діагностичних характеристик шумового сигналу є розподіл ймовірностей амплітуд звукового тиску.

Характерні шумові сигнали механізмів РЕА, як показують експерименти, мають періодичні

та неперіодичні складові. Параметри шумових сигналів змінюються з часом – у бездефектних пристроїв повільно, у обладнанні, що наближається до стану руйнування, дуже швидко. Тому можна вважати, що в межах усього терміну служби пристроїв його характерний шумовий сигнал є інтервально-стаціонарним процесом за умови, що інтервали спостережень вибираються розумно, а сигнали розглядаються як реалізації випадкового процесу з нормальним розподілом.

Основним елементом комплексу програм обробки акустичних сигналів на базі аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) є цифрова фільтрація, яка використовується для відновлення сигналу після дискретизації та фільтрації непотрібних частотних складових [3]. Набір програм дозволяє обчислювати параметри розподілу: максимальне і мінімальне значення, стандартне відхилення і кореляційну функцію. Алгоритми модифікації включають масштабування, цифрову фільтрацію та інтегрування.

Після цього виникає задача ідентифікації шумових сигналів, тобто побудова математичної моделі (статистичної або динамічної) діагностування об'єкта (з дефектом і без дефекту) на основі експериментальних даних з метою вибору інформативних (визначальних) параметрів для побудови діагностичної системи. При цьому доводиться вирішувати два завдання: аналіз шумових сигналів в частотній і часовій областях, визначення зв'язків між складовими шумового сигналу і станом об'єкта, що діагностується.

Відомі два методи ідентифікації шумових сигналів: на основі частотного (спектрального) аналізу і з використанням просторових характеристик розподілу сигналів. При спектральному аналізі стан об'єкта, що діагностується, оцінюється показником порівняльного становища, при якому середньоквадратичний рівень спектрального компонента відповідного шумового або вібраційного процесу порівнюється з граничним, який вважається типовим для обладнання без дефекту [4].

Мета діагностики полягає у виявленні розвитку відмови раніше області найбільш інтенсивного зносу або руйнування точки (рис. 1.) Тому необхідно мати часову залежність роботи дефектних і бездефектних об'єктів контролю, а для забезпечення достовірних результатів застосовувати статистичні методи моделювання. Відповідно до ймовірнісного підходу, всі від-

хилення від норми розглядаються як випадкові величини, а основною вимогою до конструкції є мінімально допустима ймовірність руйнування. Труднощі реалізації методів діагностування при експлуатації складної РЕА полягає в тому, що лише в окремих випадках є інформація про кожний конструктивний параметр, яка достатня для надійного опису розподілу ймовірностей виходу цього параметра за межі допустимої величини.



Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування об'єкту контролю від часу

Звичайно використовують фізико-статистичні моделі, що описують взаємозв'язок Y -нормованого параметра об'єкта, що діагностується (ступінь зносу деталі, роз регулювання), і X -параметра шуму (амплітуди певної складової, потужності шуму і т.п.). Тоді метод статистичної ідентифікації буде полягати в тому, щоб приймати ті чи інші рішення виходячи з ймовірностей випадкової величини X , за якою ми можемо судити про величину Y .

Визнаним способом накопичення інформації та встановлення основних діагностичних оцінок є метод експертних оцінок, які є результатом накопиченого досвіду у фахівців і на основі яких складаються переліки основних несправностей і основних ознак, як правило, що є в експлуатаційній документації у вигляді таблиць типових несправностей.

Для ідентифікації методом розпізнавання образів можуть бути використані алгоритми [9], але в усіх випадках необхідно знати закони розподілу контрольованих параметрів, які в основному можуть бути визначені експериментально.

Перераховані методи ідентифікації шумових сигналів відповідним станам реального пристрою (справне, несправне) можуть бути успішно застосовані, якщо існує достовірна статистика оцінки шумових сигналів. Зокрема, інтерес представляє закон густини імовірності розподілу шумових сигналів [5].

Постановка завдання

Для створення віброшумового каналу вимірювання електродинамічних процесів, роботи електромагнітних реле необхідно визначити тип акустичних датчиків, які перетворюють акустичні коливання в електричні сигнали.

Використовуючи електродинамічні процеси, які супроводжують роботу електромагнітних реле, необхідно зафіксувати та проаналізувати створенні акустичні коливання з метою технічної діагностики блоку реле.

Шляхи рішення завдання

При роботі реле коливання передаються елементам конструкції реле і повітрю у вигляді акустичної енергії, поширюваної в середовищі. В різних точках середовища виникає змінний звуковий тиск, який і повинен сприйматися первинним перетворювачем (мікрофоном). Рівень звукового тиску в певних точках простору залежить від потужності джерела, умов розповсюдження (інтенсивності звуку в певному напрямі) і відстані до джерела.

Рівень сигналів на виході приймача залежатиме ще і від шумів навколишнього середовища і технічних характеристик приймача. Мікрофон перетворює акустичну енергію – коливання тиску – в електричну. Це перетворення можна здійснювати різними способами. За способом перетворення мікрофони діляться на електродинамічні, вугільні, п'єзоелектричні та електростатичні. Мікрофони характеризуються рядом параметрів, основні з яких приведені в [9].

Основні технічні характеристики конденсаторних мікрофонів, які можуть використовуватися в акустичній діагностиці РЕА, надані в [6].

Для прийому акустичних сигналів можуть застосовуватися і контактні п'єзоперетворювачі, описані в [7]. Але вони мають ряд недоліків, пов'язаних з обов'язковим контактом з твердим тілом. Тому останніми роками з'явилися нові методи і засоби реєстрації коливань, які використовують методи візуалізації акустичних коливань на базі елементів нелінійної оптики і акустичної голографії [8]. Але основним недоліком цих методів є їх висока вартість.

При прийомі шумових сигналів, як правило, розв'язуються дві вимірювальні задачі: виявлення джерел шуму і визначення рівня їх шумів [9].

У випадку з електромагнітним реле основним джерелом шуму є якір реле. Але навколо блоку реле створюються електромагнітні хвилі, які можуть негативним чином вплинути на електродинамічні мікрофони; для зменшення цьо-

го впливу усередині такого мікрофону розташовують додаткову обмотку. Вугільні мікрофони мають низьку якість перетворення середніх та високих звукових частот. Тому для зменшення електромагнітного впливу та підвищення якості перетворення акустичних коливань доцільно використовувати п'єзоелектричні або електростатичні мікрофони. П'єзоелектричні мікрофони дуже перспективні для таких досліджень, оскільки є можливість їх сумісного одночасного використання на кожному зовнішньому елементі реле та у будь-якому місті його корпусу. Але при виростанні п'єзоелектричних мікрофонів важко забезпечити однаковий тиск та однакову точку приєднання мікрофону до елементів реле, які перевіряються. Електростатичні мікрофони володіють меншою залежністю від зміни зовнішнього електромагнітного поля, в порівнянні з електродинамічними мікрофонами, та не існує великих проблем з їх розташуванням біля корпусу реле. Для якнайменших спотворень при перетворенні звукових коливань в електричний сигнал доцільно розташувати мікрофони в середині шумонепроникної чарунки з блоком реле, біля його корпусу, в безпосередній близькості від якоря реле. В якості мікрофону оптимальним за простотою, якістю сигналу та вартістю буде застосування конденсаторного мікрофону типу МК51 («Неватон»).

Велике значення при вимірюваннях і аналізі шумів при роботі реле має правильний вибір часу реєстрації (спостереження). Час реєстрації цих шумів повинен на порядок або більш перевищувати найтриваліші періоди шумового сигналу.

Крім того, шуми різних елементів РЕА можуть ставитися в широкі межі по частоті і по рівню залежно від режиму роботи і виду несправності. Тому для шумової діагностики і визначення вигляду і параметрів розподілу шумових сигналів у комплексі з мікрофоном необхідно застосовувати перетворювачі та пристрої, які можуть проводити статистичну обробку сигналів. Наприклад, до виходу первинного перетворювача мікрофону підключається вторинний перетворювач – АЦП та комп'ютер для управління, обробки і запису сигналів, які застосовуються у комплексі [2]. У цьому вимірювальному комплексі використовується електростатичний мікрофон, сертифікований АЦП типу LCARD E-140 зі своїм інтерфейсом та комп'ютер, що забезпечує високий ступінь точності результатів при мінімальних витратах коштів, часу і мінімальних вимогах до кваліфікації фахівців, що виконують роботу.

Аналіз шумових сигналів реле

Розглянемо один з варіантів контролю працездатності релейної апаратури залізничної автоматики з використанням методу шумової діагностики (ідентифікація шумових сигналів на основі використання моментів щільності розподілу імовірності випадкових шумових сигналів).

На рис. 2 представлені шумова діаграма роботи реле 1 в поєднанні з фактичним рухом якоря 2 після подання струму в обмотки реле НМШ 2-900.

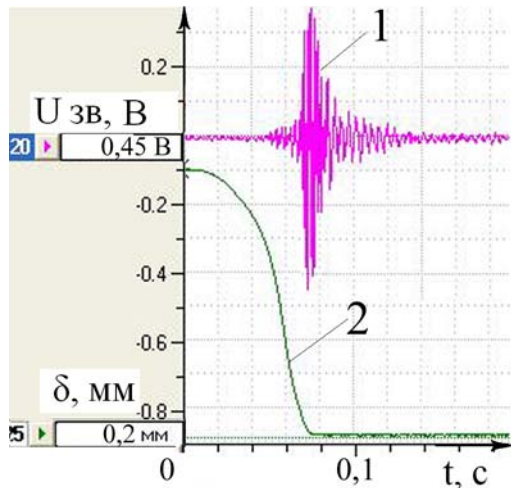


Рис. 2. Шумова діаграма 1 та рух якоря реле 2

Початок зростання амплітуди шуму співпадає з зупинкою якоря реле під час його удару о полюсний наконечник реле та може використовуватись для діагностування роботи реле.

На рис. 3 представлені акустичні шумові «портрети» механічних переміщень, що відбуваються під час включення всередині справного блоку реле типу НМШ 2-900 (рис. 3, а), при зносі антимагнітного штифта (рис. 3, б) та при штучно збільшеному антимагнітному штифті (рис. 3, в).

На діаграмі (рис. 3, б) видно, що амплітуда акустичних коливань при спрацьовуванні реле більша (величина a). Це обумовлено великим вільним ходом і прискоренням якоря перед ударом зменшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник. Час до максимуму цієї амплітуди від початку включення, також більший (величина ϵ). Це обумовлено більшою відстанню, яку проходить якорь до удару зменшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник.

На діаграмі (рис. 3, в) видно, що амплітуда акустичних коливань при спрацьовуванні реле менша (величина a). Це обумовлено зменшеним вільним ходом і меншим прискоренням якоря перед ударом збільшеного антимагнітно-

го штифта о полюсний наконечник. Час до максимуму цієї амплітуди від початку включення, менший (величина ϵ). Це обумовлено меншою відстанню, яку проходить якорь до удару збільшеного антимагнітного штифта о полюсний наконечник.

Дослідження, проведені з різною висотою антимагнітного штифта, показують, що в цих випадках амплітудні показники мають більш характерні розбіжності, ніж відповідні часові показники. Це обумовлено збільшенням прискорення якоря перед його ударом о полюсний наконечник при зменшеній висоті штифта (й навпаки). Швидкість якоря та енергія, з якою він ударяється о полюсний наконечник, також зростає (або зменшується), відповідно зростає або зменшується енергія акустичної хвилі, що добре фіксує мікрофон.

Акустичні діаграми роботи реле доповнюють інформацію для визначення характеру несправності реле, отриману при вимірюванні струму і фізичного зазору працюючого реле.

Таким чином, шумові портрети об'єкту, що діагностується, повинні порівнюватися з еталонними записами можливих відхилень. Розбіжність (схожість) можна успішно оцінити за допомогою наведених вище параметричних або імовірнісних критеріїв, а також інших критеріїв та методів, вживаних в математичній статистиці та кластерному аналізі [10].

Розглянемо варіант випадкового процесу виникнення акустичних коливань при зменшеному антимагнітному штифті.

З рис. 3 видно, що випадковий сигнал носить характер імовірності в певному часовому інтервалі.

Представимо опис цього випадкового процесу у вигляді густини розподілу імовірності $f(A, A_0, \sigma)$, де $A > 0$ – випадкова величина, представлена десятковим логарифмом відношення $A = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}$, де U_0 – опорне значення, а

U_1 – отримане значення шуму.

В цьому випадку густина імовірності може бути описана наступною рівністю:

$$f(A, A_0, \sigma) = \begin{cases} 0 & \text{при } A \leq 0; \\ \frac{1}{M \sigma A \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg A - \lg A_0)^2}{2\sigma^2}} & \text{при } A > 0, \end{cases} \quad (3)$$

де $M = \frac{1}{\lg e} = 2,303$;

A_0 – математичне очікування випадкової величини $A = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}$;

σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини A .

Рівність (3) є описом густини розподілу випадкової величини $A = 20 \lg \frac{U_1}{U_0}$ (нормальний логарифмічний розподіл).

Ступінь наближення (3) до нормального закону визначається величиною σ .

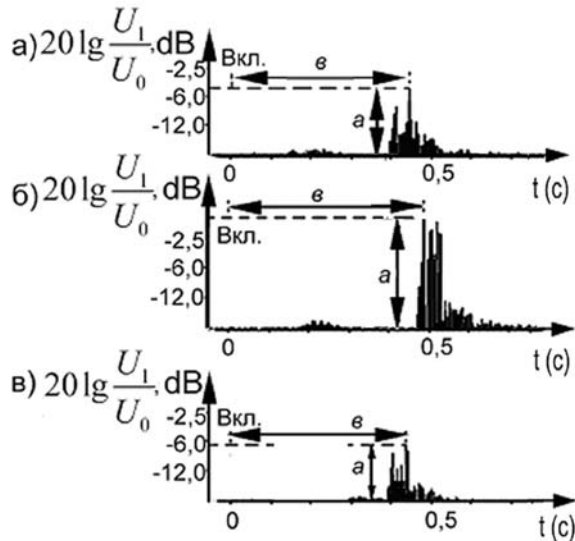


Рис. 3 Акустичні діаграми:

- а) Справного реле НМШ2-900;
- б) При зменшеному антимагнітному штифті;
- в) При збільшеному антимагнітному штифті

Правомірність застосування виразу (3) для опису випадкового процесу (рис. 3, а) може бути підтверджена методами математичної статистики і оцінки ступеня наближення статистичного розподілу випадкової величини до теоретичного розподілу.

Статистична обробка випадкових сигналів, отриманих за допомогою програмного вимірювального комплексу, дозволила визначити щільність імовірності амплітуд шумових сигналів при спрацьовуванні реле НМШ 2-900.

Амплітуди шумового сигналу при зменшеному антимагнітному штифті реле значно більше амплітуд відповідного сигналу нормального реле. Цю обставину можна використовувати для відбору реле для подальшого ремонту і регулювання.

Шумові сигнали носять випадковий характер, тому представляють інтерес отримання таких характеристик, як щільність імовірності розподілу шумових сигналів.

Використовуючи апарат статистичної оцінки законів розподілу випадкових величин амплітуди A , мають вигляд (рис. 4, 5), що узгоджується з логарифмічним нормальним розподілом (рис. 6).

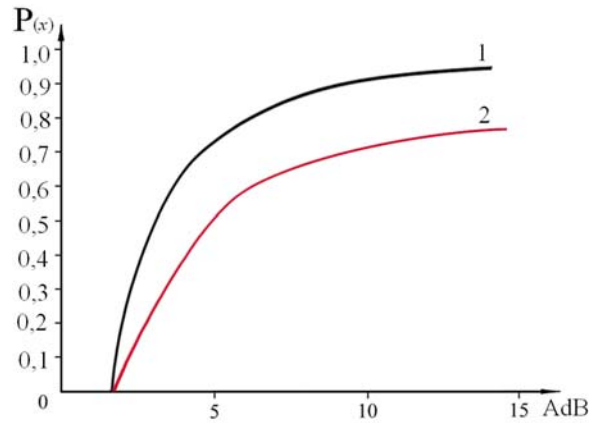


Рис. 4. Функція розподілу ймовірності шумових сигналів: 1 – несправного реле; 2 – справного реле

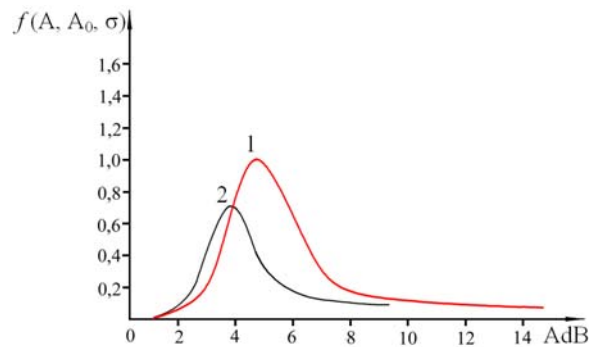


Рис. 5. Щільність розподілу ймовірності шумових сигналів: 1 – несправного реле; 2 – справного реле

При цьому функція розподілу $f(A, A_0, \sigma)$ матиме вигляд:

$$f(A, A_0, \sigma) = \begin{cases} 0 & \text{при } A \leq 0; \\ \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt & \text{при } A > 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{де } U = \frac{\lg A - \lg A_0}{\sigma}.$$

Процедуру відбракування ненадійних реле можна здійснювати за допомогою програмного комплексу шляхом порівняння середніх значень амплітуд шумових сигналів еталонного реле й того, що перевіряється. Якщо середнє значення шумових сигналів реле, що перевіряється, більше аналогічної характеристики еталонного реле, то ухвалюється рішення відбракування першого з подальшим аналізом причин відхилення від норми і відповідного регулювання або ремонту.

Так, при перевірці реле НМШ2-900 середня амплітуда шумових сигналів еталонного реле: $A_e = 0,47$ dB, а несправного реле – $A = 0,6$ dB, що підтверджує необхідність його регулювання

або ремонту. При цьому надійність прийняття рішення складає більш як 90 %.

При збільшеному антимагнітному штифті характер шумових сигналів також представляє собою імовірний процес (рис. 2, в). Прийняття рішення про справність реле в цьому випадку може бути здійснене за вищерозглянутим критерієм – порівнянням середніх значень амплітуд шумових сигналів справного і несправного реле.

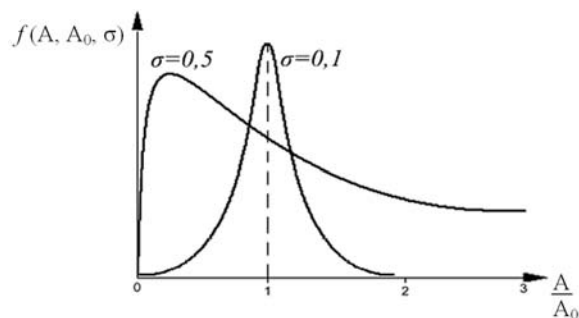


Рис. 6. Щільність розподілу ймовірності

У практичній роботі по розробці і впровадженню методів акустичної діагностики РЕА може виникнути необхідність розробки системи стандартів для підприємств галузі. В цьому випадку основними будуть три групи стандартів: по методах і засобах акустичної діагностики в широкому плані, а також по конкретних методах або методиках діагностування і, в окремих випадках, галузевий класифікаційний стандарт.

При розробці цих документів слід використовувати основні положення теорії і практики стандартизації в області засобів вимірювання. [11]. На додаток до них при розробці стандартів з акустичної діагностики складових частин РЕА можуть використовуватися принципи стандартизації методів і засобів інтегральної діагностики, викладені в [12].

Висновки

Віброшумова діагностика електромагнітної апаратури є достатньо надійним способом діагностики комутаційних засобів РЕА.

Для якнайменших спотворень при перетворенні звукових коливань в електричний сигнал доцільно розташувати мікрофони в середині шумонепроникної чарунки біля корпусу реле, в безпосередній близькості від якоря реле. В якості мікрофонів оптимальними за простотою, якістю сигналу та вартістю є застосування електростатичних мікрофонів.

Для віброшумової діагностики і визначення розподілу шумових сигналів у комплексі з мікрофонами необхідно застосовувати перетворювачі й комп'ютер із відповідним програмним

забезпеченням для управління та статистичної обробки сигналів. У пристрої [2] до виходу первинного перетворювача – мікрофону – підключаються вторинний перетворювач – АЦП типу LCARD E-140 зі своїм інтерфейсом і комп'ютер для управління, обробки і запису сигналів.

Акустичний канал у цьому комплексі використовується сумісно з оптичним, електричним і електродинамічним каналами діагностики реле і доповнює інформацію про стан об'єкту.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Коллакот, Р. А. Диагностирование технического оборудования [Текст] : [пер. с англ.] / Р. А. Коллакот; под ред. Ю. Н. Мясникова. – Л.: Судостроение, 1980.
2. Пат. 70568 на винахід Україна. Пристрій для вимірювання переміщення якоря електромагнітного реле [Текст] / Разгонов А. П., Андреевських О. В., Бондаренко Б. М., Безрукавий Д. А.; заявл. 25.04.07, Бюл. № 5 (2007).
3. Гоулд, Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов [Текст] : [пер. с англ.] / Б. Гоулд; под ред. Ю. И. Александрова. – М.: Мир, 1982.
4. Контроль шума в промышленности [Текст] : [пер. с англ.] / под ред. Дж. Д. Вебба. – Л.: Судостроение, 1981.
5. Санкар, Оценка надежности машин по степени усталостного повреждения, накопленного вследствие случайных вибраций [Текст] / Санкар, Остигат, Ксистрис // Конструирование и технология машиностроения. – 1978. – № 4.
6. Электронная аппаратура [Текст] : Каталог 1983/1984 г. фирмы «Брюль и Кьер».
7. Ермолов, И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля [Текст] / И. Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981.
8. Гик, Л. Д. Акустическая голография [Текст] / Л. Д. Гик, под ред. Н. Н. Пузырева. – Новосибирск: Наука, 1981. – 64 с.
9. Клюкин, П. И. Акустические измерения в судостроении. [Текст] / П. И. Клюкин, А. Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1966.
10. Классификация и кластер [Текст] : [пер. с англ.] / под ред. Дж. Вэн Райзин; под ред. Ю. И. Журавлева. – М.: Мир, 1980.
11. Бойцов, В. В. Роль метрологии в решении народнохозяйственных задач [Текст] / В. В. Бойцов // Измерительная техника. – 1978. – № 8. – С. 3-5.
12. Дубицкий, Л. Г. Принципы стандартизации методов и средств интегральной диагностики [Текст] / Л. Г. Дубицкий, В. Н. Сретенский, Р. И. Козлов // Электронная техника. Сер. 8. «Управление качеством, метрология, стандартизация». – 1980. – Вып. 7 (85).

Надійшла до редколегії 12.01.2010.

Прийнята до друку 18.01.2010.

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

В роботі проведено аналіз відмов і існуючих методів контролю стану рейкових кіл для подальшої розробки на цій основі методів та засобів автоматизованого контролю параметрів рейкових кіл.

В работе проведен анализ отказов и существующих методов контроля состояния рельсовых цепей для разработки на этой основе методов и средств автоматизированного контроля параметров РЦ.

In this article the analysis of refusal and existing methods of control of condition of track circuits of tonal frequency is conducted for development (on this base) of methods and devices of automated control of the track circuits' parameters.

Введение

Рельсовые цепи являются основным путевым датчиком систем железнодорожной автоматики на станциях и перегонах, от правильности работы которых зависит безопасность движения поездов (БДП). В связи с постоянно ужесточающимися требованиями к БДП возрастает важность технологического обслуживания рельсовых цепей (РЦ), в частности ТРЦ, которые применяются на участках с ускоренным движением поездов.

Дальнейшее повышение безопасности рельсовых цепей связано с улучшением технического обслуживания на качественно новом уровне с использованием автоматизированных методов контроля. Для разработки таких методов и систем необходимо предварительно провести анализ статистики отказов рельсовых цепей с выявлением наиболее часто встречающихся отказов и проанализировать методы контроля состояния РЦ.

Цель работы

В связи с вышеизложенным, в работе поставлена цель провести анализ отказов рельсовых цепей и существующих методов контроля состояния РЦ для разработки на этой основе методов и средств автоматизированного контроля параметров РЦ.

Анализ отказов рельсовых цепей

На железных дорогах Украины идет интенсивное внедрение рельсовых цепей тональной частоты (ТРЦ) на участках со скоростным движением поездов. Эти рельсовые цепи отличаются от эксплуатируемых практически следующими положительными особенностями: полным отсутствием изолирующих стыков на

перегоне, применением аппаратуры на современной элементной базе и амплитудно-модулированного сигнала вместо синусоидального, а также возможностью работы при низком сопротивлении изоляции балласта. Перечисленные отличия, в свою очередь, вызывают сложности при анализе работы ТРЦ обслуживающим персоналом, т.к. изменяется структура отказов и методы контроля этих рельсовых цепей (тип измерительных приборов). Данное обстоятельство сказывается на безопасности движения поездов (БДП). Поэтому с целью повышения безопасности ТРЦ в данной работе проведен анализ отказов и методов контроля.

Анализ структуры отказов ТРЦ заключался в следующем: распределение отказов рельсовых цепей с изолирующими стыками (далее РЦ с ИС) по элементам; сравнительный анализ РЦ с ИС и ТРЦ по удельным показателям на 1000 рельсовых цепей. Следует отметить, что анализ проводился за 2005 г. на основании данных [1] для железных дорог России, где эксплуатация ТРЦ ведется более 10 лет и ними оборудовано больше участков, что увеличивает выборку и объективность результатов, в отличие от железных дорог Украины.

Всего отказов РЦ с ИС за 2005 г. на всей сети железных дорог России зафиксировано 1966, при этом эти отказы составляют около 20 % от всех отказов хозяйства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). На первом этапе анализа выявлено наиболее встречающиеся причины отказов, которые представлены на рис. 1. При этом чаще всего отказ приходился на изолирующий стык – всего 570; на стыки соединения – 356; на закорачивание рельсовых цепей – 315; на тяговые, межпутные соединители, нарушение регулировочного режима, влияние посторонних источников, излом рельса – 235; на неисправность аппаратуры – 196; на остальные причины отказов – 294.

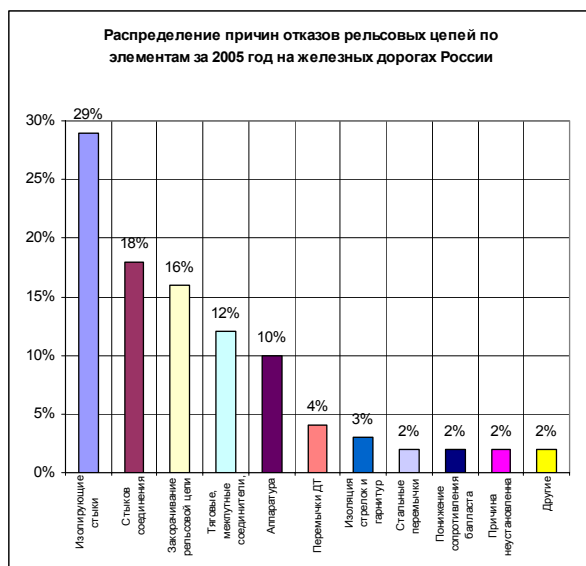


Рис. 1. Распределение причин отказов в рельсовых цепях по элементам

На железных дорогах Украины отказов рельсовых цепей с ИС за 2005 г. зафиксировано 246 согласно [2], при этом данные отказы составляют 13 % от всех отказов СЦБ. Несмотря на различия в количестве отказов рельсовых цепей и их удельном весе по хозяйствам СЦБ в России и Украине, именно данные отказы непосредственно влияют на БДП. Однако практически около четверти от общего количества отказов рельсовых цепей связано с нарушениями технологии обслуживания (ТО).

Весь предыдущий анализ применим к РЦ с ИС, но не к ТРЦ. Представленные результаты сравнительного анализа работы РЦ с ИС и ТРЦ для железных дорог России свидетельствуют, что, по количеству отказов на 1000, рельсовые цепи тональной частоты работают в 3 раза надежнее. Такое увеличение надежности работы объяснить только практически полным отсутствием изолирующих ее стыков невозможно, поэтому требуются детальные пояснения. Во-первых, влияние посторонних источников практически исключается, т.к. обеспечивается подавление какого-либо сигнала. Во-вторых, уменьшается количество ДТ, которые ставятся через каждые 5...6 км. В-третьих, выполнение аппаратуры с учетом современных требований и на современной элементной базе приводит к сокращению количества отказов. В-четвертых, коэффициент возврата путевого приемника повышается до 0,8, что улучшает основные режимы работы ТРЦ.

Такое преимущество по надежности работы увеличивается при внедрении ТРЦ с централизованным размещением аппаратуры. На железных дорогах Украины в ТРЦ, как и в РЦ с ИС,

около четверти от всех отказов связано с нарушением технического обслуживания (ТО), а в 11 % отказов причина не выявлена, что можно объяснить сложностью в эксплуатации и диагностировании отказов.

Приведем пример диагностирования неполадки электромехаником ТРЦ на перегоне в нормальном режиме.

Неисправность изолирующих стыков (короткое замыкание). Возможна такая ситуация, когда путевого приемник смежной рельсовой цепи станет под ток, и на занятый участок пути вступит подвижная единица, что приведет к крушению. В этом случае необходимо проверять отсутствие сигнала контролируемой рельсовой цепи на путевого приемнике смежной ТРЦ (напряжение на выводах 11-43 блока ПП). Для короткого замыкания изолирующих стыков характерно достаточно резкое увеличение контролируемого напряжения.

Неисправность стыкового соединителя (разрыв). В результате через него прекращает протекать сигнальный ток рельсовой цепи аналогично, как и при обрыве рельса. Рельсовая цепь (РЦ) начинает работать в контрольном режиме. На ПП резко уменьшается напряжение сигнала, в том числе и от соседних ТРЦ при отсутствии ИС на границе контролируемого участка. Ток источника ТРЦ резко уменьшается.

Результатом короткого замыкания является резкое увеличение тока (и соответственно мощности) генератора РЦ. На путевого приемнике напряжение скачком уменьшается ниже величины надежного отпуская, фиксируя занятость контролируемого участка.

Неисправность межпутного соединителя по характеру воздействия аналогична описанной ситуации для неисправности стыков соединения.

Неисправность тяговых перемычек, которые организуют электрическое соединение рельс-ДТ, подразумевает перегорание данного проводника тока. В этом случае обратный тяговый ток протекает только по одному рельсу, увеличивается асимметрия тока, и на приемном конце ТРЦ возникает ток частотой 50 Гц и происходит размыкание АВМ-2 15А (при электротяге переменного тока). Либо же увеличивается намагниченность сердечника ДТ, что приводит к изменению параметров ДТ питающего (или релейного) конца и форме сигнала на приемном конце ТРЦ (при электротяге постоянного тока).

Уменьшение напряжения на путевого приемнике ниже указанного в регулировочной таблице. В этом случае причин может быть несколько: утечка тока, влияние посторонних ис-

точников, уменьшение сопротивления изоляции балласта и т.д. Поэтому электромеханику в данном случае наиболее сложно определить причину неисправности. Только после определения причины уменьшения напряжения на путевом приемнике электромеханик может осуществить санкционированно подрегулировку рельсовой цепи согласно [3, 4]. Напряжение на питающем конце ТРЦ должно быть не более указанного в регулировочной таблице, а на путевом приемнике – в пределах между минимальным и максимальным согласно регулировочной таблице. Контролируемые параметры – напряжения на выходе генератора и фильтра, напряжение на путевом приемнике.

Влияние посторонних помех наиболее сказывается на путевом приемнике, который принимает сигнал. Напряжение на нем должно быть при минимальном напряжении питания и минимальном сопротивлении изоляции рельсовой линии не менее и при максимальном напряжении питания и максимальном сопротивлении изоляции рельсовой линии не более указанного в регулировочной таблице [5].

При изломе рельса характерна ситуация, описанная для неисправности стыков соединения.

Рассмотрены не все возможные ситуации, однако даже такое количество неисправностей свидетельствует об усложнении диагностики отказов в ТРЦ

Анализ существующих методов контроля состояния РЦ

Рассмотрим ТО для рельсовых цепей, которое предусматривается согласно «Инструкции по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) ЦШЕОТ/0012» (далее ЦШЕОТ/0012) [5], «Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування ЦШ/0042» [3].

Техническое обслуживание ТРЦ базируется на технологических картах № 32...№ 41 [3] и в соответствии с пунктами 10.1...10.9. ЦШЕОТ/0012 [5]. В нормальном режиме измеряется напряжение на каждом элементе рельсовой цепи по технологической карте (ТК) № 36 и пункту 10.4. ЦШЕОТ/0012, а также проводится проверка стояния балласта по ТК № 40 и пункту 10.8. ЦШЕОТ/0012 и стояния рельсовой цепи в соответствии с ТК № 32 и пунктом 10.1. ЦШЕОТ/0012. Кроме того, отдельно измеряется напряжение на путевых реле по ТК № 34 и пункту 10.3. ЦШЕОТ/0012. В шунтовом режиме опре-

деляется по ТК № 33 и пункту 10.2. ЦШЕОТ/0012 шунтовая чувствительность относительно релейного и питающего концов к нормативному шунту 0,06 Ом (остаточное напряжение). В режиме АЛС измеряется величина кодированного тока АЛС по ТК № 37 и пункту 10.4. ЦШЕОТ/0012, а также выполняется ее регулирование по ТК № 36 и пункту 10.4. ЦШЕОТ/0012, временные параметры кодов АЛС по ТК № 35 и пункту 10.4. ЦШЕОТ/0012. Другие сопутствующие работы выполняются по ТК № 37, 38, 39, 41 в соответствии с пунктами 10.6., 10.7. ЦШЕОТ/0012.

Перечисленные выше технологические карты рекомендуют применение следующих измерительных приборов: прибор комбинированный Ц4380 (ампервольтметр ЭК-2346, мультиметр В7-63), мультиметр цифровой В7-63, преобразователь тока селективный А9-1, индикатор тока рельсовых цепей ИРЦ – 25/50 (МРЦ – 75), шунт для испытания рельсовых цепей типа ШУ-01м сопротивлением 0,06 Ом, измеритель временных параметров ИВП – АЛСН, измеритель сопротивления заземления М416 (ЭС0201), мегаомметр М4100/5 (ЭС0202/2), искровой промежуток ИПМ.

ТО выполняется, в основном, электромехаником и электромонтером с периодичностью работ от 1 раза в четыре недели до 1 раза в квартал, однако работы по технологическим картам № 33, 34, 36 могут выполняться каждый день. Они должны измерять электрические параметры, которые зависят от первичных параметров рельсовой линии (сопротивления изоляции балласта R_{iz} и рельс Z_p), на большом количестве рельсовых цепей. Поэтому рассмотрим методы измерения R_{iz} и Z_p .

Известны следующие методы измерения R_{iz} и Z_p [6]: холостого хода и короткого замыкания (х.х. и к.з.), двух коротких замыканий, двух известных нагрузок, электрически длинной линии, модифицированный электрически длинной линии, одного короткого замыкания с графоаналитическим расчетом, двух измерений при одном коротком замыкании. Последние два метода в эксплуатации рельсовых цепей не нашли широкого применения, т.к. предполагают построение графиков на основании измеренных величин и не дают сразу искомые величины непосредственно. Метод модифицированный электрически длинной линии предполагает, что при наложении шунта напряжение и ток не изменятся ни в начале линии около источника питания, ни на расстоянии 0,5 км от начала рельсовой линии. При этом вычисление вели-

чины R_{iz} производится по громоздкой формуле с использованием логарифмической функции. Данный метод тоже не нашел широкого применения из-за специфики требований. Рассмотрим более подробно первые три метода, которые нашли широкое применение в эксплуатации рельсовых цепей ввиду простоты их реализации.

Метод х.х. и к.з. наиболее прост, но имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что ток холостого хода измерить очень сложно ввиду его малого значения. Таким образом, измерения полностью зависят от правильности значения тока холостого хода. Кроме того, чем длиннее рельсовая линия, тем меньше разность величин сопротивлений холостого хода и короткого замыкания, что приводит к значительным погрешностям. Рассмотренные измерения требуют отключения от рельсовых цепей путевых трансформаторов (дрессель-трансформаторов). Поэтому для исключения данного недостатка используют остальные методы.

Рассмотрим метод двух коротких замыканий более подробно. В соответствии с методом производятся два коротких замыкания на расстояниях l и $2l$ от источника питания. В результате получаем соответствующие расстояниям l , $2l$ сопротивления Z_l , Z_{2l} . Затем вычисляем величины волнового сопротивления Z_B и гиперболического тангенса от γl :

$$\operatorname{th}\gamma l = \sqrt{\frac{2Z_l - Z_{2l}}{Z_{2l}}} = T e^{j\varphi_l}; \quad (1)$$

$$Z_B = \frac{Z_l}{\operatorname{th}\gamma l}, \quad (2)$$

где γ – коэффициент распространения.

После чего определяем километрические коэффициенты затухания амплитуды α и β фазы:

$$\operatorname{th}2\beta \cdot l = \frac{2T \cos\varphi_l}{1 + T^2}; \quad (3)$$

$$\operatorname{th}2\alpha \cdot l = \frac{2T \sin\varphi_l}{1 - T^2}. \quad (4)$$

Модуль коэффициента распространения $|\gamma| = \sqrt{\beta^2 + \alpha^2}$, а угол $\varphi_\gamma = \operatorname{arctg}(\alpha/\beta)$.

Тогда при активном сопротивлении изоляции балласта (СИБ)

$$Z_p = Z_B \cdot \gamma; \quad (5)$$

$$R_{iz} = \frac{Z_B}{\gamma}. \quad (6)$$

При наличии в СИБ реактивной (емкостной) составляющей модули Z_p и R_{iz} выражаются:

$$|Z_p| = |Z_B| \cdot \sqrt{\beta^2 + \alpha^2}; \quad (7)$$

$$R_{iz} = \frac{Z_B}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}}; \quad (8)$$

$$\varphi = \varphi_B + \varphi_\gamma \quad \text{или} \quad \varphi = \varphi_B - \varphi_\gamma, \quad (9)$$

где φ_B и φ – углы волнового сопротивления и сопротивления рельсов.

Данный метод дает хорошие результаты при линейном СИБ или небольшой его нелинейности. При этом важно помнить, что полученные результаты могут быть применены для длины $2l$, поэтому данную длину необходимо выбирать равной длине рельсовой линии.

Рассмотрим метод двух известных нагрузок более подробно. В соответствии с методом производятся измерения в нормальном режиме рельсовой цепи, нагружаемой на заранее известные нагрузки R_{H1} и R_{H2} . Отсюда можем записать две системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_1' &= U_2' \operatorname{ch}\gamma l + I_2' Z_B \operatorname{sh}\gamma l \\ I_1' &= I_2' \operatorname{ch}\gamma l + \frac{U_2'}{Z_B} \operatorname{sh}\gamma l \end{aligned} \right\}; \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1'' &= U_2'' \operatorname{ch}\gamma l + I_2'' Z_B \operatorname{sh}\gamma l \\ I_1'' &= I_2'' \operatorname{ch}\gamma l + \frac{U_2''}{Z_B} \operatorname{sh}\gamma l \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где величины I_1' , I_2' , U_1' , U_2' измерены при R_{H1} , а величины I_1'' , I_2'' , U_1'' , U_2'' – при R_{H2} .

Отсюда имеем, что входное сопротивление равняется

$$Z_1' = \frac{U_1'}{I_1'} = \frac{R_{H1} + Z_B \operatorname{th}\gamma l}{1 + \frac{R_{H1}}{Z_B} \operatorname{th}\gamma l}; \quad (12)$$

$$Z_1'' = \frac{U_1''}{I_1''} = \frac{R_{H2} + Z_B \operatorname{th}\gamma l}{1 + \frac{R_{H2}}{Z_B} \operatorname{th}\gamma l}, \quad (13)$$

где Z_1' и Z_1'' – входное сопротивление при R_{H1} и R_{H2} , соответственно.

Решая уравнения (12) и (13) относительно неизвестных волнового сопротивления Z_B и гиперболического тангенса от γl , получим:

$$Z_B = \pm \sqrt{\frac{Z_1'' Z_1' \Delta R_H - R_{H2} R_{H1} (Z_1'' - Z_1')}{(R_{H2} - R_{H1}) - (Z_1'' - Z_1')}}; \quad (14)$$

$$\text{th}\gamma l = \frac{Z_B (R_{H1} - Z_1')}{R_{H1} Z_1' - Z_B^2} = T e^{j\varphi_l}, \quad (15)$$

где $\Delta R_H = (R_{H2} - R_{H1})$.

На основании формул (3)–(6) или (3), (4), (7)–(10) находим R_{iz} и Z_p .

Данный метод имеет преимущество в том, что его точность измерений практически не зависит от нелинейности балласта. Недостатком его является громоздкость вычислений.

Метод электрически длинной линии предполагает, что сопротивления холостого хода и короткого замыкания равны, а значит ее входное сопротивление равно волновому. Измерив Z_B и входное сопротивление рельсовой линии, при коротком замыкании на расстоянии l от места измерения, можно определить

$$T e^{j\varphi_l} = \text{th}\gamma l = \frac{Z_l}{Z_B}. \quad (16)$$

На основании формул (3)–(6) или (3), (4), (7)–(10) находим R_{iz} и Z_p .

Данный метод наилучшим образом применим в ТРЦ, однако обладает недостатками метода х.х. и к.з.

Все вышерассмотренные методы измерений сопротивлений изоляции балласта R_{iz} и рельс Z_p предполагали наличие у электромеханика амперметра и вольтметра, но согласно ТК № 40 для измерения величины СИБ можно использовать измеритель сопротивления балласта типа ИСБ-1.

Принцип измерения прибором основан на том, что при высокой частоте тока (несколько килогерц) физическая длина электрически длинной линии весьма незначительна. В этом случае может оказаться, что с обеих сторон от места измерений будут электрически длинные линии. Тогда входное сопротивление в месте измерений будет равно половине волнового сопротивления:

$$Z_{BX} = 0,5 \cdot Z_B.$$

В приборе содержится генератор, который вырабатывает ток частотой 5000 Гц, и резистор, включенный последовательно с генератором.

Внутреннее сопротивление генератора вместе с сопротивлением резистора значительно выше входного сопротивления рельсового цепи, поэтому при подключении прибора ИСБ-1 даже при наиболее низком сопротивлении изоляции ток на выходе генератора остается постоянным. При этом между точками подключения прибора к рельсам появляется напряжение, пропорциональное напряжению на нагрузке $0,5R$. Через защитный фильтр и трансформатор это напряжение подается на индикатор И. По показаниям индикатора, пользуясь градуировочной таблицей, определяют удельное сопротивление изоляции рельсовой цепи.

Прибор измеряет сопротивление изоляции на участке длиной от 250 до 300 м в пределах полной длины рельсовой цепи. По полученным значениям этих измерений находят участок рельсовой цепи с пониженным сопротивлением изоляции.

После всех измерений определяют среднее значение сопротивления изоляции рельсовой цепи R_{iz} в Ом·км:

$$R_{iz} = \frac{n}{\frac{1}{R_{H1}} + \frac{1}{R_{H2}} + \dots + \frac{1}{R_{Hn}}},$$

где n – число измерений; R_{Hn} – показания прибора в точках измерения, Ом·км.

Данный метод измерения дает сопротивления изоляции рельсовой цепи R_{iz} с точностью $\pm 10\%$, что для близких к нормативному значению СИБ 1 Ом·км может сильно повлиять на регулировку данной рельсовой цепи. При этом предполагается, что сопротивление рельс неизменно (нормативная величина), а на практике это может оказаться далеко не так. Точность измерений зависит от количества измерений.

Однако при эксплуатации рельсовых цепей сопротивление изоляции балласта R_{iz} принимают активной величиной, а сопротивление рельс – нормативным, как в последнем методе измерений. Таким образом, ни один из рассмотренных методов измерения сопротивлений изоляции балласта R_{iz} и рельс Z_p полностью не удовлетворяют требованиям по простоте применения и вычисления искомых величин, т.к. в расчетных выражениях разности величин близки друг к другу, что приводит к значительным погрешностям (вычисление гиперболического тангенса от γl может оказаться невозможным, если $\gamma l \geq 1$). Поэтому предлагается использовать метод, позволяющий измерить сопротивление рельс, а затем рассчитать вели-

чину СИБ. Для этого можно произвести короткое замыкание на расстоянии 50 м от источника питания рельсовой цепи и измерить напряжение U и ток I , при этом частью тока, ответвляющегося через балласт и шпалы, можно пренебречь, тогда

$$|Z_p| = \frac{|U|}{|I| \cdot 0,05}.$$

По одному из трех первых методов определения R_{iz} и Z_p находим волновое сопротивление. После получаем величину СИБ по формуле (6) с учетом выражения (5). Предложенный метод измерения позволит с достаточной степенью точности измерений получить R_{iz} и Z_p , но требует экспериментальной проверки.

Выводы

В работе проведен анализ отказов рельсовых цепей и существующих методов контроля состояния РЦ для разработки на этой основе методов и средств автоматизированного контроля параметров РЦ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казиев, Г. Д. Повышать надежность рельсовых цепей [Текст] / Г. Д. Казиев, В. М. Адаскин // Автоматика, телемеханика и связь. – 2006. – № 4. – С. 2-5.
2. Мороз, В. П. Аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики [Текст] / В. П. Мороз, А. О. Лапко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – № 2 (64). – С. 10-15.
3. Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування ЦШ/0042 [Текст]. – К., 2006. – 462 с.
4. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних кіл [Текст]. – ЦШ/0041. – К., 2006. – 236 с.
5. Інструкції з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) ЦШЕОТ/0012 [Текст]. – К., 1998. – 72 с.
6. Дмитренко, И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст] : учебник для вузов ж.-д. трансп. / И. Е. Дмитренко, В. В. Сапожников, Д. В. Дьяков. – М.: Транспорт, 1994. – 263 с.

Поступила в редколлегию 18.12.2009.

Принята к печати 22.04.2010.

Т. Н. СЕРДЮК (ДИИТ), А. В. ШВЕЦ, В. К. ИВАНОВ (Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, Харьков)

ВЫДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ МОЩНЫХ ПОМЕХ ОТ СИЛОВЫХ СЕТЕЙ

В роботі наведено методику компенсації потужних вузькосмугових гармонік, які випромінюються потужними силовими мережами, для застосування в комп'ютеризованій системі визначення та реєстрації імпульсних сигналів, які пов'язані з частковими або коронними розрядами в ізоляторах ліній електропередач. Алгоритм компенсації полягає у визначенні точних значень частоти, фази та амплітуди завади за двома точками у комплексному спектрі сигналу поблизу частоти завади та у формуванні сигналу компенсації, який віднімається з вхідного сигналу.

В работе представлена методика компенсации мощных узкополосных гармоник, излучаемых силовыми сетями, для применения в компьютеризованной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах линий электропередач. Алгоритм компенсации состоит в определении точных значений частоты, фазы и амплитуды помехи по двум отсчетам в комплексном спектре сигнала в окрестности частоты помехи и в формировании сигнала компенсации, который вычитается из исходного сигнала.

A compensation technique for rejection of the powerful narrow-band harmonics radiated by power mains is developed for application (in computer-aided system) of detection and registration of the pulse emissions radiated by partial or crown discharges in isolators of high-voltage power lines. The compensation algorithm for rejection of narrow-band interferences consists in the calculation of exact values of frequency, phase and amplitude of the mains' harmonics by two points in a complex spectrum of the signal near the interference frequency, and in the formation of a compensation signal, which is to be subtracted from an initial signal.

Введение

Изолятор – это один из наиболее ответственных, но и один из самых ненадежных элементов высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). При наличии запаса по электрической прочности, полное повреждение одного из изоляторов в гирлянде может не вызывать сразу нарушения нормальной работы ЛЭП. Однако постепенное накопление дефектных изоляторов ведет к перекрытиям, особенно в грозовой период.

Различные процессы, связанные с ухудшением состояния изоляции и появлением диагностических признаков, исследованы ведущими организациями в этой отрасли. В качестве одной из основных причин, приводящих со временем к разрушению изолятора, рассматривается явление частичных разрядов (ЧР), происходящих во внутренних полостях фарфоровых или стеклянных изоляторов.

Для предотвращения опасных ситуаций в работе ЛЭП разработаны мероприятия по проведению контроля состояния изоляции. В последнее время большое распространение получили дистанционные методы. В настоящее время для контроля изоляции высоковольтных устройств используются три основных метода:

инфракрасный, электронно-оптический (по ультрафиолетовому излучению), ультразвуковой. Первые два из этих методов наиболее точны и информативны, однако эффективность их применения существенно зависит от погодных условий и времени суток, что делает практически невозможным поиск неисправностей при солнечном освещении. Ультразвуковые методы свободны от данных недостатков, однако дистанция обнаружения неисправностей для всех перечисленных методов ограничена несколькими десятками метров, что требует обхода (облета) ЛЭП в непосредственной близости от опор воздушных линий.

Следует отметить, что метод инспекции ЛЭП, основанный на измерении радиопомех, используется для обнаружения повреждений на линиях, однако, вследствие использования высокочастотных диапазонов, дальность действия его также ограничена.

Представляет интерес использование радиоизлучения в диапазоне сверхнизких частот, который соответствует максимальной спектральной плотности излучения короны, а также частичных разрядов в изоляторах. Проблема использования данного диапазона частот связана, прежде всего, с высоким уровнем излучения

ЛЭП на основной частоте (50 Гц) и на высших гармониках, а также помех от атмосферного электричества.

Таким образом, **целью работы** является разработка методики компенсации мощных узкополосных гармоник, излучаемых силовыми сетями, для применения в компьютеризированной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах линий электропередач.

Методика выделения и компенсации мощных помех при измерениях в силовой сети

Задача сбора и анализа широкополосных сигналов возникает во многих областях науки и техники, при этом измерения часто должны проводиться в полевых условиях. К системе сбора и обработки данных предъявляются такие требования, как компактность, универсальность и способность работы в условиях повышенного уровня промышленных помех. Наиболее мощными помехами, как правило, являются гармоники силовой сети 50 Гц, существенно ограничивающие динамический диапазон исследуемых сигналов. Использование режекторных фильтров, настроенных на фиксированные частоты, бывает неэффективным даже при небольших флуктуациях частоты сети. Проблема обычно решается путем использования синхронных фильтров с фазовой автоподстройкой частоты режекции [1–3], которые обеспечивают подавление как основной, так и высших гармоник, излучаемых силовой сетью. Однако немалые размеры и сложность настройки синхронных фильтров ограничивают их применение в портативных системах сбора данных.

В настоящей работе описана система сбора с высоким разрешением, охватывающая динамический диапазон, как помехи, так и сигнала, что позволяет осуществлять фильтрацию полностью в цифровой форме и, таким образом, свести к минимуму использование аналоговых компонентов в приемно-регистрирующем устройстве.

Методика предназначена для применения в компьютеризированной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах ЛЭП. Алгоритм компенсации узкополосной помехи состоит в следующем: по спектру сигнала определяются два максимальных значения амплитуды в окрестности частоты помехи; вычисляются точные значения частоты

фазы и амплитуды сигнала помехи; формируется сигнал компенсации, который вычитается из исходного сигнала. Необходимо отметить, что данная методика позволяет определить параметры помехи с точностью, превышающей частотное разрешение дискретного спектра, определяемого длительностью анализируемой реализации сигнала и частотой дискретизации. Данное обстоятельство является ключевым для успешной работы методики в случае, когда частота помехи не совпадает с одним из дискретных отсчетов спектра.

В качестве модели узкополосной помехи используется монохроматический сигнал $s(t) = a \cos(\omega_0 t + \varphi)$, умноженный на прямоугольное временное окно, охватывающее интервал $0 \dots T$. Спектр такого сигнала описывается формулой:

$$S(\omega) = \frac{aT}{2} \left[\frac{\sin(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}}{(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}} \times e^{i\varphi} \times e^{-i(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}} + \frac{\sin(\omega + \omega_0) \frac{T}{2}}{(\omega + \omega_0) \frac{T}{2}} \times e^{i\varphi} \times e^{-i(\omega + \omega_0) \frac{T}{2}} \right]. \quad (1)$$

Он содержит два пика на частотах $\pm \omega_0$, ширина которых определяется количеством периодов высокочастотного заполнения, попадающих в интервал $0 \dots T$. При переходе к дискретному спектру ширина этих пиков будет зависеть еще и от соотношения между длительностью реализации и периодом высокочастотного заполнения. Если в течение времени T попадает целое количество периодов, то за счет периодичности в спектре получаются бесконечно узкие линии на участках высокочастотного заполнения (рис. 1). Величина дробной части δ , являющейся остатком деления интервала T на период высокочастотного заполнения $t_0 = 2\pi/\omega_0$, определяет ширину пиков и появление «крыльев», которые при значительной амплитуде узкополосного сигнала могут существенно исказить форму спектра в достаточно удаленной области частот. Так, при $\delta = 0$ частота сигнала совпадает с дискретным отсчетом в спектре, а при дробном значении, например, $\delta = 0,4$, частота сигнала находится в промежутке между соседними отсчетами в спектре – точки $S(n_0)$ и $S(n_1)$.

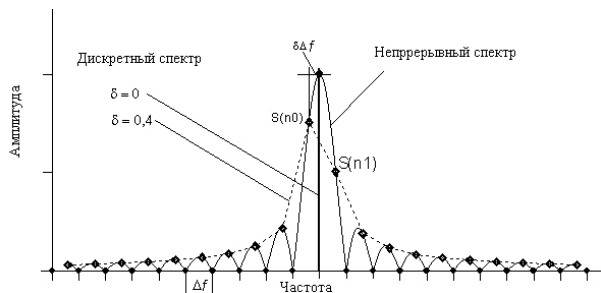


Рис. 1. Формирование дискретного спектра синусоидального сигнала, ограниченного во времени, при дробном и целом соотношениях между длительностью реализации и периодом сигнала

В дискретном представлении (1) имеет следующий вид:

$$S(n) = \frac{aT}{2} \left(\frac{\sin \pi(n - n_0 - \delta)}{\pi(n - n_0 - \delta)} e^{i\varphi} e^{i\pi(n - n_0 - \delta)} + \frac{\sin \pi(n + n_0 + \delta)}{\pi(n + n_0 + \delta)} e^{-i\varphi} e^{i\pi(n + n_0 + \delta)} \right), \quad (2)$$

где n – текущий отсчет в дискретном спектре, n_0 – результат целочисленного деления ω_0 на величину $2\pi\Delta f$ ($\Delta f = 1/T$ – частотное разрешение спектра).

Учитывая только положительные частоты и делая элементарные преобразования, получим следующее выражение для спектральной плотности:

$$S(n) = \frac{aT}{2} e^{i(\pi\delta + \varphi)} \frac{\sin \pi\delta}{\pi(n - n_0 - \delta)}. \quad (3)$$

Для компенсации сигнала помехи необходимо определить точные значения его частоты ω_0 , фазы φ и амплитуды α , что выполняется путем определения параметров двух отсчетов в дискретном спектре в окрестности частоты помехи на основе выражения (3).

Алгоритм компенсации узкополосных помех состоит в следующем:

1) по спектру сигнала определяются два максимальных значения амплитуды $S(n_0)$ и $S(n_1)$ в окрестности частоты помехи;

2) определяются параметры сигнала помехи по следующим формулам, полученным из (3):

$$\delta = \frac{|S(n_1)|}{|S(n_0)| + |S(n_1)|}, \quad \omega_0 = 2\pi\Delta f(n_0 + \delta),$$

$$\varphi = \arg S(n_0) - \pi\delta,$$

$$a = \frac{2}{T} [|S(n_0)| + |S(n_1)|] \cdot \frac{\pi\delta(1-\delta)}{\sin \pi\delta}; \quad (4)$$

3) формируется сигнал компенсации $s(k) = a \cos\left(\frac{\omega_0}{f_s}k + \varphi\right)$, который затем вычитается из исходного сигнала (f_s – частота дискретизации).

Компьютеризованная система обнаружения и регистрации импульсных сигналов

Предлагается создание мобильного комплекса для измерения низкочастотных импульсных помех от высоковольтных сетей, вызванных коронными или частичными разрядами. Мобильный комплекс предназначен для использования во время проведения периодического осмотра технического состояния подвесных изоляторов с проведением измерений при обходе высоковольтных воздушных линий.

Комплекс для обнаружения и регистрации импульсных сигналов включает в себя набор датчиков для измерения низкочастотного магнитного и электрического поля (индукционные датчики с ферромагнитным сердечником и штыревая антенна), многоканальный аналого-цифровой преобразователь и компьютер для накопления и обработки данных.

Для предотвращения проникновения внешних наводок, характерных для встраиваемых систем, и для достижения универсальности был создан отдельный блок аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования АЦП/ЦАП, управляемый из компьютера через стандартный интерфейс (коммуникационный порт). Таким образом, построение системы сбора данных свелось к комбинации датчиков измеряемых сигналов, симметричной проводной линии связи, выносного блока АЦП/ЦАП и внешнего компьютера с комплексом программ для управления приемом и передачей данных через последовательный порт и обработки и накопления принимаемых данных.

Выносной блок АЦП/ЦАП (рис. 2) включает в себя: четыре АЦП; ЦАП разрядностью 10 бит, применяемый для калибровки приемной аппаратуры; микропроцессорный блок управления АЦП/ЦАП с интерфейсом RS-232; программное обеспечение для микроконтроллера, обеспечивающее инициализацию, получение данных от АЦП, передачу данных на ЦАП, связь с внешним компьютером.

Конструктивно устройство состоит из шести плат 65×75 мм, сочлененных гибкими соедине-

телями: четыре платы АЦП, плата ЦАП и плата управления/согласования. Сборка из четырех плат АЦП помещена в экран из пермаллоевой фольги. Вся система размещена в пластиковом корпусе 200×90×48 мм. В корпус вмонтирован 9-штырьковый разъем последовательного интерфейса, входной разъем для аналоговых сигналов, разъем и тумблер питания.

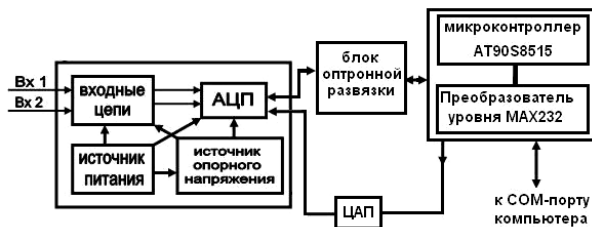


Рис. 2. Структурная схема измерения и компенсации мощных помех в силовых сетях

Для получения высокой разрядности применен аналого-цифровой преобразователь AD7714 со встроенным шестиканальным мультиплексором. В качестве буферного каскада, в котором измеряемый входной диапазон регистратора (дифференциальный сигнал амплитудой 10 В) перестраивается во входной диапазон АЦП (+0,6...-1,85 В), применен инструментальный усилитель AD623. Смещение диапазона сигнала производится с помощью резистивного делителя на входе усилителя. Питание каждой сборки АЦП (0...+5 В) с входными каскадами производится от своего прецизионного источника питания. Т.к. для AD7714 необходим внешний источник опорного напряжения (1,25 В), мы использовали источник ADR291R, для уменьшения помех расположенный в непосредственной близости от AD7714.

Управление модулями АЦП и ЦАП, а также их сопряжение с внешним компьютером производится с помощью микроконтроллера AT90S8515 со встроенным контролером последовательного интерфейса (UART) и преобразователя уровня TTL/RS-232 (MAX232). Через последовательный синхронный канал связи (стандарт SPI) микроконтроллер управляет работой и принимает данные от АЦП, передает данные на ЦАП. Для обеспечения синхронности получаемых по всем каналам отсчетов обращение ко всем модулям преобразователей производится одновременно.

Алгоритм работы устройства состоит в следующем. При включении питания выполняется внутренняя калибровка АЦП, микроконтроллер инициализирует АЦП на автоматический перезапуск, устанавливает скорость 150 преобразований/с и подключает первый канал входного

мультиплексора в каждом из модулей АЦП. После прихода сигнала окончания преобразования из первого модуля АЦП схема управления считывает данные из буферных регистров всех АЦП во внутреннюю память микроконтроллера. Затем из полученных данных формируется шестнадцатибайтовая посылка, которая со скоростью 115200 бод передается через последовательный интерфейс в компьютер [4]. В каждый байт посылки включен признак канала: число в двух старших битах соответствует номеру модуля АЦП, с которого получены данные.

Для управления устройством предусмотрены следующие возможности: выбор скорости преобразования из набора 10; 25; 50; 75; 100; 150; 171,4286; 250 Гц; установка номера опрашиваемого канала (0, 1); установка напряжения на выходе ЦАП; перезапуск и синхронизация АЦП.

Управление осуществляется подачей управляющего слова из компьютера в дуплексном режиме.

Испытания устройства сбора данных проводились с помощью программы, разработанной для регистрации спектров низкочастотных сигналов [2, 3] и адаптированной для приема данных через последовательный порт. Спектры шумов, усредненных в течение 5 мин по реализациям длиной 2048 точек (что соответствует 12 с), при частоте дискретизации 171 Гц и введенных к входам по двум каналам АЦП, показаны на рис. 3.

Можно видеть, что спектр шума практически постоянен в области от 0 до ~25 Гц и далее равномерно нарастает с частотой. Характер измеренных спектров объясняется наличием двух источников шума. Во-первых, это частотно-независимые собственные шумы модулятора АЦП, которые преобладают в области нижних частот. С повышением частоты увеличиваются и становятся преобладающими шумы квантования в используемых микросхемах сигма-дельта АЦП [5]. В спектрах также присутствует ряд узкополосных пиков, связанных, по видимому, с проникновением сигналов кварцевых тактовых генераторов АЦП, незначительно различающихся по частоте (пики в районе 80 Гц), а также других цифровых сигналов (пики в низкочастотной области спектров).

Результаты сравнения шумовых параметров, полученных в разработанной системе сбора данных для различных скоростей преобразования, с анонсированными параметрами микросхемы AD7714 [5] приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Анализ эффективности использования
микросхемы AD7714 на различных
скоростях преобразования сигнала**

| Частота дискретизации, Гц | Характеристики AD7714 | | Результаты измерений | |
|---------------------------|-----------------------------|--|--|--|
| | Эффективное разрешение, бит | Среднеквадратичное отклонение шумов, бит (мкВ) | Среднеквадратичное отклонение шумов, бит | Максимальный размах напряжения шума, бит |
| 10 | 21,5 | 6 (0,78) | 17 | 110 |
| 25 | 21 | 9 (1,1) | 21 | 115 |
| 50 | 20 | 16 (2,06) | 20 | 130 |
| 75 | | | 34 | 230 |
| 100 | 18,5 | 46 (5,9) | 44 | 290 |
| 150 | | | 151 | 930 |
| 171 | | | 230 | 1335 |
| 250 | 15,5 | 453 (58) | 396 | 2619 |

Из результатов проведенного анализа следует, что при низких частотах дискретизации шумов в 2...3 раза превышают анонсированные данные, тогда как для частот выше 50 Гц наблюдается достаточно хорошее совпадение шумовых параметров системы с параметрами использованных микросхем АЦП.

**Результаты исследования измерительной
компьютеризированной системы**

Описанное в предыдущем разделе устройство сбора аналоговых данных было использовано в системе регистрации естественного электромагнитного поля в диапазоне сверхнизких частот (с.н.ч.) – Шумановских резонансов. Шумановские резонансы несут информацию как о свойствах полости, образованной поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы, так и об источниках с.н.ч.-излучения – молниях, и представляют интерес как индикатор глобальных изменений окружающей среды [6, 7].

Задача измерения Шумановских резонансов включает две стороны, отражающие спектральное и временное представления сигналов. Это накопление средних спектров фонового сигнала, формируемого совокупностью молниевых разрядов, происходящих на Земле, и выделение всплесков с.н.ч. – сигналов, порождаемых дальними сверхмощными молниями и превы-

шающих амплитуду фона в 3...10 раз. Одной из основных помех для измерений является излучение гармоник силовой сети 50, 100 Гц и т.д., амплитуда которых превышает уровень естественного сигнала на 40...70 дБ.

При таком соотношении уровней полезного сигнала и сигнала помехи даже при использовании АЦП высокой разрядности «крылья» от сигнала узкополосных помех могут существенно исказить спектр измеряемого сигнала. Данная ситуация продемонстрирована на рис. 3, на котором приведены спектры с применением компенсации сигналов частотой 50 Гц (график выполнен сплошной жирной линией) и без нее (график выполнен штрихом). По оси ординат отложена вертикальная составляющая электрического поля Земли. Измерение горизонтальной компоненты электрического поля не выполнялось, поскольку ее значения малы в сравнении с вертикальной.

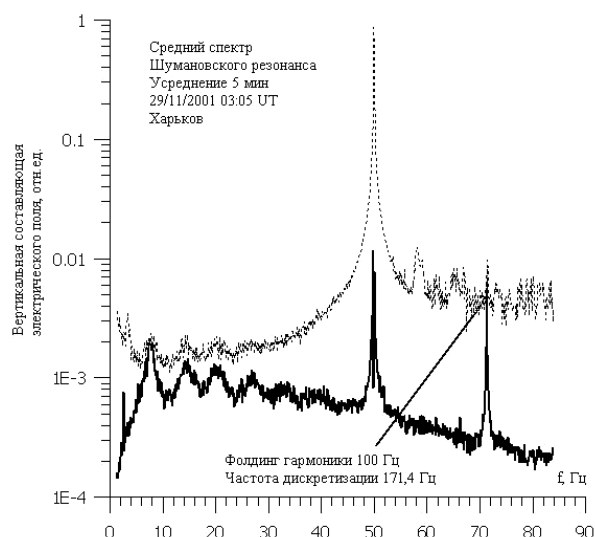


Рис. 3. Результаты спектрального анализа сигнала Шумановского резонанса с использованием компенсации помехи частотой 50 Гц и без нее

Из рис. 3 видно, что на частоте 71,4 Гц наблюдается фолдинг сигнала помехи частотой 100 Гц – перенос (зеркальное отображение) сигналов частотой большей половины частоты дискретизации 85,7 Гц. Резонансные пики на частотах 8, 14, 20, 26, 32, 39 Гц представляют собой Шумановские резонансы.

Эффект использования предложенной методики компенсации для выделения импульсных сигналов (всплесков с.н.ч.) на фоне узкополосных помех представлен на рис. 4. Как можно видеть, эффективность подавления достаточно высока при условии неизменности параметров помех на интервале анализируемых временных реализаций.

К недостатку методики можно отнести ее чувствительность к скачкам фазы и амплитуды сигнала помехи.

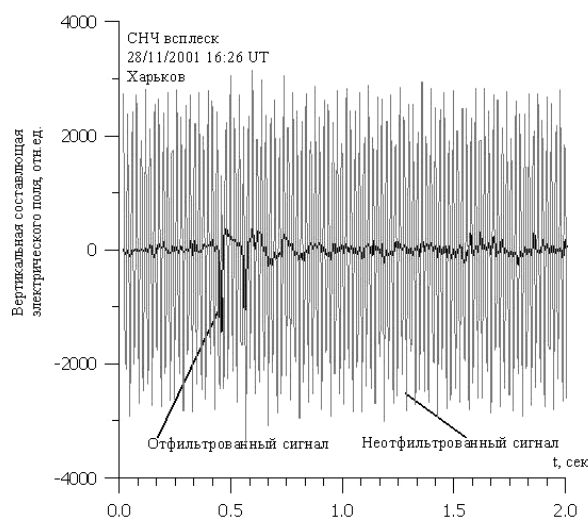


Рис. 4. Выделение импульсного сигнала на фоне сильной сетевой узкополосной помехи

Данная проблема может быть сведена к минимуму путем разбиения полного интервала на более короткие участки и последующего выполнения компенсации для каждого из них. Следует отметить, что преимущество предложенной компенсационной методики фильтрации заключается в отсутствии искажений спектров, получаемых вследствие их умножения на соответствующие передаточные характеристики при использовании традиционных фильтров, а также ее применимость для выделения сигналов, как во временной, так и в частотной области.

Выводы

В заключение перечислим основные результаты работы.

Разработана мобильная многоканальная система автоматизированного сбора и анализа низкочастотных импульсных сигналов при наличии в нем мощных узкополосных помех.

Разработан компенсационный алгоритм фильтрации узкополосных помех, позволяющий устранить влияние их «крыльев» на форму спектров анализируемых слабых сигналов, а также выделять импульсные сигналы во временной области. Фильтрация узкополосных помех основана на использовании АЦП с высо-

ким разрешением, позволяющего охватить динамический диапазон сигнала и помехи.

Работа системы продемонстрирована на примере регистрации естественных электромагнитных импульсных сигналов, возбуждаемых совокупностью происходящих на Земле молний, в полости Земля-ионосфера в диапазоне сверхнизких частот (Шумановских резонансов).

Разработанная методика реализована и протестирована в системе сбора данных естественных радиоизлучений в диапазоне сверхнизких частот. Измерения проводились с помощью датчиков вертикального электрического поля и датчиков горизонтальных магнитных компонент в полевых условиях. Применение методики позволило накопить банки данных импульсных сигналов естественного происхождения в условиях мощных узкополосных помех от окружающих пункт наблюдений воздушных линий электропередач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щекотов, А. Ю. Следящий режекторный фильтр на частоту сети и ее гармоники [Текст] / А. Ю. Щекотов, А. М. Голявин // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 4. – С. 175.
2. Наблюдения за движением мировой грозовой активности по анализу трехкомпонентных измерений Шумановских резонансов [Текст] / Г. Г. Беляев и др. // Радиофизика и электроника. – 1999. – Т. 4, № 1. – С. 63.
3. Schumann resonance observed live the Poynting vector spectra [Текст] / G. G. Belyaev *et al.* // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. – 1999. – V. 61. – P. 751.
4. Новиков, Ю. В. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC [Текст] / Ю. В. Новиков, О. А. Калашников, С. Е. Гуляев. – М.: Эком, 1997. – 215 с.
5. 1999 Design – In Reference Manual [Text] / Analog Device Inc. – USA, 1999. – 11 p.
6. Блюх, П. В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера [Текст] / П. В. Блюх, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. – К.: Наук. думка, 1977. – 200 с.
7. Williams, E. R. The Schumann Resonance: A global tropical thermometer [Text] / E. R. Williams // Science. – 1992. – V. 256. – P. 1184-1187.

Поступила в редколлегию 18.03.2010.

Принята к печати 24.03.2010.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Розроблено метод вирішення задачі оптимізації режиму розформування составу, що дозволяє врахувати багаторазові розділення його відцепів.

Разработан метод решения задачи оптимизации режима расформирования состава, позволяющий учесть многократные разделения его отцепов.

A method of solving the optimization problem for the mode of breaking up a train, allowing to take into account multiple divisions of its cuts, is developed.

Выбор режима расформирования составов в значительной степени влияет на качество сортировочного процесса на сортировочных горках. Оптимальное управление роспуском состава предполагает определение таких режимов торможения (РТ) его отцепов, при которых обеспечиваются наилучшие условия их разделения на стрелках, а также выполняются требования прицельного регулирования скорости. Задаче оптимизации режима расформирования составов посвящен целый ряд научных работ [1–4], в которых предложены различные критерии оптимальности и методы ее решения.

Решение задачи оптимизации РТ отцепов состава в нелинейной постановке было получено в [1]. Для решения использовались методы прямого поиска – комплексный метод Бокса и метод случайного поиска. В качестве целевой функции был выбран минимальный интервал δt между отцепами состава на разделительных стрелках

$$f = \min \{ \delta t_i = t_{oi} + t_{i+1}(q_{i+1}) - \tau_i(q_i) \},$$

$$i = 1, \dots, n - 1, \quad (1)$$

где q_i, q_{i+1} – параметры, характеризующие РТ, соответственно, i -го и $(i+1)$ -го отцепов.

При этом в результате оптимизации находят такой режим расформирования состава $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, при котором $f \rightarrow \max$.

В работе [2] для решения задачи оптимизации РТ отцепов используются градиентные методы (метод Фиакко и Мак-Кормика, а также метод допустимых направлений). В этой связи сформулированная в [1] задача оптимизации была преобразована в гладкую путем введения дополнительной переменной, имеющей смысл нижней границы для всех δt_i (1); последние в

этом случае переходят в ограничения.

Основным недостатком методов [1, 2] является то, что в них максимизируется один (минимальный) интервал δt между отцепами всего состава, однако не оптимизируется распределение интервалов в других его частях.

Ликвидировать указанный недостаток позволяет многошаговый двухэтапный метод оптимизации РТ отцепов состава, основанный на идеях динамического программирования [3]. Метод позволяет максимизировать не только минимальный интервал δt_{\min} , но и ряд других, близких к нему интервалов $\delta t_i > \delta t_{\min}$ за счет выравнивания их величин с интервалами в смежных парах отцепов состава. Поиск оптимального режима расформирования состава осуществляется в два этапа, на первом из которых выполняется условная оптимизация, а на втором – безусловная. Однако данный метод является достаточно громоздким и не всегда обеспечивает необходимую точность решения, поскольку целевая функция в данной задаче является негладкой.

Итерационный метод оптимизации, предложенный в [4], позволяет решить задачу поиска таких РТ, при которых максимизируется не только минимальный интервал в составе, но и интервалы между отцепами в неблагоприятных группах за счет некоторого их уменьшения в соседних более благоприятных группах. Данный метод основан на локальной оптимизации РТ среднего отцепа критической группы из трех смежных отцепов состава. Выбор критической группы на очередной итерации определяется максимальной абсолютной величиной разности интервалов на разделительных стрелках в двух парах смежных отцепов, определяемой для всех групп состава.

Следует отметить, что при оптимизации РТ в [1–4] учитываются интервалы разделения только между смежными отцепами состава. Между тем, как показали исследования [5, 6], при роспуске составов в процессах разделения на стрелках участвуют не только смежные отцепы, но и отцепы, разделенные в составе одним или несколькими другими отцепами (несмежные отцепы). При этом установлено [5], что при определенных РТ интервалы на разделительных стрелках между несмежными отцепами могут оказаться меньше допустимых. Как показали исследования [6], число разделений несмежных отцепов (вторичных разделений) при расформировании достаточно длинных составов может даже превышать число разделений смежных отцепов и поэтому их необходимо учитывать при решении задач, направленных на повышение качества интервального регулирования на горках.

Недостатком рассмотренных работ [1–4] является и то, что в них при решении задачи оптимизации РТ моделирование торможения отцепов осуществляется при равномерном распределении погашаемой энергетической высоты во всей зоне действия тормозной позиции. Это не вполне соответствует реальному процессу торможения, который может осуществляться лишь в некоторой части указанной зоны, что приводит к изменению времени скатывания отцепов и влияет на рассчитанную величину интервалов на разделительных элементах [7]. Поэтому в данной статье разработана новая методика оптимизации режима расформирования состава, позволяющая учесть многократные разделения его отцепов на стрелках и использующая адекватную модель торможения отцепов.

Все множество разделений отцепов состава может быть представлено верхней треугольной матрицей $\|\sigma\|$ номеров разделительных стрелок [6], строкам и столбцам которой поставлены в соответствие номера путей назначения W_i последовательности n отцепов состава (рис. 1). Элементами σ_{ij} матрицы ($i < j$) являются номера стрелочных позиций, на которых разделяются маршруты i -го и j -го отцепов, следующих, соответственно, на пути W_i и W_j . В каждой строке и в каждом столбце матрицы $\|\sigma\|$ может быть не более N ненулевых элементов $\sigma_{ij} \neq 0$. Методика, позволяющая определить все элементы матрицы номеров стрелок $\|\sigma\|$ для расформируемого состава, приведена в [6].

| | W_1 | W_2 | W_3 | ... | W_{n-1} | W_n |
|-----------|-------|---------------|---------------|-----|------------------|------------------|
| W_1 | 0 | σ_{12} | σ_{13} | ... | $\sigma_{1,n-1}$ | $\sigma_{1,n}$ |
| W_2 | | 0 | σ_{23} | ... | $\sigma_{2,n-1}$ | $\sigma_{2,n}$ |
| W_3 | | | 0 | ... | $\sigma_{3,n-1}$ | $\sigma_{3,n}$ |
| ... | | | | ... | ... | ... |
| W_{n-1} | | | | | 0 | $\sigma_{n-1,n}$ |
| W_n | | | | | | 0 |

Рис. 1. Верхняя треугольная матрица номеров разделительных стрелок отцепов состава

Главные диагональные элементы матрицы $\sigma_{ij} = 0$. Элементы диагонали, смежной с главной, $\sigma_{i,i+1} \neq 0$, $i = 1, \dots, n-1$, определяют номера стрелок разделения последовательности смежных отцепов состава. Остальные ненулевые элементы матрицы представляют номера стрелок множества вторичных разделений отцепов данного состава

Задачей оптимизации режима расформирования состава для повышения качества интервального регулирования скорости является максимизация интервалов на стрелках между всеми парами разделяющихся отцепов состава. Поэтому в качестве критерия оптимизации целесообразно использовать вектор интервалов между отцепами состава, построенный с учетом многократных разделений каждого из них.

$$\delta t = (\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_c) \rightarrow \max \quad (2)$$

где c – общее число разделений отцепов в составе с учетом вторичных.

Каждый интервал δt_i в (2) можно рассматривать как частный критерий; при этом, исходя из особенностей задачи интервального регулирования, все частные критерии δt_i следует считать равнозначными, поскольку между ними количественно не определяются отношения предпочтения. Кроме того, частные критерии δt_i являются однородными, поскольку они имеют одинаковую размерность.

Управление процессом расформирования состава, которое определяет значение вектора δt и, следовательно, качество интервального регулирования, может быть представлено вектором РТ n отцепов состава:

$$\mathbf{R} = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n\} \quad (3)$$

При этом, режим торможения отдельного отцепка состава \mathbf{r}_i характеризуется векторами скоростей \mathbf{U} выхода отцепка из ТП и условных координат \mathbf{x} точек начала торможения на ТП [7]:

$$\mathbf{r}_i = (U_i, \mathbf{x}_i)$$

$$U_i = (U'_i, U''_i), \quad U_i \in \Omega_i$$

$$\mathbf{x}_i = (x'_i, x''_i), \quad x'_i \in [0, 1], \quad x''_i \in [0, 1], \quad (4)$$

где U'_i, U''_i – скорости выхода отцепа, соответственно, из ВТП и СТП;

x'_i, x''_i – условные координаты точек начала торможения отцепа на ВТП и СТП.

Такое представление режима \mathbf{r}_i позволяет корректировать выбор зоны торможения отцепа на ТП для поиска наилучших условий его разделения с другими отцепами состава.

Для учета взаимосвязи между интервальным и прицельным регулированием скорости отцепов, а также существующих ограничений скорости их скатывания при выборе режимов торможения \mathbf{r}_i контролируется принадлежность вектора U_i области Ω_i допустимых скоростей выхода отцепа из ВТП и СТП [8]. Указанные области должны быть определены для каждого отцепа состава и являются ее ограничениями.

В результате решения задачи оптимизации необходимо найти такой режим расформирования состава \mathbf{R}^* (3), при котором вектор интервалов (2) максимален:

$$\delta \mathbf{t}_{\max} = \max \{ \delta \mathbf{t} (\mathbf{R}^*) \}.$$

При этом, как показывает анализ, получить подобное решение не представляется возможным, поскольку интервалы δt_i в (2) не являются независимыми. Действительно, изменение режима торможения некоторого отцепа приводит к изменению значений соответствующего множества интервалов δt_i вектора $\delta \mathbf{t}$. При этом изменяются те интервалы, с которыми данный отцеп имеет разделения на стрелках, в т.ч. вторичные. В этой связи очевидна необходимость контроля всех указанных интервалов в процессе решения задачи оптимизации. С этой целью при выборе РТ i -го отцепа необходимо рассматривать кортеж всех отцепов состава, разделяющихся с этим отцепом (рис. 2). В данный кортеж, кроме управляемого i -го отцепа и смежных с ним отцепов с номерами $p_1 = i-1$ и $q_1 = i+1$, необходимо включить все разделяющиеся с i -м отцепы с номерами p_2, \dots, p_N , расположенные в составе до него ($p_N < \dots < p_1 = i-1$), а также отцепы с номерами q_2, \dots, q_N , расположенные после него ($q_1 = i+1 < \dots < q_N$); здесь N – число стрелочных позиций на горке.

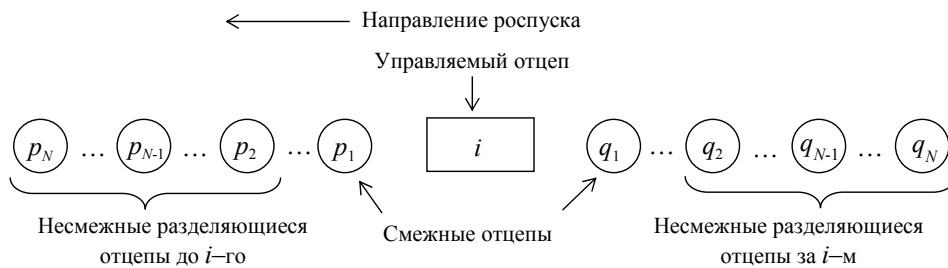


Рис. 2. Схема кортежа управляемого отцепа

Число отцепов в кортеже зависит от комбинации их назначений в составе и от конструкции горочной горловины; максимальное число разделяющихся отцепов, расположенных до и после управляемого отцепа, равняется $2N$.

Состав кортежа i -го отцепа может быть однозначно определен по данным матрицы $\|\sigma\|$ номеров разделительных стрелок отцепов состава (см. рис. 1). При этом номера p_m отцепов, находящихся до i -го отцепа, соответствуют ненулевым значениям σ_{ij} , расположенным в i -м столбце матрицы выше i -го диагонального элемента $\sigma_{ii} = 0$:

$$p_m = \{ k | \sigma_{ki} \neq 0, \quad m = 1, \dots, N, \quad k = i-1, \dots, 1 \}.$$

Номера q_l отцепов, находящихся за i -м отце-

пом, соответствуют ненулевым значениям σ_{ij} , расположенным в i -й строке матрицы правее i -го диагонального элемента $\sigma_{ii} = 0$:

$$q_l = \{ j | \sigma_{ij} \neq 0, \quad l = 1, \dots, N, \quad j = i+1, \dots, n \}.$$

Тогда частным критерием оптимальности режима торможения i -го отцепа, определяемым при фиксированных режимах всех разделяющихся с ним отцепов, будет абсолютная величина разности минимальных интервалов с отцепами, расположенными в составе до и после i -го:

$$\Delta t_i(\mathbf{r}_i) = \left| \min \{ \delta t_{p_1, i}, \dots, \delta t_{p_N, i} \} - \min \{ \delta t_{i, q_1}, \dots, \delta t_{i, q_N} \} \right| \rightarrow \rightarrow \min. \quad (5)$$

Интервалы $\delta t_{p,i}$ и $\delta t_{i,q}$ на стрелках $\sigma_{p,i}$ разделения i -го отцепа с отцепами p_m , расположенными до i -го, и, соответственно, на стрелках $\sigma_{i,q}$ разделения i -го с отцепами q_l , расположенными после i -го, определяются как

$$\begin{aligned}\delta t_{p,i}(\mathbf{r}_i) &= t_{0,(p,i)} + t_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{p,i}) - \tau_p(\sigma_{p,i}); \\ \delta t_{i,q}(\mathbf{r}_i) &= t_{0,(i,q)} + t_q(\sigma_{i,q}) - \tau_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{i,q}),\end{aligned}$$

где $t_{0,(p,i)}$, $t_{0,(i,q)}$ – начальные интервалы на вершине горки между i -м отцепом и отцепами p_m и q_l , входящими в кортеж;

$t_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{p,i})$, $\tau_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{i,q})$ – время скатывания i -го отцепа от момента отрыва до момента, соответственно, занятия изолированного участка (ИЗУ) разделительной стрелки $\sigma_{p,i}$ и освобождения стрелки $\sigma_{i,q}$;

$\tau_p(\sigma_{p,i})$ – время скатывания отцепа p_m от момента отрыва до момента освобождения ИЗУ разделительной стрелки $\sigma_{p,i}$;

$t_q(\sigma_{i,q})$ – то же, отцепа q_l до занятия ИЗУ стрелки $\sigma_{i,q}$.

Величины $t_{0,(p,i)}$ и $t_{0,(i,q)}$ определяются суммированием начальных интервалов между соответствующими смежными отцепами:

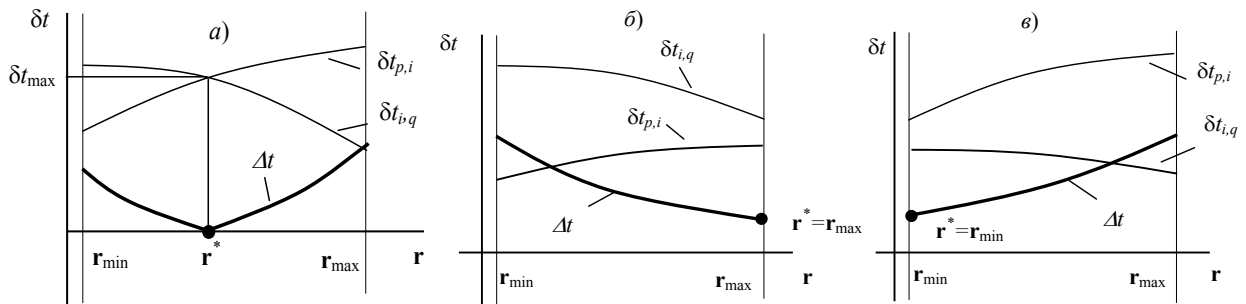


Рис. 3. Оптимизация режима торможения управляемого отцепа при использовании частного критерия Δt

Используя приведенный частный критерий Δt_i для отдельных отцепов, целевую функцию для оптимизации режима расформирования состава можно представить как

$$\Delta \mathbf{T} = \{\Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_{n-1}\} \rightarrow \min. \quad (6)$$

В данном векторе все компоненты Δt_i связаны с соответствующими отцепами $\overline{2, n-1}$ и упорядочены по их расположению в составе. При этом первый отцеп не входит в (6), поскольку в составе отсутствуют разделяющиеся с ним предшествующие отцепы. Поэтому для создания наилучших условий разделения всем последующим отцепам первому отцепу уста-

$$t_{0,(p,i)} = \sum_{j=p}^{i-1} t_{0,j}, \quad t_{0,(i,q)} = \sum_{j=i}^{q-1} t_{0,j}.$$

Очевидно, что оптимальным при фиксированных режимах скатывания всех отцепов кортежа, кроме управляемого, будет такой режим торможения \mathbf{r}_i^* , при котором $\Delta t_i(\mathbf{r}_i^*) = 0$. Действительно, как видно из рис. 3, любое отклонение \mathbf{r}_i от оптимального значения \mathbf{r}_i^* приводит к уменьшению одного из интервалов $\delta t_{p,i}$ или $\delta t_{i,q}$ по сравнению с их максимальными значениями δt_{\max} при $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i^*$.

Если же функция $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ не имеет нулевого значения в интервале $[\mathbf{r}_{i,\min}, \mathbf{r}_{i,\max}]$ (рис. 3, б, в), то в этом случае в качестве оптимального РТ \mathbf{r}_i^* принимается соответствующее граничное значение \mathbf{r}_i , при котором $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ минимально. Так, если в области изменения \mathbf{r}_i функция $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ убывает (рис. 3, б), то в качестве оптимального для i -го отцепа устанавливается медленный режим $\mathbf{r}_i^* = \mathbf{r}_{i,\max}$; если же функция $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ возрастает (рис. 3, в), то оптимальным для i -го отцепа является быстрый режим $\mathbf{r}_i^* = \mathbf{r}_{i,\min}$.

устанавливается быстрый режим скатывания $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_{1,\min}$. По той же причине в (6) не включен последний отцеп, который не имеет следующих за ним разделяющихся отцепов; для этого отцепа установлен медленный режим $\mathbf{r}_n = \mathbf{r}_{n,\max}$.

Как показывает анализ, предложенный векторный критерий (6) является более предпочтительным для решения поставленной задачи, чем рассмотренный ранее (2). Действительно, вектор $\Delta \mathbf{T}$ (6) имеет однозначную связь с вектором РТ отцепов состава \mathbf{R} (3), поскольку каждому управляемому параметру $\mathbf{r}_i \in \mathbf{R}$ (режим торможения i -го отцепа) соответствует компонента Δt_i вектора $\Delta \mathbf{T}$. Наличие подобной связи существенно упрощает определение РТ для управ-

ляемого отцепа, и поэтому задача выбора режима расформирования состава была формализована как задача оптимизации с векторным критерием ΔT (6).

В настоящее время существует достаточно большое число методов решения задач векторной оптимизации, выбор которых существенно зависит от особенностей задачи. При разработке методов решения многокритериальных задач возникают проблемы, связанные с выбором принципа оптимальности, определяющего свойства оптимального решения и его преимущества перед остальными допустимыми решениями.

В рассматриваемой задаче оптимизации режима расформирования состава оптимальным решением является такая совокупность РТ его отцепов (вектор \mathbf{R}^*), при которой общий ресурс времени для разделения отцепов на стрелках максимален и наилучшим образом распределен между всеми парами отцепов состава. При этом наилучшим является такое распределение ресурса, при котором в неблагоприятных по условиям разделения группах отцепов состава интервалы между ними максимизированы за счет некоторого уменьшения интервалов в благоприятных группах.

Для решения векторных задач оптимизации достаточно широко используют методы, в которых частные критерии должны быть упорядочены по важности [9]. При этом, отношение предпочтения между критериями устанавливается до начала оптимизации и в процессе решения не изменяется.

В то же время в данной задаче частные критерии Δt_i целевой функции ΔT (6) имеют переменный приоритет, т.к. на каждом этапе оптимизации целесообразно отдавать предпочтение критерию Δt_i максимальной величины. Действительно, оптимизация РТ i -го управляемого отцепа позволит минимизировать наибольшую разность Δt_i интервалов на стрелках между разделяющимися отцепами всего состава, что существенно ускорит процесс решения задачи. Таким образом, необходимо в процессе решения задачи минимизации вектора ΔT корректировать степень важности всех входящих в него частных критериев Δt_i .

В общем виде метод решения задачи оптимизации режима расформирования состава можно представить в виде следующей итеративной схемы.

Шаг 1. Упорядочить частные критерии Δt_i вектора ΔT по убыванию. В полученном векто-

ре $\Delta T'$ все частные критерии $\Delta t_{z_j}^{(j)}$ строго ранжированы по важности:

$$\Delta T' = \left\{ \Delta t_{z_j}^{(j)} \right\}, \quad \overline{j = 1, n - 2},$$

$$\Delta t_{z_1}^{(1)} > \Delta t_{z_2}^{(2)} > \dots > \Delta t_{z_j}^{(j)} > \dots > \Delta t_{z_{n-2}}^{(n-2)}.$$

где z_j – номер отцепа, у которого разность минимальных интервалов $\Delta t_{z_j}^{(j)}$ (5) имеет j -й ранг ($z_j \in [2, n - 1]$).

Шаг 2. Выбрать отцеп z_j для оптимизации РТ. Номер отцепа z_j определяется по частному критерию $\Delta t_{z_j}^{(j)}$, имеющему максимальный ранг. Оптимизация РТ отцепа z_j возможна в том случае, если для выбранных в (5) минимальных интервалов $\delta t_{p,i}$ и $\delta t_{i,q}$, $i=z_j$, выполняется условие:

$$(\delta t_{p,i} < \delta t_{i,q} \wedge \mathbf{r}_i < \mathbf{r}_{i,\max}) \vee (\delta t_{p,i} > \delta t_{i,q} \wedge \mathbf{r}_i > \mathbf{r}_{i,\min}). \quad (7)$$

Если данное условие не выполняется, то это означает, что для отцепа z_j установлен один из двух предельных режимов торможения (см. рис. 3, б, в), который не может быть изменен. В этом случае осуществляется переход к следующему по рангу частному критерию $\Delta t_{z_{j+1}}^{(j+1)}$ и выполняется проверка условия (7) для отцепа z_{j+1} .

Процедура выбора начинается с отцепа z_1 и продолжается до тех пор, пока для очередного отцепа z_j не будет выполнено условие (7).

В случае, если условие (7) не выполняется и для отцепа z_{n-2} , то это означает, что все отцепы состава имеют экстремальные режимы скатывания, которые не могут быть изменены, поэтому оптимизация режима расформирования данного состава прекращается.

Шаг 3. Выполнить проверку величины частного критерия $\Delta t_{z_j}^{(j)}$ для выбранного отцепа z_j .

Если $\Delta t_{z_j}^{(j)} < \varepsilon$, то оптимизация режима расформирования данного состава прекращается. При этом необходимая точность определения режима расформирования ε определяется целью решения задачи и должна быть задана до его начала.

Шаг 4. Выполнить оптимизацию РТ выбранного отцепа z_j для обеспечения минимума частного критерия $\Delta t_{z_j}^{(j)}$.

Шаг 5. Рассчитать новые значения частных критериев Δt_i вектора ΔT и выполнить переход к шагу 1.

На базе предложенного метода было разработано программное обеспечение, позволяющее решить задачу оптимизации режима интервального регулирования скатывающихся отцепов для расформируемого состава. Решение задачи осуществляется с использованием имитационного моделирования процесса роспуска составов. В указанной модели для каждого отцепа осуществляется выбор области допустимых скоростей выхода из ТП. При выборе оптимального режима торможения предусмотрена возможность варьирования зон торможения отцепов на тормозных позициях спускной части горки [7].

Выполненный анализ результатов оптимизации режимов расформирования группы составов показал достаточно высокую эффективность разработанного метода, который, таким образом, может быть рекомендован для расчета скоростей выхода отцепов из тормозных позиций при создании автоматизированной системы управления роспуском составов на горках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобровский, В. И. Поиск оптимальных режимов торможения на проектируемых сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – №5. – С. 50-54.
2. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский // Транспорт: Зб. наук. пр. – Д.: Арт-Пресс, 2000. – С. 43-47.
3. Бобровский, В. И. Многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов роспуска составов на горках [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2004. – № 2. – С. 8-14.
4. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках [Текст] / В. И. Бобровский, Н. В. Рогов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 4. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2004. – С. 174-182.
5. Бобровский, В. И. Вероятностные характеристики разделений отцепов состава на стрелках [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Ю. В. Чибисов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 18. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 146-150.
6. Бобровский, В. И. Статистический анализ числа разделений отцепов на стрелках при расформировании составов [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Л. О. Ефимова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 20. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 13-19.
7. Бобровский, В. И. Вплив режимів гальмування на тривалість скочування відцепів з гірки [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Л. О. Єльнікова // Зб. наук. праць. – Х.: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 102. – С. 147-156.
8. Бобровский, В. И. Ограничения режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора, А. В. Кудряшов, Л. О. Ельнікова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 30-35.
9. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В. Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2002. – 144 с.

Поступила в редколлегию 12.04.2010.

Принята к печати 15.04.2010.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОПЕРАТИВНОГО ФОРМУВАННЯ ДВОГРУПНИХ ПОЇЗДІВ НА ОКРЕМІ ПОКАЗНИКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Виконано дослідження оперативного керування організацією вагонопотоків у поїзди на залізничному напрямку. Обґрунтовано доцільність впровадження раціонального поєднання формування одногрупних та двогрупних поїздів з метою прискорення доставки вантажів. Умовою для прийняття рішення щодо визначення категорії окремого поїзда запропоновано величину періоду планування. Визначено економічний ефект від впровадження оперативного керування.

Выполнено исследование оперативного управления организацией вагонопотоков в поезда на железнодорожном направлении. Обоснована целесообразность внедрения рационального сочетания формирования одногруппных и двухгруппных поездов с целью ускорения доставки грузов. Условием для принятия решения по определению категории отдельного поезда предложена величина периода планирования. Определен экономический эффект от внедрения оперативного управления.

The research of operative management by the organization of wagon flows in trains on a railway direction is executed. It is proved the expediency of introduction of a rational combination of formation of single-unit trains and two-unit trains with the purpose of acceleration of delivery of cargoes. The duration of planning period is offered as a condition for decision-making on determination of category of a separate train. The economic effect of introduction of operative management is obtained.

Перевізний процес на залізничному транспорті України базується на системі організації вагонопотоків у поїзди, яка передбачає щорічну розробку нормативного плану формування поїздів (ПФП). Діючі «Інструктивні вказівки з організації вагонопотоків на залізницях України» [1] зазначають, що раціональний ПФП повинен забезпечувати:

- зниження витрат залізниць, пов'язаних, крім іншого, з простоями вагонів на технічних станціях;
- підвищення прибутків, в т.ч. за рахунок ліквідації штрафних виплат за невиконання термінів доставки вантажів.

Удосконалення системи організації вагонопотоків є найбільш пріоритетним напрямком підвищення ефективності роботи залізничного транспорту в сучасних умовах функціонування.

Розробка плану формування ґрунтується на побудові економіко-математичних моделей і пошуку оптимального варіанту організації вагонопотоків різними математичними методами. Рішення цієї задачі доводиться виконувати в умовах значної сезонної, міждодової і внутрішньододової нерівномірності вагонопотоків [2, 3].

Для дослідження впливу нерівномірності надходження вагонів на величину вагоно-годин накопичення одногрупних составів для однієї з найбільших технічних станцій Укрзалізниці було виконано обробку накопичувальних відомостей при різній потужності вагонопотоків

(від 118 до 272 ваг/добу). Для прикладу на рис. 1 наведено гістограму розподілу вагоно-годин накопиченням одногрупних составів на окреме призначення середньою потужністю $N = 200$ ваг/добу.

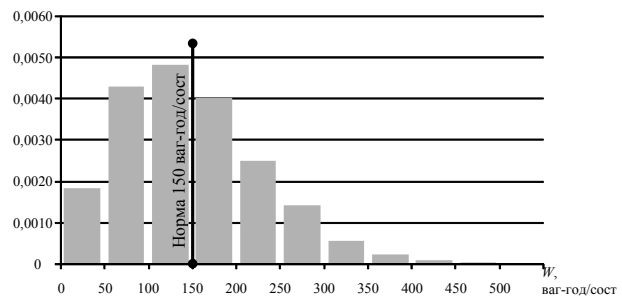


Рис. 1. Розподіл вагоно-годин простою під накопиченням окремого состава

Теоретично середню величину (норму) вагоно-годин накопичення одного одногрупного состава можна визначити як

$$W_n = \frac{cm}{n}, \quad (1)$$

де c – параметр накопичення;

m – кількість вагонів у складі поїзда;

n – кількість сформованих составів за добу.

Для окремого призначення з параметрами $N = 200$ ваг/добу, $m = 50$ ваг., $c = 12$ в середньому за добу формується $n = 4$ состави. При цьому норма вагоно-годин накопичення одного одногрупного состава становить

$$W_n = \frac{12 \cdot 50}{4} = 150 \text{ ваг-год},$$

а середня тривалість простою одного вагона під накопиченням дорівнює

$$t_n = \frac{W_n}{m} = \frac{150}{50} = 3,0 \text{ год.}$$

З рис. 1 видно, що досить велика частина составів (більше 43 %) перевищує розрахункову норму. Така ж картина спостерігається і для інших призначень, де перевищення розрахункової норми накопичення окремого составу складає від 42 до 49 %. Для виконання завдань раціонального ПФП необхідно розробити заходи щодо скорочення вагоно-годин і тривалості накопичення составів.

Одним із можливих заходів є оперативне формування двогрупних поїздів в межах існуючого ПФП [4–6]. При цьому існуючий ПФП не порушується, тільки в залежності від конкретних умов функціонування станції оперативно вирішується питання про доцільність формування окремого двогрупного состава з вагонів двох попутних призначень. Інструктивні вказівки [1] містять методику визначення ефективності формування групових поїздів. Критерієм прийняття рішення про формування на технічній станції (головній) групових составів є витрати, які пов'язані з накопиченням, формуванням та просуванням поїздів на головній та попутних станціях залізничного напрямку.

На рис. 2 наведено графічну формалізацію організації вагонопотоків при формуванні одногрупних (варіант 1) або двогрупних (варіант 2) поїздів на умовному напрямку з трьома технічними станціями і наступними параметрами призначень:

N_{AB}, N_{BC}, N_{AC} – розміри вагонопотоків;

$K_{AB1}, K_{AC1}, K_{BC1}$ – кількість одногрупних поїздів;

K_{AB2} – кількість двогрупних поїздів.

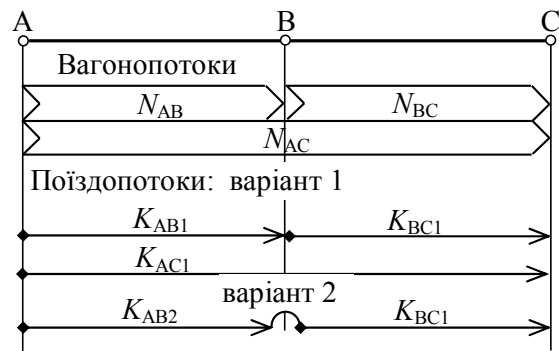


Рис. 2. Графічна формалізація організації вагонопотоків на напрямку

При формуванні на головній станції A одногрупних або двогрупних поїздів на цій і попутній станції B будуть змінюватися показники експлуатаційної роботи, а саме:

- вагоно-години накопичення, формування, причеплення, відчеплення, розформування вагонів $\sum Nt$;
- обсяг маневрової роботи з формування, з'єднання, причеплення, відчеплення і розформування вагонів $\sum Mt_{\text{ман}}$;
- тривалість простою поїзних локомотивів $\sum Mt_{\text{поїзд}}$.

Витрати, пов'язані з наведеними показниками, можуть бути визначені наступним чином:

$$E = e_{\text{вг}} \cdot \sum Nt + e_{\text{мл}} \cdot \sum Mt_{\text{ман}} + e_{\text{пл}} \cdot \sum Mt_{\text{поїзд}}. \quad (2)$$

Розглянемо визначення показників роботи станцій на прикладі полігону $A-B-C$ (див. рис. 2). Найменування позначень елементів і їх числові значення, прийняті для виконання розрахунків, наведено в табл. 1, методику розрахунків (відповідно до [1]) наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Вихідні дані до розрахунків експлуатаційних показників

| Найменування елементів | Позначення | Одиниця виміру | Числове значення |
|--|-----------------|----------------|------------------|
| Параметр накопичення | c | год | 10,8 |
| Кількість вагонів у складі поїзда | m | вагони | 50 |
| Вагонопотік із A призначенням на станцію C | N_{AC} | вагони | 200 |
| Вагонопотік із A призначенням на станцію B (група відчеплення) | N_{AB} | вагони | 200 |
| Вагонопотік із B призначенням на станцію C (причіпна група) | N_{BC} | вагони | 200 |
| Тривалість з'єднання груп вагонів в составі групового поїзду | $t_{\text{зг}}$ | год | 0,2 |
| Тривалість обміну груп в составі групового поїзду | $t_{\text{ог}}$ | год | 0,6 |
| Тривалість простою локомотива від поїзда у розформування | $t_{\text{рф}}$ | год | 3,0 |
| Тривалість простою транзитного одногрупного поїзда на станції B | $t_{\text{тр}}$ | год | 1,2 |
| Витратна ставка на 1 вагоно-годину | $e_{\text{вг}}$ | грн | 3,67 |
| Витратна ставка на 1 локомотиво-годину маневрової роботи | $e_{\text{мл}}$ | грн | 82,1 |
| Витратна ставка на 1 локомотиво-годину поїзних локомотивів | $e_{\text{пл}}$ | грн | 148,8 |

Методика визначення показників варіантів плану формування поїздів

| Станції | Операції | Категорії поїздів | |
|---|---|---|---|
| | | однорупні | двогрупні |
| | | | |
| Вагоно-години | | | |
| A | Накопичення | $2ct$ | |
| | З'єднання груп | - | |
| B | Розформування та формування | $\frac{N_{AB}}{60}(5,12 + 0,48m) + \frac{N_{BC}}{60}(13,56 + 0,044m)$ | $\frac{N_{AB}}{60}(16,12 + 0,52m \frac{N_{AB}}{N_{AC} + N_{AB}})$ |
| | Накопичення | ct | |
| | | $\sum Nt$ | $\sum Nt$ |
| Маневрові локомотиво-години | | | |
| A | З'єднання груп | - | |
| B | Розформування та формування | $\frac{N_{AB}}{60m}(7,68 + 0,48m) + \frac{N_{BC}}{60m}(16,12 + 0,044m)$ | $\frac{N_{AC} + N_{AB}}{60m}(16,12 + 0,52m \frac{N_{AB}}{N_{AC} + N_{AB}})$ |
| | Обмін груп | - | |
| | | $\sum Mt_{ман}$ | $\sum Mt_{ман}$ |
| Локомотиво-години простою поїзних локомотивів | | | |
| B | Тривалість знаходження від прибуття до відправлення | - | |
| | | $\sum Mt_{поїзд}$ | $\sum Mt_{поїзд}$ |

Згідно з прийнятими вихідними даними виконано розрахунки експлуатаційних показників для обох варіантів організації вагонопотоків, результати яких наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Розрахунок показників варіантів плану формування поїздів

| Станції | Операції | Категорії поїздів | |
|---------------|-----------------------------|---|---|
| | | однорупні | двогрупні |
| | | | |
| I | 2 | 3 | 4 |
| Вагоно-години | | | |
| A | Накопичення | $2 \cdot 10,8 \cdot 50 = 1080$ | |
| | З'єднання груп | - | |
| B | Розформування та формування | $\frac{200}{60}(5,12 + 0,48 \cdot 50) + \frac{200}{60}(13,56 + 0,044 \cdot 50) = 149,6$ | $\frac{200}{60}(16,12 + 0,52 \cdot 50 \cdot \frac{200}{200 + 200}) = 97,07$ |
| | Накопичення | $10,8 \cdot 50 = 540$ | |
| | | $\sum Nt$ | $\sum Nt$ |
| | | 1769,6 | 1041,07 |

Таблиця 3 (закінчення)

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|--|--|
| Маневрові локомотиво-години | | | |
| A | З'єднання груп | - | $\frac{200+200}{50} \cdot 0,2 = 1,6$ |
| B | Розформування та формування | $\frac{200}{60 \cdot 50} (7,68 + 0,48 \cdot 50) + \frac{200}{60 \cdot 50} (16,12 + 0,044 \cdot 50) = 3,33$ | $\frac{200+200}{60 \cdot 50} (16,12 + 0,52 \cdot 50 \cdot \frac{200}{200+200}) = 3,88$ |
| | Обмін груп | - | $\frac{200+200}{50} \cdot 0,6 = 4,8$ |
| $\Sigma M_{\text{ман}}$ | | 3,33 | 10,28 |
| Локомотиво-години простою поїзних локомотивів | | | |
| B | Тривалість знаходження від прибуття до відправлення | - | $\frac{200+200}{50} (3,0 - 1,2) = 14,4$ |
| $\Sigma M_{\text{поїзд}}$ | | - | 15,2 |

Витрати на формування одногрупних поїздів складають:

$$E = 3,67 \cdot 1769,6 + 82,1 \cdot 3,33 + 148,8 \cdot 0 = 6767,83 \text{ грн.}$$

Витрати на формування двогрупних поїздів складають:

$$E = 3,67 \cdot 1041,07 + 82,1 \cdot 10,28 + 148,8 \cdot 14,4 = 6807,43 \text{ грн.}$$

Отримані результати показують, що кращим за критерієм витрат є варіант 1 – формування одногрупних поїздів. Але при цьому можна відзначити наступні недоліки застосованої методики:

- розрахунок виконується для усереднених розмірів вагонопотоків, які неадекватно відображають їх реальну потужність (форма ДО17 складається лише двічі на рік на основі спостережень за одну декаду), і не враховує характер надходження вагонів;

- експлуатаційні показники визначаються за умови формування лише одногрупних або двогрупних поїздів.

Отже методика [1] має дискретний характер і дає однозначну відповідь (так чи ні) на питання доцільності формування одногрупних або двогрупних поїздів як постійної організації вагонопотоків на період дії ПФП. Таким чином, розглянута методика може застосовуватися тільки на етапі технічних розрахунків і не може використовуватися в оперативних умовах.

Між тим, доцільність формування двогрупних поїздів бажано визначити оперативно, залежно від параметрів поточного стану та характеру надходження вагонів.

У поточний момент часу Θ сортувальні колії головної станції A, на яких накопичуються вагони попутних призначень B та C, можуть перебувати в одному з можливих станів (див. рис. 3):

Стан 1 – кількість вагонів на коліях менша складу поїзда, як для окремого призначення, так і в сумі, тобто $n_B < m$, $n_C < m$, $n_B + n_C < m$. В цьому випадку доцільно продовження процесу накопичення;

Стан 2 – кількість вагонів на колії окремого призначення достатня для формування одногрупного поїзда ($n_i \geq m$). У такому разі доцільне формування одногрупного поїзда;

Стан 3 – кількість вагонів на кожній колії менша складу поїзда, але сумарна кількість вагонів достатня для формування двогрупного поїзда ($n_B < m$, $n_C < m$, $n_B + n_C \geq m$). Для такого стану можливі два рішення:

1 – продовжувати процес накопичення вагонів для формування одногрупних поїздів;

2 – формувати двогрупний поїзд.

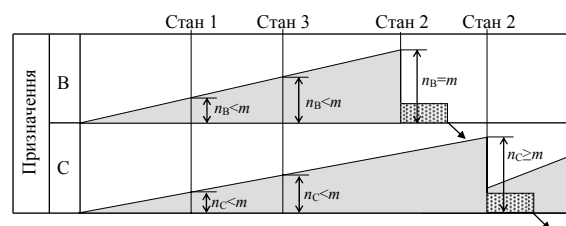


Рис. 3. Варіанти можливих станів сортувальних колій призначень B та C на станції A

В цьому випадку рішення про формування двогрупного поїзда повинно базуватися на забезпеченні економії витрат у порівнянні з формуванням окремих одногрупних поїздів даних призначень. На даний момент методика такої оцінки відсутня, і для її розробки необхідні відповідні дослідження.

Ефективність формування двогрупного поїзда в момент Θ буде залежати від того, як відбуватиметься процес накопичення вагонів на дані призначення у майбутньому ($T > \Theta$), тобто від характеру надходження вагонів. Процес надходження вагонів можна характеризувати тривалістю періоду F до завершення накопичення одногрупного поїзда (рис. 4).

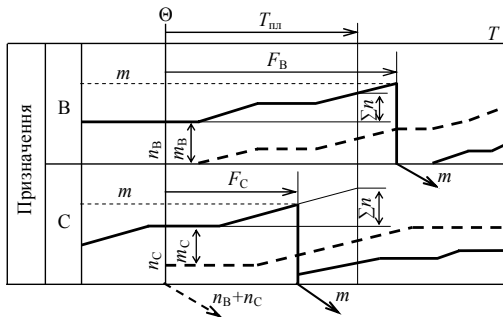


Рис. 4. Розрахункова схема процесу накопичення вагонів:

- при формуванні одногрупних поїздів;
- - - при формуванні двогрупних поїздів

Від кількості вагонів у поточний момент часу $n(\Theta)$ і тривалості періоду F залежить економія вагоно-годин накопичення у випадку формування двогрупного поїзда. З використанням величини F доцільність формування двогрупного поїзда може визначатися за допомогою умови:

$$F > T_{пл}, \quad (3)$$

де $T_{пл}$ – розрахункова тривалість періоду планування (відносно поточного моменту Θ), яка забезпечує ефективне використання одногрупних поїздів.

Очевидно, що від величини $T_{пл}$ залежать показники функціонування і критерій ефективності, тобто

$$E = f(T_{пл}) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Аналітичний опис функції (4) неможливий, тому залежність критерію ефективності від $T_{пл}$ може бути визначена за допомогою імітаційної моделі процесу. Для виконання досліджень була розроблена імітаційна модель процесу, яка реалізує:

- випадкове надходження вагонів на кожне призначення;

- процес накопичення вагонів та визначення його показників;
- прийняття рішення про формування на станції A одно- або двогрупних поїздів;
- роботу з транзитними і двогрупними поїздами на станції B та визначення її показників.

Рішення про формування на станції A поїзда відповідної категорії приймається згідно з умовами:

$$\begin{cases} (n_B + n_C \geq m) \text{ та } (F > T_{пл}) & \text{– формується двогрупний поїзд;} \\ (n_B + n_C \geq m) \text{ та } (F \leq T_{пл}) & \text{– формується одногрупний поїзд.} \end{cases}$$

На основі наведених в табл. 1 вихідних даних було виконано моделювання роботи станцій залізничного напрямку $A-B-C$ для різних значень $T_{пл}$. У якості результатів фіксувалися наступні показники роботи станцій A та B за період роботи протягом одного року:

- кількість поїздів окремої категорії;
- сумарні вагоно-години знаходження вагонів кожного призначення;
- обсяг маневрової роботи;
- тривалість знаходження поїзних локомотивів на станції B ;
- сумарні витрати, пов'язані з організацією вагонопотоків.

Отримані результати моделювання дозволяють зробити наступні висновки.

Від тривалості періоду планування залежить кількість одно- та двогрупних поїздів. У графічному вигляді ця залежність наведена на рис. 5.

Найбільша кількість двогрупних поїздів на станції A (K_{AB2}) формується при $T_{пл} = 0$ год., тобто коли рішення про їх формування приймається без урахування надходження вагонів у майбутньому. Для періоду планування від $T_{пл} = 0$ год. до $T_{пл} = 9$ год. кількість двогрупних поїздів зменшується, а одногрупних (K_{AB1} , K_{AC1}) – збільшується. Починаючи з $T_{пл} = 9$ год. і далі формуються лише одногрупні поїзди.

По станції B зі зростанням $T_{пл}$ збільшується кількість одногрупних (транзитних) поїздів (K_{AC1}) та кількість поїздів свого формування (K_{BC1}).

Збільшення кількості одногрупних поїздів призводить до збільшення загального простою вагонів призначень B та C на головній станції A , при цьому їх простій на станції B зменшується (рис. 6). Найменший сумарний простій вагонів на залізничному напрямку $A-B-C$ досягається за величини періоду планування експлуатаційної роботи $T_{пл} = 1$ год. Отже раціональне поєднання формування одногрупних та

двогрупних поїздів забезпечує економію простою вагонів на всьому напрямку у кількості 27,46 тис. ваг-год порівняно з формуванням тільки двогрупних поїздів, та 80,64 тис. ваг-год у порівнянні з формуванням тільки одногрупних поїздів.

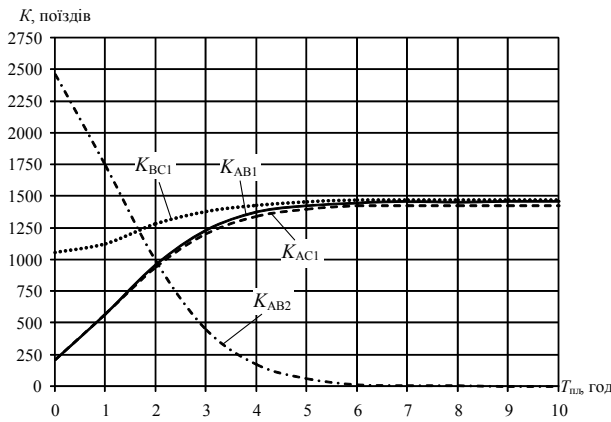


Рис. 5. Залежність кількості поїздів окремих категорій від періоду планування

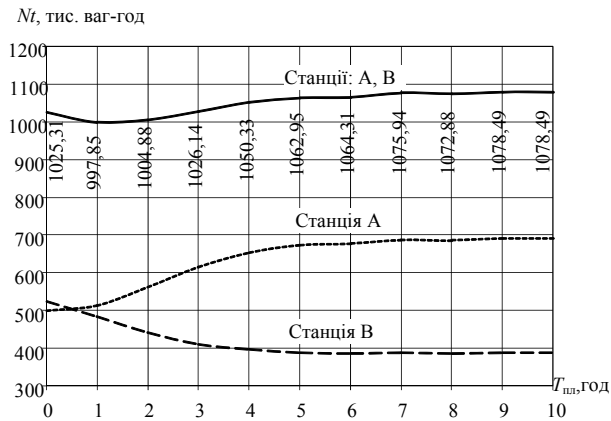


Рис. 6. Залежність витрат вагоно-годин простою вагонів призначень *B* та *C* від періоду планування

За допомогою (2) виконано розрахунок загальних витрат E , пов'язаних з організацією вагонопотоків. Залежність витрат від періоду планування для станцій *A*, *B* та на залізничному напрямку в цілому наведено у графічному вигляді на рис. 7.

При формуванні на станції *A* тільки одногрупних поїздів ($T_{пл} \geq 9$ год.) річні витрати становлять 5794 тис. грн. Витрати на формування лише двогрупних поїздів ($T_{пл} = 0$ год.) становлять 5881 тис. грн на рік. Отже, на напрямку *A–B–C* з вагонопотоками середньодобової потужності $N = 200$ ваг. та складом поїзда $m = 50$ ваг. ефективною є їх організація в одногрупні поїзди. Це відповідає висновку, отриманому вище з використанням типової методики [1].

Наведені на рис. 7 залежності показують, що найменші витрати $E = 5618$ тис. грн досягають-

ся при періоді планування $T_{пл} = 2$ год. Отже, раціональне поєднання формування одногрупних та двогрупних поїздів забезпечує економію загальних витрат у сумі 176 тис. грн порівняно з формуванням тільки одногрупних поїздів.

Розглянута організація вагонопотоків має оперативний характер з точки зору використання одногрупних і двогрупних поїздів, забезпечує їх оптимальне поєднання за критерієм загальних витрат з урахуванням маневрової роботи і простою поїзних локомотивів на технічних станціях. Крім цього, помітно покращуються окремі показники функціонування кожної станції залізничного напрямку.

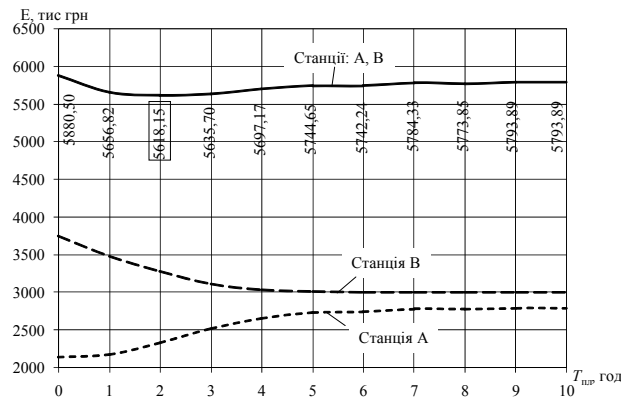


Рис. 7. Залежність сумарних експлуатаційних витрат від періоду планування

У якості прикладу на рис. 8 наведено гістограму розподілу вагоно-годин простою під накопиченням окремого состава на головній станції *A*, яку отримано за результатами моделювання для $T_{пл} = 2$ год. Розрахункову норму тривалості накопичення состава перевищує близько 22 %, а середній простій одного вагона під накопиченням складає 2 год.

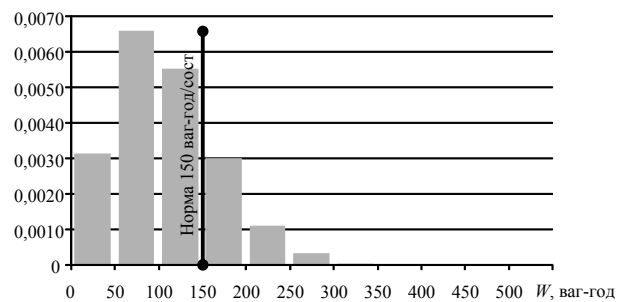


Рис. 8. Розподіл вагоно-годин простою під накопиченням окремого состава

У порівнянні з традиційною технологією розглянута модель оперативних рішень щодо формування поїздів певної категорії забезпечує для кожної технічної станції скорочення середнього простою вагонів під накопиченням на 1 год. Покращення окремих показників експлу-

атаційної роботи окремих станцій та залізничного напрямку в цілому потребує деяких додаткових витрат з боку залізниці – збільшується обсяг маневрової роботи, простій поїзних локомотивів. Характер зміни даних показників потребує окремих досліджень.

На основі наведеного аналізу можна зробити висновок про доцільність впровадження оперативного формування двогрупних поїздів на залізничному напрямку з метою прискорення доставки вантажів.

Ефективність оперативного підходу може бути підвищена за рахунок додаткових технологічних умов, визначення яких потребує відповідних досліджень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Інструктивні вказівки з організації вагонопотоків на залізницях України [Текст]. – К., 2005.

2. Федотов, Н. И. Колебания накопления вагонов в сортировочных парках [Текст] / Н. И. Федотов // Сб. науч. тр. НИИЖТ. – 1967. – Вып. 65. – С. 19-27.
3. Угрюмов, А. К. Суточная неравномерность вагонопотоков [Текст] / А. К. Угрюмов // Сб. науч. тр. ЛИИЖТ. – 1966. – Вып. 231. – С. 54-84.
4. Окипный, Л. Д. Эффективность оперативной организации вагонопотоков [Текст] / Л. Д. Окипный, В. А. Покавкин // Ж.д. транспорт. – 1985. – № 11. – С. 13-16.
5. Бородин, А. Ф. Об управлении вагонопотоками с учетом условий их подхода [Текст] / А. Ф. Бородин // Вестник ВНИИЖТ. – 1984. – № 7. – С. 4-9.
6. Бородин, А. Ф. Управление вагонопотоками в современных условиях [Текст] / А. Ф. Бородин // Ж.д. транспорт. – 1996. – № 5. – С. 10-15.

Надійшла до редколегії 01.02.2010.

Прийнята до друку 17.02.2010.

ПОКАЗНИКИ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНОЇ ГІРКИ ТА ФАКТОРИ, ЩО НА НИХ ВПЛИВАЮТЬ

Встановлено вид рівнянь регресії, які адекватно описують зв'язок між похибкою гальмування відчепів, ухилом сортувальних колій і показниками роботи сортувальної гірки з урахуванням впливу параметрів вагонопотоку, що переробляється.

Установлен вид уравнений регрессии, адекватно описывающих связь между ошибкой торможения отцепов, уклоном сортировочных путей и показателями работы сортировочной горки с учетом влияния параметров перерабатываемого вагонопотока.

A kind of regression equations, which adequately describe the correlation between the error of braking of cuts, the slope of hump-yard tracks and the indices of hump yard work taking into account the influence of parameters of wagon stream processed, is determined.

Вступ

В умовах сьогодення, які характеризуються певним спадом обсягів перевезень, важливою задачею для залізничного транспорту України є зменшення непродуктивних витрат, у т.ч. витрат палива маневровими локомотивами під час виконання операцій на сортувальних станціях, що дозволить підвищити рентабельність роботи цих станцій.

На величину витрат палива, зокрема тих, що пов'язані з осаджуванням вагонів, значною мірою впливає довжина «вікон», які утворюються між групами вагонів на коліях сортувального парку, та кількість операцій осаджування. Також від цих факторів залежить тривалість виконання маневрових операцій з осаджування та, як наслідок, тривалість знаходження вагонів на станції, що певною мірою впливає на обіг і робочий парк вагонів.

Тому значно зростають вимоги, що висуваються до якості регулювання швидкості скочування відчепів із сортувальної гірки і, насамперед, прицільного регулювання.

Крім того, точність гальмування впливає і на швидкість зіткнення вагонів на коліях сортувального парку, перевищення нормованої величини якої (5 км/год) може викликати пошкодження вагонів і вантажів.

Аналіз статистичних даних [1] показав, що показники, які досягнуто на існуючих сортувальних гірках, не відповідають вимогам до якості регулювання швидкості скочування відчепів.

Вагонопотоки, що переробляються на сортувальних гірках, різняться ваговою категорією вагонів і кількістю вагонів у відчепі.

Також суттєво відрізняється і крутизна ухилу сортувальних колій.

Постановка задачі

Метою даної роботи є встановлення зв'язку між основними показниками роботи сортувальної гірки, до яких належать середня швидкість зіткнення відчепів на коліях сортувального парку, середня довжина «вікна» та кількість операцій осаджування на один перероблений вагон, і наступними факторами: 1) похибкою гальмування (середньоквадратичною помилкою розрахунку та реалізації швидкостей виходу відчепів з гальмових позицій σ_v), 2) ваговою категорією вагонів у потоці, що підлягає розформуванню, 3) кількістю вагонів у відчепі, 4) ухилом сортувальних колій.

Моделювання процесу розформування составів на сортувальній гірці

Показники роботи гірки визначено на підставі результатів імітаційного моделювання процесу розформування составів. В імітаційній моделі загальна енергія кожного відчепа, яка погашається на гальмових позиціях, визначається за умови забезпечення заданої швидкості в точці прицілювання. Значення швидкості виходу з паркової гальмової позиції визначається з урахуванням характеристик самого відчепа, крутизни ухилу сортувальних колій, дальності пробігу по сортувальній колії та всіх інших факторів. У цих умовах отримані показники відображують потенційні (граничні) можливості прицільного регулювання на відповідній гірці.

У роботі розглянуто сортувальну гірку великої потужності з параметрами, які наведено у [1].

Основними вихідними даними для моделювання є:

– швидкість розпуску – 1,7 м/с;

- швидкість прицілювання – 1,4 м/с (5 км/год);
- похибка гальмування σ_v для кожної гальмової позиції, яка варіювалася у межах 0,1...1 м/с з кроком 0,1 м/с;
- ухил сортувальних колій – 0,6 %;
- частота появи вагонів різної вагової категорії та відчепів з різною кількістю вагонів (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри вагонопотоку

| Вагова категорія вагонів | Частота появи, % | Кількість вагонів у відчепі | Частота появи, % |
|--------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
| легка | 32 | 1 | 64 |
| легко-середня | 9 | 2 | 18 |
| середня | 4 | 3 | 6 |
| середньо-важка | 7 | 4 | 3 |
| важка | 48 | 5 і більше | 9 |

Під час досліджень розглянуто вісім варіантів, які відрізняються частотою появи у потоці, що переробляється, вагонів різної вагової категорії (табл. 2). Параметри відчепів прийнято згідно табл. 1.

Таблиця 2

Частоти появи вагонів різної вагової категорії, %

| Вагова категорія вагонів | Варіант | | | | | | | |
|--------------------------|---------|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| легка | 5 | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 |
| легко-середня | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| середня | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| середньо-важка | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| важка | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |

Також розглянуто вісім варіантів, які відрізняються частотою появи відчепів з різною кількістю вагонів [2]. Інші параметри прийнято згідно табл. 1.

Крім того, розглянуто вісім варіантів, у яких ухил сортувальних колій варіюється у межах 0,6...2 % з кроком 0,2 %. Параметри вагонопотоку прийнято згідно табл. 1.

Результати дослідження

Аналіз отриманих даних показав, що між факторами та показниками роботи гірки є певний нелінійний кореляційний зв'язок, для оцінки тісноти якого використано кореляційне відношення η [3].

Отримані результати дозволили встановити наступне:

1. На середню швидкість зіткнення відчепів на коліях сортувального парку суттєво впливає похибка гальмування σ_v ($\eta =$

$= 0,70...0,93$), в незначній мірі – вагова категорія вагонів, кількість вагонів у відчепі ($\eta = 0,10...0,15$), і значною мірою – ухил сортувальних колій ($\eta = 0,48$).

2. На середню довжину «вікна» та кількість операцій осаджування на один перероблений вагон значною мірою впливає похибка гальмування ($\eta = 0,51...0,86$ і $\eta = 0,56...0,87$, відповідно), а також вагова категорія вагонів і кількість вагонів у відчепі ($\eta = 0,41...0,44$ і $\eta = 0,42...0,45$, відповідно), і в незначній мірі – ухил сортувальних колій ($\eta = 0,27$).

Наявність нелінійного кореляційного зв'язку між похибкою гальмування відчепів і показниками роботи сортувальної гірки дозволяє встановити вид рівнянь регресії, коефіцієнти яких визначаються методом найменших квадратів [3].

Під час досліджень використано 40 видів можливих однофакторних і 58 видів двофакторних рівнянь регресії, з яких для подальшого розгляду рівняння обиралися за принципом найменшої залишкової дисперсії D_3 [4].

Для перевірки адекватності опису результатів експериментів рівнянням регресії використано F -критерій Фішера [5] і відносне відхилення v дійсних значень y_i від прогнозних [6]. Прийнято, що рівняння регресії є адекватним, якщо розраховане значення F -критерію більше табличного $F_{\text{табл}}$ у разі ймовірності помилки 5 % і відносне відхилення $v \leq 10$ %. Для оцінки якості двофакторного рівняння регресії також використано множинне кореляційне відношення R' [5]. Критерієм адекватності є виконання умови $R' \geq 0,95$.

Дані щодо однофакторних рівнянь регресії для опису зв'язку між похибкою гальмування σ_v і показниками роботи сортувальної гірки з урахуванням вагової категорії вагонів або кількості вагонів у відчепі наведено у [1, 2].

Але під час подальших досліджень виявлено, що адекватність рівнянь регресії, які описують зв'язок між похибкою σ_v і середньою довжиною «вікна» $l_{\text{вік}}$ або кількістю операцій осаджування $P_{\text{ос}}$ на один перероблений вагон покращується, якщо розглянути три випадки щодо вагової категорії вагонів – 1) варіанти 1-2, 2) варіанти 2-4, 3) варіанти 4-8 і п'ять випадків щодо кількості вагонів у відчепі – 1) варіанти 1-2, 2) варіанти 2-3, 3) варіанти 3-4, 4) варіанти 4-6, 5) варіанти 6-8.

У цьому разі рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \sigma_v^2.$$

Виконаний аналіз дозволив встановити, що зв'язок між похибкою гальмування відчепів σ_v , ухилом сортувальних колій i та середньою швидкістю зіткнення відчепів на них, середньою довжиною «вікна» або кількістю операцій осаджування на один перероблений вагон можна описати двофакторними рівняннями регресії виду:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 e^{\sigma_v} + b_2 e^i + b_{12} e^{\sigma_v i} + b_{11} e^{\sigma_v^2} + b_{22} e^{i^2}; \quad (1)$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \sigma_v + b_2 i + b_{12} \sigma_v i + b_{11} \sigma_v^2 + b_{22} i^2; \quad (2)$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \sigma_v^2 + b_2 i^2, \quad (3)$$

для яких визначено F -критерій Фішера, відносно відхилення v дійсних значень y_i від прогнозних і множинне кореляційне відношення R' (табл. 3).

Таблиця 3

Дані для перевірки адекватності рівнянь регресії

| Вид рівняння | D_3 | F | $F_{\text{табл}}$ | $v, \%$ | R' |
|---|-----------|-------|-------------------|---------|-------|
| Середня швидкість зіткнення відчепів на сортувальних коліях | | | | | |
| 1 | 0,0004675 | 41,07 | 1,45 | 1,1 | 0,988 |
| 2 | 0,0007922 | 24,24 | | 1,4 | 0,980 |
| 3 | 0,0017675 | 10,86 | | 2,1 | 0,954 |
| Середня довжина «вікна» на один перероблений вагон | | | | | |
| 1 | 0,8553550 | 64,26 | 1,45 | 4,3 | 0,992 |
| 2 | 0,8979960 | 61,21 | | 4,4 | 0,992 |
| 3 | 1,7606880 | 31,22 | | 5,8 | 0,984 |
| Середня кількість операцій осаджування на один вагон | | | | | |
| 1 | 0,0000028 | 64,00 | 1,45 | 3,8 | 0,992 |
| 2 | 0,0000029 | 61,04 | | 3,9 | 0,992 |
| 3 | 0,0000058 | 31,13 | | 5,2 | 0,984 |

Дані табл. 3 свідчать про виконання всіх умов адекватності для трьох видів рівнянь регресії. Отже, зв'язок між похибкою гальмування відчепів, ухилом сортувальних колій і показниками роботи сортувальної гірки можна описати рівнянням регресії виду

$\hat{y} = b_0 + b_1 \sigma_v^2 + b_2 i^2$, як найпростішим з розглянутих.

Наявність нелінійного зв'язку між окремими факторами та показниками роботи сортувальної гірки, а також можливість його адекватного опису дозволяють встановити вид двофакторного рівняння регресії $\hat{y} = f(\sigma_v, i; b_0, b_1, \dots, b_k)$ з урахуванням впливу вагової категорії вагонів у потоці, що підлягає розформуванню, та кількості вагонів у відчепі.

Рівняння регресії для опису зв'язку між похибкою гальмування σ_v , ухилом сортувальних колій i та середньою швидкістю зіткнення відчепів на них отримано для двох співвідношень (табл. 4).

Таблиця 4

Співвідношення, що розглядаються, під час експерименту

| Співвідношення | Вагова категорія вагонів | Кількість вагонів у відчепі |
|---|--------------------------|-----------------------------|
| Середня швидкість зіткнення відчепів на сортувальних коліях | | |
| 1 | варіанти 1-3 | варіанти 1-8 |
| 2 | варіанти 3-8 | варіанти 1-8 |
| Середня довжина «вікна» або кількість операцій осаджування на один перероблений вагон | | |
| 1 | варіанти 1-2 | варіанти 1-2 |
| 2 | | варіанти 2-3 |
| 3 | | варіанти 3-4 |
| 4 | | варіанти 4-6 |
| 5 | | варіанти 6-8 |
| 6 | варіанти 2-4 | варіанти 1-2 |
| 7 | | варіанти 2-3 |
| 8 | | варіанти 3-4 |
| 9 | | варіанти 4-6 |
| 10 | варіанти 4-8 | варіанти 6-8 |
| 11 | | варіанти 1-2 |
| 12 | | варіанти 2-3 |
| 13 | | варіанти 3-4 |
| 14 | | варіанти 4-6 |
| 15 | | варіанти 6-8 |

Рівняння регресії для опису зв'язку між похибкою σ_v , ухилом i та середньою довжиною «вікна» або кількістю операцій осаджування на один перероблений вагон з урахуванням впливу вагової категорії вагонів і кількості вагонів у відчепі отримано для п'ятнадцяти співвідношень (див. табл. 4).

Для визначення рівняння регресії виконано активний регресійний експеримент з програмним управлінням за планом, який розроблено для середньої швидкості зіткнення відчепів на коліях сортувального парку (табл. 5) і середньої довжини «вікна» або кількості операцій осаджування на один перероблений вагон (табл. 6) окремо.

Під час проведення експерименту частота появи вагонів різної вагової категорії та появи відчепів із різною кількістю вагонів для кожного випадку варіювалася на верхньому (ВР) і нижньому (НР) рівнях, що дозволило зменшити кількість дослідів, не погіршуючи при цьому адекватності експерименту. Похибка гальмування варіювалася у межах 0,1...1 м/с з кроком 0,1 м/с. Ухил сортувальних колій варіювався у межах 0,6...2,0 % із кроком 0,2 %.

**План проведення експерименту для отримання значень середньої швидкості
зіткнення відцепів на коліях сортувального парку**

| Співвідношення | Вагова категорія вагонів | | Кількість вагонів у відцепі | | Співвідношення | Вагова категорія вагонів | | Кількість вагонів у відцепі | |
|----------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|----------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|
| | Рівень | Варіант | Рівень | Варіант | | Рівень | Варіант | Рівень | Варіант |
| 1 | ВР | 1 | ВР | 1 | 2 | ВР | 3 | ВР | 1 |
| | ВР | 1 | ПР | 3 | | ВР | 3 | ПР | 3 |
| | НР | 3 | ВР | 1 | | НР | 8 | ВР | 1 |
| | НР | 3 | ПР | 3 | | НР | 8 | ПР | 3 |
| | ВР | 1 | ПР | 4 | | ВР | 3 | ПР | 4 |
| | ВР | 1 | НР | 8 | | ВР | 3 | НР | 8 |
| | НР | 3 | ПР | 4 | | НР | 8 | ПР | 4 |
| | НР | 3 | НР | 8 | | НР | 8 | НР | 8 |

Таблиця 6

План проведення експерименту для отримання значень середньої довжини «вікна» або кількості операцій осаджування на один перероблений вагон

| Співвідношення | Вагова категорія вагонів | | Кількість вагонів у відцепі | | Співвідношення | Вагова категорія вагонів | | Кількість вагонів у відцепі | |
|----------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|----------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|
| | Рівень | Варіант | Рівень | Варіант | | Рівень | Варіант | Рівень | Варіант |
| 1 | ВР | 1 | ВР | 1 | 9 | ВР | 2 | ВР | 4 |
| | ВР | 1 | НР | 2 | | ВР | 2 | НР | 6 |
| | НР | 2 | ВР | 1 | | НР | 4 | ВР | 4 |
| | НР | 2 | НР | 2 | | НР | 4 | НР | 6 |
| 2 | ВР | 1 | ВР | 2 | 10 | ВР | 2 | ВР | 6 |
| | ВР | 1 | НР | 3 | | ВР | 2 | НР | 8 |
| | НР | 2 | ВР | 2 | | НР | 4 | ВР | 6 |
| | НР | 2 | НР | 3 | | НР | 4 | НР | 8 |
| 3 | ВР | 1 | ВР | 3 | 11 | ВР | 4 | ВР | 1 |
| | ВР | 1 | НР | 4 | | ВР | 4 | НР | 2 |
| | НР | 2 | ВР | 3 | | НР | 8 | ВР | 1 |
| | НР | 2 | НР | 4 | | НР | 8 | НР | 2 |
| 4 | ВР | 1 | ВР | 4 | 12 | ВР | 4 | ВР | 2 |
| | ВР | 1 | НР | 6 | | ВР | 4 | НР | 3 |
| | НР | 2 | ВР | 4 | | НР | 8 | ВР | 2 |
| | НР | 2 | НР | 6 | | НР | 8 | НР | 3 |
| 5 | ВР | 1 | ВР | 6 | 13 | ВР | 4 | ВР | 3 |
| | ВР | 1 | НР | 8 | | ВР | 4 | НР | 4 |
| | НР | 2 | ВР | 6 | | НР | 8 | ВР | 3 |
| | НР | 2 | НР | 8 | | НР | 8 | НР | 4 |
| 6 | ВР | 2 | ВР | 1 | 14 | ВР | 4 | ВР | 4 |
| | ВР | 2 | НР | 2 | | ВР | 4 | НР | 6 |
| | НР | 4 | ВР | 1 | | НР | 8 | ВР | 4 |
| | НР | 4 | НР | 2 | | НР | 8 | НР | 6 |
| 7 | ВР | 2 | ВР | 2 | 15 | ВР | 4 | ВР | 6 |
| | ВР | 2 | НР | 3 | | ВР | 4 | НР | 8 |
| | НР | 4 | ВР | 2 | | НР | 8 | ВР | 6 |
| | НР | 4 | НР | 3 | | НР | 8 | НР | 8 |
| 8 | ВР | 2 | ВР | 3 | | | | | |
| | ВР | 2 | НР | 4 | | | | | |
| | НР | 4 | ВР | 3 | | | | | |
| | НР | 4 | НР | 4 | | | | | |

З усієї розглянутої сукупності двофакторних рівнянь регресії за принципом найменшої за-

лишкової дисперсії D_3 обрано поліном другого ступеню виду (2).

Для рівнянь регресії, що описують зв'язок між похибкою σ_v , ухилом i та:

1) середньою швидкістю зіткнення відчепів – $D_3 = 0,002191...0,003724$ (м/с)², $F(10,17...12,52) > F_{\text{табл}}(1,00)$, $v(2,0...3,1) < 10\%$, $R'(0,95...0,96) \geq 0,95$;

2) середньою довжиною «вікна» на один перероблений вагон – $D_3 = 0,806690...2,991301$ (м/вагон)², $F(10,89...23,09) > F_{\text{табл}}(1,26)$, $v(7,8...9,9) < 10\%$, $R'(0,95...0,98) \geq 0,95$;

3) середньою кількістю операцій осаджування на один перероблений вагон – $D_3 = 0,000004...0,000014$ (операцій/вагон)², $F(8,31...25,47) > F_{\text{табл}}(1,26)$, $v(7,3...9,8) < 10\%$, $R'(0,95...0,98) \geq 0,95$.

Таким чином, зв'язок між похибкою гальмування відчепів, ухилом сортувальних колій і показниками роботи сортувальної гірки з урахуванням впливу вагової категорії вагонів і кількості вагонів у відчепі адекватно описується рівняннями регресії у вигляді поліному другого ступеню виду:

$$\hat{y} = b_0 + b_1\sigma_v + b_2i + b_{12}\sigma_v i + b_{11}\sigma_v^2 + b_{22}i^2.$$

Висновки

1. Отримано однофакторне рівняння регресії, яке з урахуванням параметрів вагонопотоку адекватно описує зв'язок між похибкою гальмування відчепів σ_v і середньою довжиною «вікна» або кількістю операцій осаджування на один перероблений вагон.

2. Урахування впливу на показники роботи гірки вагової категорії вагонів є можливим шляхом отримання рівнянь регресії для трьох випадків – коли частота появи у потоці, що переробляється, вагонів важкої та середньо-важкої вагової категорії складає: 1) 75 % і більше; 2) 55...75 %; 3) менш, ніж 55 %.

3. Урахування впливу на показники роботи гірки кількості вагонів у відчепі є можливим шляхом отримання рівнянь регресії для п'яти випадків – коли частота появи у потоці, що переробляється, відчепів з 1 вагону та 5 і більше вагонів складає: 1) 70...80 % і 15...5 %, відповідно; 2) 60...70 % і 25...15 %, відповідно; 3) 50...60 % і 35...25 %, відповідно; 4) 30...50 % і 55...35 %, відповідно; 5) 10...30 % і 75...55 %, відповідно.

4. Отримано двофакторні рівняння регресії, які адекватно описують зв'язок між похибкою гальмування σ_v , ухилом сортувальних колій i та показниками роботи сортувальної гірки.

5. Отримано рівняння регресії, яке адекватно описує зв'язок між похибкою гальмування σ_v , ухилом i та середньою швидкістю зіткнення відчепів на коліях сортувального парку з урахуванням параметрів вагонопотоку. Останнє є можливим шляхом отримання рівнянь регресії для двох випадків – коли частота появи у потоці, що переробляється, вагонів важкої та середньо-важкої вагової категорії складає: 1) 65 % і більше; 2) менш, ніж 65 %.

6. Отримано рівняння регресії, які адекватно описують зв'язок між похибкою гальмування σ_v , ухилом i та середньою довжиною «вікна» або кількістю операцій осаджування на один перероблений вагон з урахуванням параметрів вагонопотоку. Останнє є можливим шляхом отримання рівнянь регресії для п'ятнадцяти співвідношень, у яких сполучаються три випадки щодо вагової категорії вагонів і п'ять випадків щодо кількості вагонів у відчепі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Журавель, В. В. Точність гальмування, вага вагонів і показники роботи сортувальної гірки [Текст] / В. В. Журавель, Г. І. Музикіна, І. Л. Журавель // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 5. – С. 46-48.
2. Журавель, В. В. Точність гальмування, кількість вагонів у відчепі та показники роботи сортувальної гірки [Текст] / В. В. Журавель // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – № 28. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 133-136.
3. Акулиничев, В. М. Математические методы в эксплуатации железных дорог [Текст] : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. Н. Корешков. – М.: Транспорт, 1981. – 223 с.
4. Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества [Текст] / Р. Шторм. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
5. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул [Текст] : учеб. пособие / Е. Н. Львовский. – М.: Высш. шк., 1982. – 224 с.
6. Негрей, Н. П. Прогнозирование размеров работы сортировочных станций с помощью статистических методов [Текст] / Н. П. Негрей; под ред. Н. В. Правдина // Проблемы проектирования станций и узлов : Межвуз. сб. науч. статей. – Гомель: БелИИЖТ, 1984. – С. 10-21.

Надійшла до редколегії 19.04.2010.

Прийнята до друку 20.04.2010.

ПРО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПРИ ВТОМІ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ З ОСОБЛИВОСТЯМИ БУДОВИ ПОВЕРХОНЬ РУЙНУВАННЯ

Для сталі залізничної осі, в залежності від амплітуди навантаження, наведено закономірні зміни структури при випробуваннях на втомлюваність.

Для стали железнодорожной оси, в зависимости от амплитуды нагружения, приведены закономерные изменения структуры при испытаниях на усталость.

For the rail axle steel the regular changes of structure during the fatigue test in dependence on strength amplitude are presented.

В процесі експлуатації залізничні вісі колісних пар піддаються чисельним циклічним навантаженням. Спрямованість експлуатації залізничного транспорту в напрямку підвищення питомого навантаження на залізничну вісь колісної пари, разом із зростанням швидкості руху, обумовлює за необхідне розробляти пропозиції по підвищенню експлуатаційної безпеки опорних елементів рухомого складу. Окрім пропозицій по зміні структурного стану металу залізничної вісі за рахунок використання різноманітних обробок зміцнення [1–3] або конструктивних рішень [4], має неабиякий інтерес оцінка процесів структурних змін у металі залізничної вісі під час циклічного навантаження.

Матеріалом для дослідження була залізнична вісь колісної пари, яка виготовлена із сталі 45. Дослідження структурних змін в сталі під час циклічного навантаження проводили на зразках, які піддавались знакозмінному згину за схемою симетричного циклу на багатопозиційній машині «Сатурн-10». Після руйнування зразків визначали ступінь накопичення дефектів кристалічної будови з використанням методик рентгеноструктурного аналізу, розміри структурних елементів поверхонь руйнування.

Аналіз експериментальних даних [5, 6] свідчить, що визначеним ділянкам кривої циклічного навантаження (рис. 1) повинні відповідати закономірні зміни внутрішньої будови вуглецевої сталі.

Враховуючи, що процес накопичення дефектів кристалічної будови під час циклічного навантаження сталі залежить від визначеної низки складових, їх сумарний вплив може бути оцінений за рівнем мікронапружень, або викривлень другого роду (M).

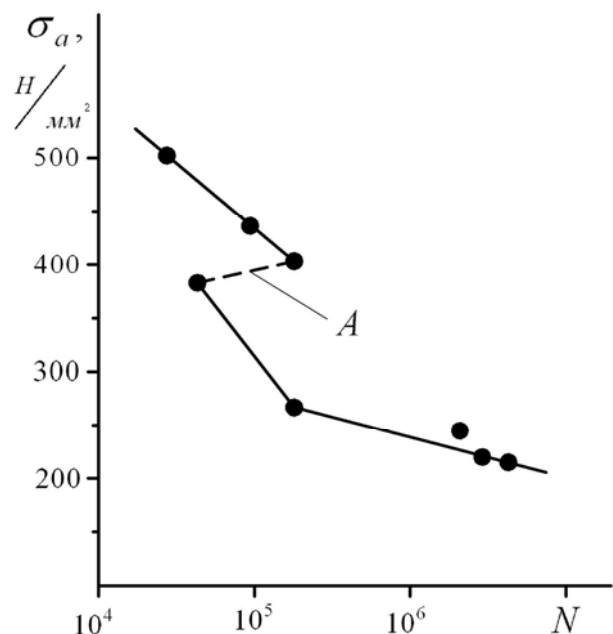


Рис. 1. Крива циклічного навантаження сталі 45 (A – область лінії розриву)

На рис. 2 наведено залежність зміни величини M від амплітуди навантаження зразків (σ_a). Пропорційно збільшенню величини σ_a спостерігається підвищення викривлень другого роду. Винятком можуть бути значення M , які відносяться до амплітуд навантаження 227 та $510 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$. Якщо у першому випадку зразок не

був доведений до руйнування після $8 \cdot 10^6$ кількості циклів та рівень викривлень другого роду склав достатньо високі значення, то для амплітуди $510 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ картина має інше тлумачення. Річ у тому, що характер поведінки мета-

лу при циклічному навантаженні, при амплітуді $510 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$, за своїми ознаками повинен бути віднесений до циклічного перевантаження, що обумовлює високий рівень неоднорідності розподілу дефектів кристалічної будови.

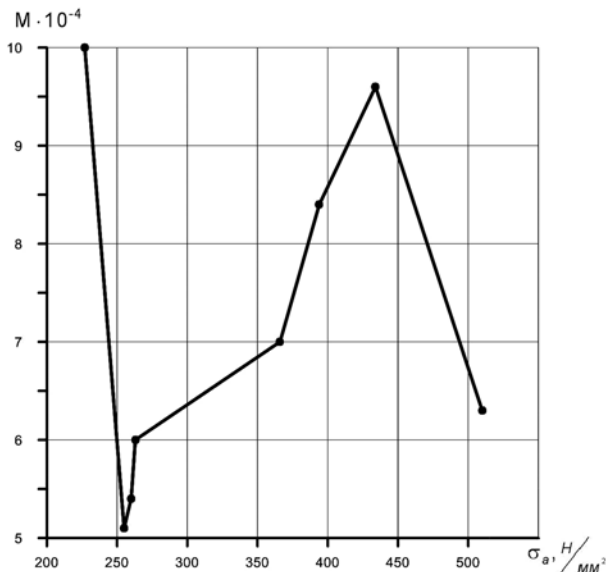


Рис. 2. Залежність величини викривлень другого роду кристалічної решітки фериту від амплітуди навантаження

На підставі цього, висока неоднорідність дефектів приводить до дуже швидкого їх накопичення в локальних мікрооб'ємах до максимально припустимих значень і, як наслідок цього, до швидкого руйнування металу [7].

При циклічному навантаженні, зміна знаку діючих напружень супроводжується чергуванням процесів накопичення дефектів кристалічної будови та їх анігіляції. Окрім оцінки сумарної величини щільності накопичених дефектів, визначеного значення для розуміння процесів зародження мікротріщин, характеру їх зростання набуває однорідність розподілу дефектів. Враховуючи, що моменти, які відповідають якісним змінам в розташуванні дефектів кристалічної будови, наприклад виникнення неомогенностей в розподілі дислокацій, перетворення їх у чарункову дислокаційну структуру, повинні мати обов'язковий відбиток на характеристиках міцності та на особливостях будови поверхонь руйнування [1, 5]. Дійсно, як показали структурні дослідження поверхонь руйнування, розмір фасеток при збільшенні до 50 разів має визначену залежність від амплітуди навантаження (рис. 3). Парне нанесення одних значень розміру фасеток при збільшенні до 50 разів (позначено як D) проти відповідних величин M показує існування кореляційного

зв'язку між ними, хоча коефіцієнт кореляції значно менший порівняно з величиною інтенсивності накопичення дислокацій за цикл навантаження [5].

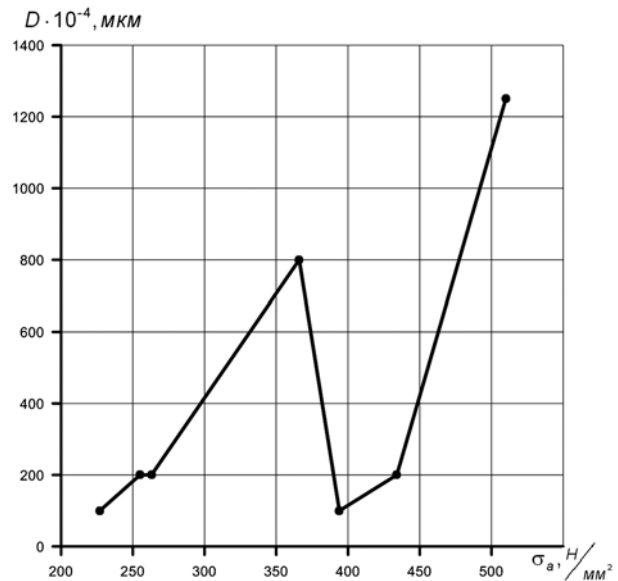


Рис. 3. Зміна величини D від амплітуди циклічного навантаження

Подальші дослідження поверхонь руйнування показали, що у більшості випадків фасетки великих розмірів складаються із більш дрібних, позначимо для відмінності як d . Характер зміни d від амплітуди навантаження наведений на рис. 4.

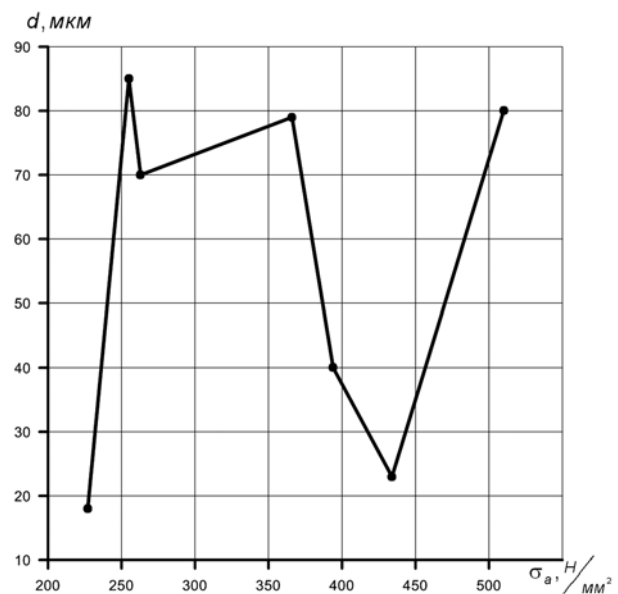


Рис. 4. Зміна величини d від амплітуди навантаження

Пошук можливих кореляційних зв'язків величини d з характеристиками кристалічної будови вуглецевої сталі показав існування дос-

татньо однозначного зв'язку з розміром областей когерентного розсіювання рентгенівських променів (L) (рис. 5). Немонотонний характер залежності викривлень другого роду від амплітуди навантаження показує, що визначеним ділянкам кривої втомлення відповідають якісно різні процеси структурних перетворень і, як наслідок цього, різні рушійні сили, які приводять до зародження мікротріщин.

Так, для малих амплітуд ($227 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$) щільність накопичених дислокацій досягла значень приблизно в 2...2,5 рази більших порівняно з аналогічною характеристикою для $\sigma_a = 225 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ та залишилась більшою за абсолютними значеннями для всіх наступних амплітуд циклічного навантаження.

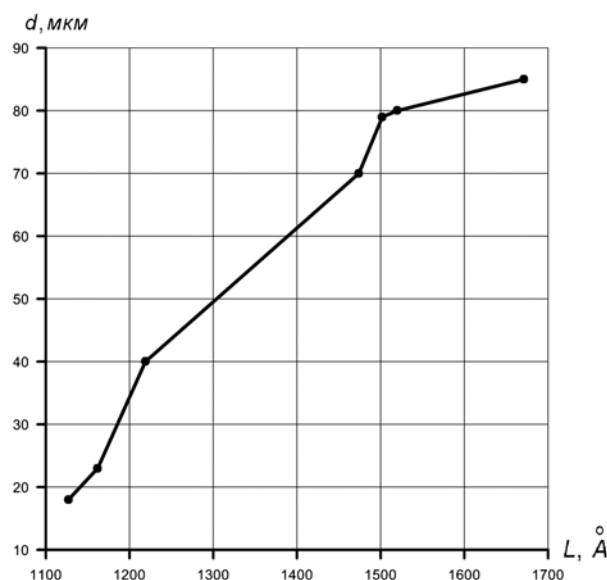


Рис. 5. Взаємозв'язок між величинами d і L (1 – експериментальні дані, 2 – визначено з екстраполяції, рис. 3 за умови, коли $L = 1127 \text{ \AA}$)

Одне із пояснень наведеного результату – чим менша амплітуда навантаження, тим менша кількість дефектів кристалічної будови залишається в системі після циклічної зміни етапів деформаційного зміцнення та розвитку анігіляційних процесів.

Таким чином, момент виникнення неомогенностей в розташуванні дефектів кристалічної будови, в першу чергу дислокацій, зсувається в сторону більшої сумарної кількості циклів.

Враховуючи, що формування неоднорідностей в гомогенному розташуванні дислокацій являє собою початкові етапи виникнення та удосконалення дислокаційної чарункової стру-

ктури [5], а елементи її будови, такі як субграніці, перетворюються в місця зародження субмікротріщин, збільшення рівномірності розташування дефектів приведе до підвищення витривалості металу.

Для амплітуд навантаження від $225 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ і вище, монотонне зростання M указує на збільшення мікронапружень в металі, що повинно знижувати витривалість при циклічному навантаженні. Сумісний аналіз характеру залежності d і M від амплітуди навантаження (рис. 2, 4) указує на можливість існування кореляційного зв'язку між ними. Дійсно, після парного нанесення однієї величини проти іншої можна вважати, що існує однозначне обернено пропорційне співвідношення (рис. 6).

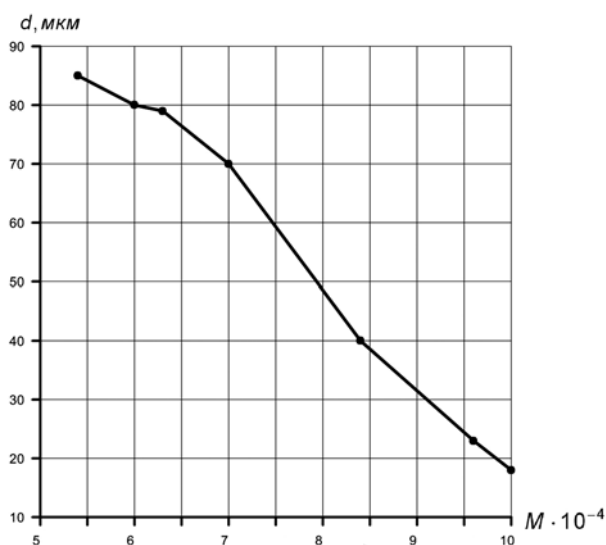


Рис. 6. Взаємний зв'язок між розміром дрібних фасеток зламу і величиною викривлень другого роду кристалічної решітки фериту (1 – експериментальні дані, 2 – визначено з екстраполяції, рис. 5)

Причому, розмір фасетки зламу, який було визначено екстраполяцією із співвідношення $d - f(M)$ (рис. 5), що відповідає амплітуді навантаження $227 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ зразка, який не було доведено до руйнування, достатньо добре відповідає залежності $d - f(M)$ (рис. 6).

Таким чином, на підставі аналізу кореляційних зв'язків між характеристиками, які дають змогу оцінити особливості будови поверхонь руйнування та параметрами циклічного навантаження вуглецевої сталі, визначено, що однією із складових процесу підвищення витривалості металу є усунення моменту виникнення неомогенностей в розподілі дефектів кристалічної

будови, які накопичуються в металі під час деформації.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Вакуленко, І. О. Чинники, які впливають на розвиток втомленості металу в процесі експлуатації залізничних коліс [Текст] / І. О. Вакуленко, О. М. Перков, М. А. Грищенко // Залізн. трансп. України. – 2007. – № 5. – С. 70-71.
2. Вакуленко, І. О. Вплив дисперсності структурних складових вуглецевої сталі на опір руйнуванню [Текст] / І. О. Вакуленко, М. А. Грищенко, О. М. Перков // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 237-239.
3. Патент № 31731 [Текст] / І. О. Вакуленко, О. М. Перков, М. М. Грищенко. – 2008, Бюл. № 8.
4. Патент № 31374 [Текст] / І. О. Вакуленко, О. М. Перков. – 2008, Бюл. № 8.
5. Вакуленко, І. О. Аналіз процесів структурних змін в металі залізничної осі за циклічного навантаження [Текст] / І. О. Вакуленко, М. А. Грищенко // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 642. – С. 69-73.
6. Вакуленко, І. О. Аналітичне дослідження діаграм циклічного навантаження [Текст] / І. О. Вакуленко, О. О. Чайковський // МТОМ. – 2009. – № 2. – С. 45-48.
7. Вакуленко, І. О. Оцінка коефіцієнта інтенсивності напружень для умов неконтрольованого зростання тріщини [Текст] / І. О. Вакуленко, М. М. Грищенко, О. М. Перков // Сб. науч. тр. «Строительство, материаловедение, машиностроение». – 2007. – Вып. 41. – Ч. 2. – С. 58-61.

Надійшла до редколегії 09.02.2010.

Прийнята до друку 15.02.2010.

В. М. БУБНОВ (ООО «ГСКБВ», Мариуполь), С. В. МЯМЛИН (ДИИТ),
Н. Л. ГУРЖИ (ООО «ГСКБВ», Мариуполь)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАГОНОВ-ПЛАТФОРМ СЕКЦИОННОГО ТИПА

Статья посвящена порівняльному аналізу витрат за повний життєвий цикл 80-футового вагона-платформи і вагона-платформи секційного типу на прикладі двох моделей фітингових вагонів-платформ для великотоннажних контейнерів виробництва ВАТ «Азовмаш». Показники порівняльної ефективності розглядаються з погляду компанії-оператора залізничних вантажних перевезень – потенційного власника вагонів-платформ.

Статья посвящена сравнительному анализу расходов за полный жизненный цикл 80-футовой вагона-платформы и вагона-платформы секционного типа на примере двух моделей фитинговых вагонов-платформ для крупнотоннажных контейнеров производства ОАО «Азовмаш». Показатели сравнительной эффективности рассматриваются с точки зрения компании-оператора железнодорожных грузовых перевозок – потенциального владельца вагонов-платформ.

The article is devoted the comparative analysis of charges for the complete life cycle of 80-foot carriage-platform and carriage-platform of sectional type on the example of two models of carriages-platforms for the containers produced by JSC “Azovmash”. The indexes of comparative efficiency are examined from a viewpoint of company-operator of railway freight transportations – a potential proprietor of carriages-platforms.

Проанализировав тенденции развития рынка, можно констатировать, что большая часть контейнерных перевозок в России и Украине осуществляется фитинговыми вагонами-платформами погрузочной длиной 80 футов. Такие платформы позволяют перевозить контейнера различных типоразмеров в разных сочетаниях. Одной из наиболее распространенных схем погрузки является четыре 20-футовых контейнера. В этом случае контейнера могут быть загружены примерно наполовину их максимально возможной грузоподъемности. Это обусловлено относительно невысокой грузоподъемностью вагона и является существенным недостатком 80-футовых платформ. Опираясь на зарубежный опыт, ОАО «Азовмаш» разработало принципиально новую для СНГ конструкцию секционной платформы для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-1839 [1]. Использование двух секций, с общей погрузочной длиной 80 футов, установленных на трех тележках, позволяет существенно увеличить грузоподъемность платформы.

Грузоподъемность вагона является одним из наиболее важных технико-экономических показателей подвижного состава и оказывает большое влияние на величину затрат при эксплуатации. На примере двух платформ производства ОАО «Азовмаш» – 80-футовой вагона-платформы модель 13-1796-04 и вагона-платформы секционного типа 13-1839 – был

выполнен сравнительный анализ затрат на протяжении всего жизненного цикла вагона.

Критерием сопоставления является минимизация текущей стоимости совокупных (инвестиционных и эксплуатационных) расходов на выполнение одинаковых объемов перевозок с использованием вагонов обоих типов в одинаковых условиях на протяжении жизненного цикла рассматриваемых вагонов. При этом, поскольку определяются показатели сравнительной эффективности, учитываются лишь расходы, которые отличаются по вариантам освоения одинакового объема перевозок разными моделями вагонов.

Показатели сравнительной эффективности определяются с точки зрения компании-оператора железнодорожных грузовых перевозок – потенциального владельца вагонов-платформ, которые рассматриваются. Предполагается освоение объема перевозок 1000 тыс. т в год на расстояние 500 км. контейнерными отправлениями в 20-тифутовых контейнерах, которые также принадлежат компании-оператору перевозок – владельцу вагонов, которые следуют в загруженном состоянии в прямом направлении и в пустом состоянии в обратном направлении.

Рассматриваемые вагоны имеют следующие основные технико-экономические параметры:

Модель 13-1839:

– грузоподъемность – 109,5 т;

- масса тары – 30,7 т;
- количество осей – 6;
- количество 20-футовых контейнеров, которые могут быть загружены, – 4.

Модель 13-1796-04:

- грузоподъемность – 70 т;
- масса тары – 23,6 т;
- количество осей – 4;
- количество 20-футовых контейнеров, которые могут быть загружены, – 4.

Предусматривается использование стандартных 20-тифутовых контейнеров с такими основными характеристиками:

- масса тары контейнера 2,25 т;
- масса брутто контейнера до 30,48 т [2].

Исходя из грузоподъемности вагонов, определяется максимальный вес брутто контейнеров, которые могут быть загружены на одну платформу:

Модели 13-1796-04:

$$P_{бр0}^{кон} = \frac{70}{4} = 17,5 \text{ т.}$$

Модели 13-1839:

$$P_{бр1}^{кон} = \frac{109,5}{4} = 27,375 \text{ т.}$$

Таким образом, расчетный вес нетто груза в контейнере составляет.

Для вагона-платформы модели 13-1796-04:

$$P_{нет0}^{кон} = 17,5 - 2,25 = 15,25 \text{ т.}$$

Для секционного вагона-платформы модели 13-1839:

$$P_{нет1}^{кон} = 27,375 - 2,25 = 25,125 \text{ т.}$$

Таким образом, статическая нагрузка без учета массы контейнеров для вагонов составляет:

Модели 13-1796-04:

$$P_{ст0} = 15,25 \cdot 4 = 61 \text{ т}$$

Модели 13-1839:

$$P_{ст1} = 25,125 \cdot 4 = 100,5 \text{ т}$$

Определенные статические нагрузки вагонов позволяют рассчитать среднее суточное отправление вагонов:

Модели 13-1796-04:

$$U_0 = \frac{10^6}{61 \cdot 365} = 44,9 \text{ ваг.}$$

Модели 13-1839:

$$U_1 = \frac{10^6}{100,5 \cdot 365} = 27,3 \text{ ваг.}$$

Среднее суточное отправление контейнеров в вагонах составляет:

$$\text{Модели 13-1796-04: } u_0 = 44,9 \cdot 4 = 179,6 \text{ кон.}$$

Модели 1839: $u_1 = 27,3 \cdot 4 = 109,2 \text{ кон.}$

При среднем обороте вагонов 3,5 сутки рабочий парк вагонов составляет:

Модели 13-1796-04:

$$n_{р.в0} = 44,9 \cdot 3,5 = 157,2 \text{ ваг.}$$

Модели 13-1839:

$$n_{р.в1} = 27,3 \cdot 3,5 = 95,6 \text{ ваг.}$$

Для среднего оборота контейнеров 4,5 сутки (большой за счет времени пребывания под грузовыми операциями) рабочий парк контейнеров составляет:

Для вагона-платформы модели 13-1796-04:

$$n_{р.к0} = 179,6 \cdot 4,5 = 808,2 \text{ кон.}$$

Для секционного вагона-платформы модели 13-1839:

$$n_{р.к1} = 109,2 \cdot 4,5 = 491,4 \text{ кон.}$$

Коэффициент, что учитывает пребывание вагонов и контейнеров в ремонте и резерве, принимается равным 1. Таким образом, общий парк вагонов составляет:

Модели 13-1796-04:

$$n_{з.в0} = 157,2 \cdot 1,1 = 173 \text{ ваг.}$$

Модели 13-1839:

$$n_{з.в1} = 95,6 \cdot 1,1 = 105 \text{ ваг.}$$

Общий парк контейнеров составляет:

Для вагона-платформы модели 13-1796-04:

$$n_{з.к0} = 808,2 \cdot 1,1 = 889 \text{ кон.}$$

Для секционного вагона-платформы модели 13-1839:

$$n_{з.к1} = 491,4 \cdot 1,1 = 541 \text{ кон.}$$

По данным вагоностроительного завода ОАО «Азовмаш», себестоимость производства вагона-платформы модели 13-1796-04 составляет 319 тыс. грн, а вагона-платформы модели 13-1839 – 510 тыс. грн. Цены вагонов определены с учетом рентабельности 10 % и составляют: для вагона 13-1796-04 – 350,9 тыс. грн, для вагона 13-1839 – 561 тыс. грн без НДС. Цена стандартного контейнера достигает 18,3 тыс. грн без НДС. По указанным ценам определяют инвестиции компании-оператора грузовых перевозок в формирование парка вагонов и контейнеров при условии использования:

Вагона модели 13-1796-04:

$$K = 173 \cdot 350,9 + 889 \cdot 18,3 = 76974,4 \text{ тыс. грн.}$$

Вагона модели 13-1839:

$$K = 105 \cdot 561 + 541 \cdot 18,3 = 67805,3 \text{ тыс. грн.}$$

Кроме инвестиционных расходов по вариантам инвестирования в модели вагонов, которые сравниваются, отличаются определенные составляющие операционных расходов компании-оператора, а именно: расходы на ремонты

вагонов и затраты на оплату услуг железных дорог за перевозки грузов контейнерными отправлениями и пустых контейнеров.

Сравнимость расходов во времени обеспечивается с помощью их дисконтирования. Моментом приведения является начало жизненного цикла вагона. Для этого учитываются риски, связанные с инвестированием в парк вагонов, в работе используется метод увеличения ставки дисконта на премию за риск. Ставка дисконта определяется методом кумулятивного построения (суммирование) и включает такие составляющие:

- безрисковая ставка в размере 6,5 % (установленная согласно приказа Фонда государственного имущества Украины от 04.06.2009 г. № 844);

- премия за низкую ликвидность в размере 3,25 % (определенная исходя из безрисковой ставки и срока реализации подобного имущества 6 мес.: $6,5 \cdot 6/12 = 3,25$);

- премия за отраслевой риск в размере 2,1 % (установленная согласно с приложением к приказу Фонда государственного имущества Украины от 04.06.2009 г. № 844 для вида экономической деятельности «Деятельность транспорта и связи»);

- премия за другие риски в размере 4 % (середина интервала премий за риск инвестирования в подвижной состав железнодорожного транспорта) согласно [3].

Таким образом, общая величина ставки дисконта составляет:

$$R = 6,5 + 3,25 + 2,1 + 4 = 15,85 \%$$

Из определенной ставки дисконта не исключается налог на прибыль, потому и в составе денежных потоков налогообложения прибыли предприятий не учитывается.

Текущая стоимость расходов на ремонт одного вагона определяется по формуле:

$$C_r = \sum_{i=1}^n c_i \cdot (1 + R)^{-t}$$

где C_r – суммарная текущая стоимость расходов на ремонты (деповские и капитальные) одного вагона, тыс. грн;

c_i – стоимость i -го ремонта, тыс. грн;

n – количество ремонтов на протяжении срока полезного использования вагона;

R – ставка дисконта (частица);

t – период времени от начала эксплуатации до проведения i -го ремонта, лет.

По данным Приднепровской железной дороги, стоимость деповского ремонта 4-осного вагона-платформы в 2009 году составляет 12,5 тыс. грн без НДС, а стоимость капитального ремонта – 37,5 тыс. грн без НДС. Стоимость ремонтов для вагона модели 13-1796-04 принята на указанном уровне. Стоимость ремонтов для 6-осного секционного вагона-платформы модели 13-1839 установлена на основе указанных величин стоимостей с учетом большего количества тележек (три против двух) и большей длины вагона (29,16 м против 25,69 м). Стоимости ремонтов для вагона 13-1839 определены на уровне 17,4 тыс. грн для деповского и 52,2 тыс. грн для капитального.

Схемы ремонтов вагонов определены исходя из норм пробега для проведения деповского ремонта 210 тыс. км после приобретения и капитального ремонта и 160 тыс. км после деповского ремонта (для обеих моделей вагонов). При этом капитальный ремонт вагона 13-1796-04 проводится на 17-ом году эксплуатации, а вагона 13-1839 – на 16-ом. Для определения периода времени от начала эксплуатации до проведения ремонта определен средний годовой пробег вагонов с учетом пребывания в ремонте и резерве:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot 365}{O_v \cdot 1,1} \cdot 10^{-3} = \frac{2 \cdot 500 \cdot 365}{3,5 \cdot 1,1} \cdot 10^{-3} = 94,8 \text{ тыс. км,}$$

где L – плечо оборота, км.;

O_v – длительность оборота вагона, суток;

1,1 – коэффициент, который учитывает пребывание вагонов в ремонте и резерве.

Период времени до проведения ремонта определяется делением пробега на средний годовой пробег.

Расчет текущей стоимости ремонтов приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Текущая стоимость ремонтов вагона модели 13-1796-04

| Пробег, тыс. км | Тип ремонта | Период времени до ремонта (t) | Стоимость ремонта (c), тыс. грн | Фактор текущей стоимости $(1 + R)^{-t}$ | Текущая стоимость, тыс. грн |
|-----------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------------|
| 210 | ДР | 2,22 | 12,5 | 0,72136 | 9,02 |
| 370 | ДР | 3,9 | 12,5 | 0,56339 | 7,04 |
| 530 | ДР | 5,59 | 12,5 | 0,43936 | 5,49 |

Таблица 1 (окончание)

| Пробег, тыс. км | Тип ремонта | Период времени до ремонта (t) | Стоимость ремонта (c), тыс. грн | Фактор текущей стоимости $(1+R)^{-t}$ | Текущая стоимость, тыс. грн |
|-----------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 690 | ДР | 7,28 | 12,5 | 0,34264 | 4,28 |
| 850 | ДР | 8,97 | 12,5 | 0,26721 | 3,34 |
| 1010 | ДР | 10,65 | 12,5 | 0,20869 | 2,61 |
| 1170 | ДР | 12,34 | 12,5 | 0,16275 | 2,03 |
| 1330 | ДР | 14,03 | 12,5 | 0,12692 | 1,59 |
| 1490 | КР | 15,72 | 37,5 | 0,09898 | 3,71 |
| 1700 | ДР | 17,93 | 12,5 | 0,07151 | 0,89 |
| 1860 | ДР | 19,62 | 12,5 | 0,05576 | 0,70 |
| 2020 | ДР | 21,31 | 12,5 | 0,04349 | 0,54 |
| 2180 | ДР | 23 | 12,5 | 0,03391 | 0,42 |
| 2340 | ДР | 24,68 | 12,5 | 0,02649 | 0,33 |
| 2500 | ДР | 26,37 | 12,5 | 0,02066 | 0,26 |
| 2660 | ДР | 28,06 | 12,5 | 0,01611 | 0,20 |
| 2820 | ДР | 29,75 | 12,5 | 0,01256 | 0,16 |
| 2980 | ДР | 31,43 | 12,5 | 0,00981 | 0,12 |
| Вместе | | | 250 | | 42,74 |

Таким образом, общая текущая стоимость ремонта парка вагонов модели 13-1796-04 составляет: $42,74 \cdot 173 = 7387,1$ тыс. грн, а парка вагонов модели 13-1839: $58,84 \cdot 105 = 6174,8$ тыс. грн.

Расходы на оплату услуг железных дорог за перевозки определяются на основании [4]. Согласно тарифной схеме 10.3, плата за перевозку одного загруженного частного контейнера в частном вагоне на расстояние 500 км составляет 1068 грн без НДС, а плата за перевозку одного пустого контейнера на такое же расстояние составляет 773 грн без НДС (тарифная схема 10.6). Таким образом, расходы на оплату услуг железных дорог за перевозки на один рейс за один контейнер составляют $1068 + 773 = 1841$ грн без НДС. Количество отправленных контейнеров за один год определяется как отношение годового объема отправления грузов к нетто-загруженности одного контейнера. Общие годовые расходы на оплату услуг железных дорог за перевозки определяются как произведение расходов на один контейнер и количества отправленных контейне-

ров. Общие годовые расходы на оплату услуг железных дорог за перевозки составляют:

Для вагона модели 13-1796-04:

$$c_{p0} = \frac{10^6}{15,25} \cdot 1841 \cdot 10^{-3} = 120722 \text{ тыс. грн.}$$

Для вагона модели 13-1839:

$$c_{p1} = \frac{10^6}{25,125} \cdot 1841 \cdot 10^{-3} = 73274 \text{ тыс. грн.}$$

Таблица 2

Текущая стоимость ремонтов вагона модели 13-1839

| Пробег, тыс. км | Тип ремонта | Период времени до ремонта (t) | Стоимость ремонта (c), тыс. грн | Фактор текущей стоимости $(1+R)^{-t}$ | Текущая стоимость, тыс. грн |
|-----------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 210 | ДР | 2,22 | 17,4 | 0,72136 | 12,55 |
| 370 | ДР | 3,9 | 17,4 | 0,56339 | 9,80 |
| 530 | ДР | 5,59 | 17,4 | 0,43936 | 7,64 |
| 690 | ДР | 7,28 | 17,4 | 0,34264 | 5,96 |
| 850 | ДР | 8,97 | 17,4 | 0,26721 | 4,65 |
| 1010 | ДР | 10,65 | 17,4 | 0,20869 | 3,63 |
| 1170 | ДР | 12,34 | 17,4 | 0,16275 | 2,83 |
| 1330 | ДР | 14,03 | 17,4 | 0,12692 | 2,21 |
| 1490 | ДР | 15,72 | 17,4 | 0,09898 | 1,72 |
| 1650 | КР | 17,41 | 52,2 | 0,07719 | 4,03 |
| 1860 | ДР | 19,62 | 17,4 | 0,05576 | 0,97 |
| 2020 | ДР | 21,31 | 17,4 | 0,04349 | 0,76 |
| 2180 | ДР | 23 | 17,4 | 0,03391 | 0,59 |
| 2340 | ДР | 24,68 | 17,4 | 0,02649 | 0,46 |
| 2500 | ДР | 26,37 | 17,4 | 0,02066 | 0,36 |
| 2660 | ДР | 28,06 | 17,4 | 0,01611 | 0,28 |
| 2820 | ДР | 29,75 | 17,4 | 0,01256 | 0,22 |
| 2980 | ДР | 31,43 | 17,4 | 0,00981 | 0,17 |
| Вместе | | | 348 | | 58,84 |

Указанные расходы образуют аннуитет на протяжении срока полезного использования вагонов (32 года). Потому их текущая стоимость за весь срок определяется за формулой:

$$C_p = c_p \cdot \frac{1 - (1+R)^{-T}}{R},$$

где C_p – общие текущие расходы на оплату услуг железных дорог за перевозки за весь срок

полезного использования вагонов (жизненный цикл инвестиций), тыс. грн;

c_p – годовые расходы на оплату услуг железных дорог за перевозки, тыс. грн;

T – срок полезного использования вагонов, лет.

Таким образом, общие текущие расходы на оплату услуг железных дорог за перевозки за весь срок полезного использования вагонов составляют:

Для вагонов модели 13-1796-04:

$$C_{p0} = 120722 \cdot \frac{1 - (1 + 0,1585)^{-32}}{0,1585} = 754781,0 \text{ тыс. грн.}$$

Для вагонов модели 13-1839:

$$C_{p1} = 73274 \cdot \frac{1 - (1 + 0,1585)^{-32}}{0,1585} = 458125,5 \text{ тыс. грн.}$$

Общие расходы на жизненный цикл вагона составляют:

Модели 13-1796-04:

$$C_0 = 76974,4 + 7387,1 + 754781,0 = 839142,5 \text{ тыс. грн.}$$

Модели 13-1839:

$$C_1 = 68805,3 + 6174 + 458125,5 = 533104,8 \text{ тыс. грн.}$$

Таким образом, при освоении одинакового объема перевозок суммарные расходы железнодорожной компании-оператора на жизненный цикл парка вагонов модели 13-1839 значительно ниже (на 36,5 %), чем модели 13-1796-04. Такой эффект достигается, в первую очередь, из-за экономии расходов на оплату услуг железных дорог за перевозки, которая получается за счет большего использования грузоподъемности контейнеров при внедрении секционного вагона-платформы модели 13-1839.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуржи, Н. Л. Разработка конструкции шарнирно-соединенного вагона-платформы для крупнотоннажных контейнеров [Текст] // Зб. наук. пр. – Донецк: ДонИЖТ, 2009. – Вып. № 17. – С. 136-145.
2. НД №2-090201-008. Правила изготовления контейнеров [Текст] / Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2009.
3. Методы экономической оценки инвестиционных проектов на транспорте [Текст] : учеб.-метод. пособие / сост. Ю. Ф. Кулаев. – К.: Транспорт України, 2001. – 182 с.
4. Сборник тарифов на перевозку грузов железнодорожным транспортом в пределах Украины и связанные с ними услуги [Текст] : Утв.: Приказ Министерства транспорта и связи Украины от 26.03.2009 № 317.

Поступила в редколлегию 31.03.2010.

Принята к печати 08.04.2010.

СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАРТІСНОГО ФІЗИЧНОГО ЗНОСУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ, ЩО НЕ ВІДНОВЛЮЮТЬСЯ

У статті розроблено методичний підхід до визначення вартісного фізичного зносу об'єкта оцінки, що може бути розглянутий як технічна система, що не відновлюється, який заснований на стохастичному моделюванні залишкового терміну напрацювання до відмови об'єкта оцінки та напрацювання до відмови нового об'єкта, подібного об'єкту оцінки. Коефіцієнт придатності визначається як математичне сподівання випадкової величини, що є результатом відношення відповідних випадкових величин – напрацювань до відмови. Визначені моделі для декількох типів законів розподілу.

В статье разработан методический подход определения стоимостного физического износа объекта оценки, который может рассматриваться как невосстанавливаемая техническая система, основанный на стохастическом моделировании остаточного срока наработки на отказ объекта оценки и наработки на отказ нового объекта, подобного объекту оценки. Коэффициент пригодности определяется как математическое ожидание случайной величины, являющейся результатом деления соответствующих случайных величин, – наработок на отказ. Определены модели для нескольких типов законов распределения.

A methodical approach for determination of cost physical wear of object of estimation, which can be examined as an unrestorable technical system, is developed in the article. This approach is based on the stochastic design of remaining time of the operation-to-failure of object of estimation and the operation-to-failure time of a new object similar to the object of estimation. The coefficient of suitability is determined as the expected casual value as a result of division of the proper casual values – the operation-to-failure times. The models for a few types of distributive laws are developed.

Постановка проблеми

При оцінці майна у матеріальній формі, як правило, постає задача визначення зносу об'єкта оцінки. Ця операція є однією з оціночних процедур витратного підходу [1]. При реалізації ж порівняльного або доходного підходів визначення зносу може бути потрібне для внесення коригувань до цін або орендних плат об'єктів порівняння. Отже, визначення зносу об'єкта оцінки (у вартісній формі) є однією з основних складових оціночних робіт з незалежної оцінки майна.

Особливо важливим та відповідальним з точки зору кінцевого результату є визначення зносу спеціалізованого (у розумінні стандартів оцінки) майна. Для такого майна характерним є відсутність ринкової інформації щодо подібних об'єктів, що не дозволяє визначити ринкові оцінки зносу. У цьому випадку основним є витратний оціночний підхід, а розмір зносу, що встановлює оцінювач, безпосередньо визначає кінцевий результат оцінки – залишкову вартість заміщення (відтворення).

За визначенням національних стандартів оцінки під зносом розуміється «втрата вартості майна порівняно з вартістю нового майна. Знос за ознаками його виникнення поділяють на фізичний, функціональний та економічний (зовнішній)» [1]. У цій роботі розглядається моде-

лювання фізичного зносу, під яким розуміють «знос, зумовлений частковою або повною втраченою первісних технічних та технологічних якостей об'єкта оцінки» [1]. Тобто фізичний знос у цій роботі розглядається саме як втрата вартості внаслідок зміни технічних та технологічних якостей (економічна категорія), а не як технічна категорія, що відбиває ступень зміни цих технічних та технологічних якостей. Вплив функціонального та економічного зносу у цій роботі не розглядається.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На теперішній час відомо багато методів визначення фізичного зносу об'єктів оцінки у матеріальній формі [2, с. 161-170, 306-316, 356-359]:

– нормативний – оцінка фізичного зносу за його зовнішніми ознаками та встановленими нормативами;

– вартісний – фізичний знос визначається витратами на його усунення;

– метод ефективного віку – фізичний знос визначають співвідношенням хронологічного віку або ефективного віку із загальним терміном економічного життя об'єкта оцінки;

– метод експертного аналізу фізичного стану – фізичний знос визначається методом експертних оцінок. При цьому використовують

певні типові шкали, що відрізняються для різни типів об'єктів;

– метод втрати продуктивності – фізичний знос визначається за співвідношенням продуктивності об'єкта оцінки з продуктивністю нового подібного об'єкту з урахуванням дії закону економії на масштабі;

– метод втрати прибутковості – фізичний знос визначається за співвідношенням прибутковості об'єкта оцінки з прибутковістю нового подібного об'єкта;

– метод стадії ремонтного циклу та інші.

Вказані методи мають суттєві недоліки. Так, нормативний метод може застосовуватись лише для об'єктів, щодо яких розроблені нормативи зносу. Вартісний метод за своєю суттю не враховує знос, який не усувається. Метод експертного аналізу фізичного стану характеризується великим суб'єктивізмом. Методи втрати продуктивності та зменшення доходності можуть застосовувати лише для об'єктів, продуктивність та доходність яких у процесі експлуатації зменшується поступово. Метод стадії ремонтного циклу розроблений лише для об'єктів, що експлуатуються за системою планово-попереджувальних ремонтів. Найбільш загальним методом визначення фізичного зносу, на наш погляд, є метод ефективного віку, бо саме цей метод встановлює відповідність фізичного зносу із зменшення ресурсу об'єкта оцінки. Однак потребують суттєвого удосконалення методи встановлення залишкового та загального термінів економічного життя. Необхідно враховувати той факт, що обидва ці показники стосуються майбутнього. Тому вони мають невизначену природу і не можуть бути встановлені точно, а прогнозуються.

Формулювання цілі статті

Задачею цієї роботи є розробка методу визначення фізичного зносу об'єкта оцінки у матеріальній формі, який класифікується як технічна система, що не відновлюється. Вказаний метод ґрунтується на стохастичній моделі економічного строку життя об'єкта оцінки, що дозволяє застосовувати добре розроблений інструментальний апарат теорії надійності технічних систем для цілей оцінки майна.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів

В основу найпростішої стохастичної моделі фізичного зносу об'єкта оцінки покладені такі передумови:

1. Об'єкт оцінки розглядається як технічна система, що складається з одного елемента.

2. Об'єкт оцінки є технічною системою, що не відновлюється.

3. Об'єкт оцінки досягає граничного стану (у термінах теорії надійності систем [3, с. 6]) у момент першої відмови (наслідок перших двох передумов).

Розмір фізичного зносу характеризує коефіцієнт придатності, який функціонально зв'язаний з відносним фізичним зносом (визначається як різниця між одиницею і відносним фізичним зносом, вираженим у частках). Слід відзначити, що залишкова вартість заміщення не може бути менша за вартість ліквідації, тому першу доцільно визначити за формулою:

$$B_{звз} = B_{л} + K_{п} \cdot (B_{з} - B_{л}), \quad (1)$$

де $B_{звз}$ – залишкова вартість заміщення (відтворення), грн;

$B_{л}$ – вартість ліквідації (якщо $B_{л} \leq 0$, слід прийняти $B_{л} = 0$), грн;

$B_{з}$ – вартість заміщення (відтворення), грн;

$K_{п}$ – коефіцієнт придатності, який змінюється у діапазоні $0 \leq K_{п} \leq 1$, та відбиває залишковий ресурс об'єкта оцінки.

Коефіцієнт придатності повинен визначатись, виходячи з порівняння ресурсу об'єкта оцінки з ресурсом нового подібного об'єкта, за яким встановлено вартість заміщення (відтворення). При цьому в основі визначення ресурсів повинно бути покладено припущення про майбутню експлуатацію цих об'єктів у однакових умовах, які є типовими для подібних об'єктів (вони можуть відрізнятись від умов, у яких фактично експлуатувався об'єкт оцінки до дати оцінки).

Загальним вимірником ресурсу технічної системи є час, упродовж якого вона зберігає працездатність. Для передумов, вказаних вище, це буде напрацювання до відмови. Тобто, для випадку, що розглядається, термін економічного життя є напрацюванням до відмови.

Відмова – це випадкова подія, яка полягає у порушенні працездатності технічної системи під впливом ряду випадкових факторів [3, с. 7]. Таким чином, напрацювання до відмови – це випадкова величина, яка є проміжком часу від початку експлуатації технічної системи до першої відмови [3, с. 11].

Таким чином, загальний ресурс (термін економічного життя) нового об'єкта, подібного до об'єкта оцінки, який є носієм вартості заміщення (відтворення), відбиває випадкова величина

на – напрацювання до відмови. Відповідно, залишковий ресурс об'єкта оцінки (залишковий термін економічного життя) відбиває інша випадкова величина, яку за аналогією можна назвати залишкове напрацювання на відмову. Слід відзначити, що ці випадкові величини є незалежними, оскільки об'єкт оцінки і новий об'єкт – носій вартості заміщення (відтворення), є різними об'єктами.

Таким чином, коефіцієнт придатності також є випадковою величиною, яка визначається відношення випадкових величин – залишкового напрацювання до відмови об'єкта оцінки та напрацювання до відмови нового об'єкта – носія вартості заміщення (відтворення). На наш погляд, для цілей оцінки доцільно визначити коефіцієнт придатності як математичне сподівання вказаної випадкової величини:

$$K_n = M\left(\frac{Y}{T}\right), \quad (2)$$

де Y – випадкова величина – залишкове напрацювання до відмови об'єкта оцінки;

T – випадкова величина – напрацювання до відмови нового об'єкта, подібного об'єкту оцінки, який є носієм вартості заміщення (відтворення).

Відомо, що математичне сподівання добутку двох незалежних випадкових величин визначається як добуток їх математичних сподівань. Тому формула (2) приймає вигляд:

$$K_n = M(Y) \cdot M\left(\frac{1}{T}\right). \quad (3)$$

Формула (3) дозволяє визначити коефіцієнт придатності без визначення закону розподілу відповідної випадкової величини у явному вигляді за законами розподілу випадкових величин Y та T .

За своєю природою випадкові величини Y та T є безперервними та ненегативними. Інтегральні функції розподілу цих величин відбивають так звані функції ненадійності, а диференціальній – щільності розподілу часу безвідмовної роботи [3, с. 12].

Для визначення математичного сподівання випадкової величини T^{-1} доцільно виразити її щільність розподілу через щільність розподілу випадкової величини T . Припустимо, що $F_T(t)$ є інтегральною функцією розподілу випадкової величини T . Тобто ймовірність $P(T < t) = F_T(t)$. Тоді щільністю розподілу ви-

падкової величини T є функція $f_T(t) = \frac{dF_T(t)}{dt}$.

Справедливим є рівність $P(T < t) = P\left(\frac{1}{T} > \frac{1}{t}\right)$.

Тоді ймовірність $P\left(\frac{1}{T} < \frac{1}{t}\right) = 1 - P\left(\frac{1}{T} > \frac{1}{t}\right) = 1 - P(T < t)$. Тобто, при заміні змінної $x = t^{-1}$ інтегральна функція розподілу випадкової величини T^{-1} має вигляд $F_{T^{-1}}(x) = 1 - F_T(t) = 1 - F_T\left(\frac{1}{x}\right)$. Таким чином, щільність розподілу

випадкової величини T^{-1} визначається як:

$$f_{T^{-1}}(x) = \frac{d\left(1 - F_T\left(\frac{1}{x}\right)\right)}{dx} = \frac{1}{x^2} \cdot f_T\left(\frac{1}{x}\right). \quad (4)$$

Таким чином, формула (3) приймає вигляд:

$$K_n = \left(\int_0^{+\infty} t \cdot f_Y(t) \cdot dt\right) \cdot \left(\int_0^{+\infty} \frac{1}{x} \cdot f_T\left(\frac{1}{x}\right) \cdot dx\right). \quad (5)$$

Вид та параметри щільностей розподілів $f_Y(t)$ та $f_T(t)$ встановлюються шляхом проведення апіорного та/або апостеріорного аналізів надійності [3, с. 10].

Розглянемо аналітичні вирази формули (5) для декількох типів розподілу.

Рівномірний розподіл.

При такому типі розподілів щільності розподілів випадкових величин Y та T мають вигляд:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < a; \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq t \leq b; \\ 0, & t > b. \end{cases}$$

Тоді коефіцієнт придатності визначається за формулою:

$$K_n = \left(\int_{a_Y}^{b_Y} \frac{t}{b_Y - a_Y} \cdot dt\right) \cdot \left(\int_{\frac{1}{b_T}}^{\frac{1}{a_T}} \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{b_T - a_T} \cdot dx\right) = \frac{a_Y + b_Y}{2} \cdot \frac{\ln b_T - \ln a_T}{b_T - a_T}. \quad (6)$$

Трикутний розподіл (або Δ -розподіл).

При такому типі розподілів щільності розподілів випадкових величин Y та T мають вигляд:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < a; \\ \frac{2 \cdot (t-a)}{(b-a) \cdot (c-a)}, & a \leq t \leq c; \\ \frac{2 \cdot (b-t)}{(b-a) \cdot (b-c)}, & c < t \leq b; \\ 0, & t > b. \end{cases}$$

Параметрами трикутного закону розподілу є межі, у яких випадкова величина приймає значення (a, b) , та мода щільності розподілу (c) .

У цьому випадку коефіцієнт придатності задається формулою:

$$K_{\Pi} = \left(\int_{a_Y}^{c_Y} t \cdot \frac{2 \cdot (t-a_Y)}{(b_Y-a_Y) \cdot (c_Y-a_Y)} \cdot dt + \int_{c_Y}^{b_Y} t \cdot \frac{2 \cdot (b_Y-t)}{(b_Y-a_Y) \cdot (b_Y-c_Y)} \cdot dt \right) \times$$

$$\times \left(\int_{\frac{1}{c_T}}^{\frac{1}{a_T}} \frac{1}{x} \cdot \frac{2 \cdot \left(b_T - \frac{1}{x}\right)}{(b_T-a_T) \cdot (b_T-c_T)} \cdot dx + \int_{\frac{1}{b_T}}^{\frac{1}{a_T}} \frac{1}{x} \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{1}{x} - a_T\right)}{(b_T-a_T) \cdot (c_T-a_T)} \cdot dx \right) =$$

$$= \frac{a_Y + c_Y + b_Y}{3} \cdot \frac{2}{b_T - a_T} \times$$

$$\times \left(b_T \cdot \frac{\ln b_T - \ln c_T}{b_T - c_T} - a_T \cdot \frac{\ln c_T - \ln a_T}{c_T - a_T} \right). \quad (7)$$

Експоненціальний закон розподілу.

Для цього закону розподілу характерним є постійне значення інтенсивності відмов, яка дорівнює зворотній величині середнього напрацювання на відмову (математичне сподівання напрацювання до відмови) [3, с. 16-17].

У цьому випадку щільності розподілів випадкових величин Y та T задаються функціями:

$$f_Y(t) = \lambda_Y \cdot e^{-\lambda_Y \cdot t};$$

$$f_T(t) = \lambda_T \cdot e^{-\lambda_T \cdot t}.$$

Параметр λ експоненціального розподілу характеризує інтенсивність відмов технічної системи.

Для такого випадку коефіцієнт придатності дорівнює:

$$K_{\Pi} = \left(\int_0^{+\infty} \lambda_Y \cdot t \cdot e^{-\lambda_Y \cdot t} \cdot dt \right) \cdot \left(\int_0^{+\infty} \frac{\lambda_T}{x} \cdot e^{-\frac{\lambda_T}{x}} \cdot dx \right) =$$

$$= \frac{\lambda_T}{\lambda_Y} \cdot \int_0^{+\infty} \frac{e^{-\frac{\lambda_T}{x}}}{x} \cdot dx. \quad (8)$$

Інтеграл у формулі (8) не виражається в елементарних функціях.

Слід відзначити, що закони розподілу випадкових величин Y та T можуть відрізнятися не лише за параметрами, а і за типами. Тоді можна привести різні комбінації формул (6)–(8). У теорії надійності систем розглядаються і інші типи законів розподілу [3, с. 31-45]. Ідентифікація та визначення параметрів цих законів розподілу, багато у чому, залежить від вихідних даних, що має оцінювач, та методів, які він використовує. У загальному випадку, для визначення коефіцієнта придатності зручним є застосування методу статичних випробувань, які проводяться за моделлю (2).

Висновки

Розроблена у роботі стохастична модель дозволяє визначати коефіцієнт придатності фізичного зносу за параметрами щільностей розподілів напрацювання до відмови, що дає змогу визначити взаємозв'язок показників надійності технічних систем та фізичного зносу об'єкта оцінки як економічної категорії. Цей взаємозв'язок дозволяє використовувати у процесі незалежної оцінки майна методи апіорного та апостеріорного аналізів надійності технічних систем.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Національний стандарт № 1 «Загальні засади оцінки майна і майнових прав» [Текст] : Затв.: Постанова Кабінету Міністрів України від 10.09.2003 № 1440 .
2. Оценка имущества и имущественных прав [Текст] / Ю. Гарбар и др.; под общ. ред. С. Скрынько. – К.: ООО «УКЦ «Эксперт-Л», 2007. – 746 с.
3. Матвеевский, В. Р. Надежность технических систем [Текст] : учеб. пособие / В. Р. Матвеевский; Московский гос. ин-т электроники и математики. – М., 2002. – 113 с.

Надійшла до редколегії 23.02.2010.

Прийнята до друку 26.02.2010.

ОСОБЛИВОСТІ ІНОЗЕМНИХ ІНВЕСТИЦІЙ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЕКОНОМІКУ ДЕРЖАВИ

В даній статті досліджено і проаналізовано важливість прямих іноземних інвестицій для України та наведено основні країни-інвестори. Також розглянуто роль транснаціональних компаній та їх вплив на країни-реципієнти інвестицій і проаналізовано варіанти поведінки на ринках країн в залежності від їх цілей. Розглянуто переваги і недоліки від впливу іноземних інвестицій.

В данной статье изучена и проанализирована важность прямых иностранных инвестиций для Украины, и приведены основные страны-инвесторы. Также рассмотрена роль транснациональных компаний и их влияние на страны-реципиенты инвестиций и проанализированы варианты поведения на рынках стран в зависимости от их целей. Рассмотрены преимущества и недостатки от влияния иностранных инвестиций.

In this article the importance of foreign direct investments for Ukraine are analyzed and studied, and main investors are described. Also the role of transnational companies and their influence on recipient countries are studied, and the basic strategies on the markets of countries depending on their aims are analyzed. The advantages and disadvantages of foreign investments are described.

Класичний аналіз, який базується на моделі Маршалла, доводить, що іноземні інвестиції є корисними як для країни-інвестора, так і для країни-реципієнта. Зокрема, із суто економічної точки зору, іноземні інвестиції приносять країні-реципієнтові більше користі, ніж шкоди [1]. Працівники і постачальники новостворених підприємств разом з урядом, який отримує податки, виграють більше, ніж втрачають конкуруючі місцеві компанії та інвестори.

Щоб освітити важливість прямих іноземних інвестицій (ПІІ) для економіки України та оцінити їх обсяг, достатньо проаналізувати дані табл. 1. Для кращого розуміння порядку цифр, слід підкреслити, що у відносному вираженні ПІІ у 2007 р. складала – 5,7 % ВВП (або 8,3034 млрд дол. США), а у 2008 р. – 3,7 % ВВП (або 6,2340 млрд дол. США).

Крім того, додатковим результатом ПІІ в економіку країни-реципієнта є отримання нею непрямих технологічних ефектів, тобто підвищення загального технологічного рівня і кваліфікації персоналу. На жаль, цей останній ефект несумісний з високими податковими ставками, тому в більшості випадків країна-реципієнт змушена вибирати між реальною, хоча й доволі короткостроковою, унаслідок існування системи трансфертних цін, фінансовою вигодою і доволі непомітним, але надзвичайно важливим для розвитку економіки, підвищенням загального технологічного рівня.

Одночасно суттєвим недоліком експансії транснаціональних корпорацій (ТНК) – а саме на ТНК припадає найбільша частка ПІІ – на ринок будь-якої країни є можливість виникнен-

ня певних пов'язаних із цим політичних ускладнень:

По-перше, цілком природними є протести працівників компаній-конкурентів тієї ТНК, особливо у випадку можливого банкрутства цих компаній.

По-друге, найбільші ТНК за своєю могутністю не поступаються деяким державам. А за таких умов, коли існуючі правила гри на відповідному ринку не задовольнятимуть керівництво ТНК, то вона сама здатна змінити ці правила шляхом підкупу, політичного тиску чи навіть перевороту. Як приклад – профінансований американською компанією «ІТТ» переворот у Чилі в 1972 р., унаслідок якого було повалено уряд С. Альєнде.

Українські споживачі також мали змогу відчувати, лобістську потужність ТНК та її наслідки у вигляді різкого подорожчання автомобілів після прийняття під тиском «Daewoo» ряду обмежень щодо їх імпорту – наприклад, Закону України «Про стимулювання виробництва автомобілів» від 19 вересня 1997 р. Більше того, на додачу до цього закону, котрий передбачає суттєві податкові пільги для інвесторів української автомобілебудівної галузі, корейській стороні вдалося пролобіювати впровадження додаткових тарифних і нетарифних обмежень на імпорт в Україну автомобілів. Тому є дуже важливим і необхідним вдосконалення механізму регулювання інвестиційних процесів в Україні для поліпшення її економічного становища та конкурентних позицій на глобальному ринку [2].

Прямі іноземні інвестиції в економіку України за країнами походження (млн дол. США)*

| Країни | Роки | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|-----------------|--|
| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 (3 кв.) | |
| Кіпр | 377,7 | 478,0 | 672,1 | 779,2 | 1 101,3 | 1 562,0 | 3 011,7 | 5 941,8 | 7 682,9 | 8 201,7 | |
| Німеччина | 240,8 | 249,5 | 317,7 | 441,4 | 626,7 | 5 505,5 | 5 620,7 | 5 917,9 | 6 393,8 | 6 580,8 | |
| Нідерланди | 362,2 | 370,2 | 396,3 | 463,9 | 564,5 | 721,8 | 1 493,0 | 2 511,2 | 3 180,8 | 3 814,2 | |
| Австрія | 50,0 | 144,1 | 210,9 | 252,1 | 352,0 | 1 423,6 | 1 600,8 | 2 075,2 | 2 445,6 | 2 564,8 | |
| Сполучене Королівство | 362,0 | 400,4 | 534,0 | 686,1 | 750,9 | 1 155,3 | 1 557,2 | 1 968,8 | 2 273,5 | 2 348,5 | |
| РФ | 286,5 | 295,1 | 323,2 | 377,6 | 407,5 | 799,7 | 980,8 | 1 462,2 | 1 851,6 | 2 061,5 | |
| США | 639,4 | 693,5 | 890,6 | 1 074,8 | 1 103,7 | 1 374,1 | 1 418,0 | 1 436,8 | 1 471,5 | - | |
| Франція | ** | 140,5 | 219,0 | 350,8 | 574,2 | - | 826,8 | 1 046,2 | 1 226,1 | 1 589,6 | |
| Віргінські острови | 212,7 | 228,2 | 346,1 | 381,0 | 543,8 | 688,7 | 808,3 | 1 045,7 | 1 316,1 | 1 340,5 | |
| Швеція | 30 | - | - | - | - | - | - | 1 006,6 | 1 263,0 | - | |
| Польща | - | - | - | - | 139,7 | 224,0 | 366,0 | 670,5 | 694,7 | 862,5 | |
| Швейцарія | 163,2 | 203,1 | - | - | 311,3 | 445,9 | 504,9 | 583,8 | 715,6 | 825,8 | |
| Угорщина | - | - | - | 100,4 | 120,3 | - | 364,5 | 400,9 | 595,5 | 715,1 | |
| Інші країни | 1 150,4 | 1 203,5 | 1 430,0 | 1 750,2 | 1 759,0 | 2 474,6 | 2 633,3 | 3 421,8 | 4 612,7 | 6 765,6 | |
| Усього | 3 874,9 | 4 406,1 | 5 339,9 | 6 657,5 | 8 354,9 | 16 375,2 | 21 186,0 | 29 489,4 | 35 723,4 | 38 591,6 | |

Обсяги прямих інвестицій в Україну та за окремими країнами-інвесторами наведено з урахуванням даних Національного банку України та Фонду державного майна України, а також Державного комітету статистики України.

* – Дані наведено нарастаючим підсумком з початку інвестування.

** – Дані відсутні.

Як бачимо, однозначної загальної рекомендації щодо того, чи повинна країна-реципієнт обмежувати ПШ, немає і бути не може, бо все залежить від конкретної ситуації. Структура різних ТНК значною мірою відрізняється залежно від основної галузі їх спеціалізації. Нафтовидобувні компанії та банки, як правило, набагато більше орієнтуються на закордонні ринки, аніж, наприклад, компанії, що задіяні в харчовій промисловості.

Однак навіть компанії, що спеціалізуються на одній галузі, можуть значно відрізнитися одна від одної. Класичний приклад: у 1992 р. американська нафтовидобувна корпорація «Еххон» мала на закордонному балансі 57 % активів, 77 % обігу і 78 % прибутків. Відповідні цифри для її конкурента «Atlantic Richfield» становлять лише 22 %, 25 % та 21 %. Аналогічно «Coca-Cola» одержує понад 80 % своїх прибутків за кордоном, а її найближчий конкурент «PepsiCo» – тільки 18 % [3].

Отож очевидно, що універсальної рекомендації тут немає і бути не може: вплив тієї чи іншої ТНК, а відповідно й оптимальна реакція країни-реципієнта повністю залежать від специфіки діяльності самої компанії.

У сучасній економічній науці домінують три основні концепції оцінки впливу ТНК на національну економіку, а відповідно – і регулювання цього впливу: зайнятості, податкових надходжень та платіжного балансу. Концепція зайнятості наголошує на необхідності залучення до виробничої діяльності ТНК місцевої робочої сили. Концепція ж податкових відрахувань зосереджується на максимізації податкової бази і, відповідно, податкових надходжень до бюджету. А концепція платіжного балансу – на поліпшенні сальдо платіжного балансу держави. При цьому неврахованими залишаються певні доволі суттєві аспекти. Концепція зайнятості зважає на інтереси національних виробників (тобто працівників відповідної галузі), проте цілковито ігнорує вплив на споживачів. Концепція податкових відрахувань зосереджується на прибутках винятково держави, ігноруючи зміни доходів і, відповідно, купівельної спроможності населення.

Визначальним критерієм при виборі оптимальної моделі поведінки стосовно тієї чи іншої ТНК також повинен бути тип ресурсів, який вона найбільше використовує у своїй діяльності. Як відомо з класичної економічної теорії, існує три основні типи ресурсів: земля, капітал і робоча сила, і відповідно до специфіки

своєї діяльності різні ТНК використовують ці ресурси в різних співвідношеннях.

Дещо спрощено цей поділ можна звести до трьох класичних типів ТНК: «мисливців за сировиною», «шукачів ринків» та «мінімізаторів витрат».

При розгляді оптимальних моделей поведінки держави стосовно різних ТНК доцільно виходити саме з цієї типології [4].

1) Мисливці за сировиною.

Навіть з огляду на значний дефіцит національного бюджету не варто допускати експансії в Україну іноземних компаній, що спеціалізуються на видобутку невідновлювальних природних ресурсів. Для цього існує дві серйозні причини. По-перше, невідновлювана сировина є до певної міри стратегічним ресурсом; її ціна на міжнародному ринку зростає з вичерпанням світових запасів. Тому для України було б вигідніше частково законсервувати свої родовища до того часу, коли ціна на певні ресурси зросте достатньо високо. По-друге, надмірне захоплення видобутком сировини може призвести до деіндустріалізації (так звана голландська хвороба).

Докорінно відмінною є ситуація з видобутком відновлюваних природних ресурсів. Україна повинна всіляко заохочувати інвестиції у цю сферу, оскільки це, по-перше, спричинить значні надходження у бюджет, а по-друге – дасть доступ до передових закордонних технологій, дуже перспективними були б, наприклад, інвестиції у вітрову, сонячну та приливну електроенергетику.

2) Шукачі ринків.

Стосовно компаній, що шукають насамперед нові ринки збуту для своєї продукції, поведінка повинна бути зовсім іншою. Само по собі ввезення і продаж в Україні продукції, зробленої за її кордонами, навіть якщо ця продукція є високоякісною і справді необхідною, все ж матиме негативний вплив на торговельний баланс України. Тому доцільно шляхом податкових та інших пільг форсувати процес експансії компанії-виробника на український ринок і спонукати її до перенесення в Україну частини своїх виробничих потужностей. Це – перший крок для мінімізації шкідливих наслідків будь-якого імпорту без втрати переваг. А другим кроком стало б стимулювання експорту виробленої в Україні продукції за кордон. Цей варіант був би вигідним як для України, так і для самої ТНК.

3) Мінімізатори витрат.

Стосовно цих компаній сумнівів практично не виникає. У своїх філіалах компанії цього

типу інтенсивно використовують місцеву робочу силу для виробництва продукції, що йде на експорт. Тобто залучення цих компаній одночасно дозволяє значно поліпшити платіжний баланс країни-реципієнта і різко знизити рівень безробіття. Крім того, мінімізатори витрат часто є дуже високотехнологічними компаніями, отож, функціонування у тій чи іншій країні їх виробничих потужностей відчутно підвищує загальнонаціональний технологічний рівень.

Однак у цьому випадку необхідно зробити важливе застереження: для досягнення позитивного ефекту для української економіки компанія-інвестор повинна реально використовувати стратегію мінімізації витрат, а не лише декларувати її. Ілюстрацією до цього застереження може бути раніше згаданий приклад південнокорейського автомобілебудівного гіганта «Daewoo Motors», що створив із Запорізьким автомобільним заводом спільне підприємство «АвтоЗАЗ-Daewoo» і, використовуючи свій імідж «мінімізатора витрат», досяг від українського уряду низки пільг, у тому числі й офіційне закріплення майже монопольного становища спільного підприємства (СП) на ринку країни. При цьому декларовані наміри щодо інтенсивного використання місцевої робочої сили на практиці виявилися порожніми обіцянками для одержання додаткових пільг, оскільки реально не було мови не лише про експортну орієнтацію виробництва (навпаки – штаб-квартира «Daewoo Motors» заборонила СП експорт продукції за межі України для уникнення так званої канібалізації, тобто захоплення ринків, що «належать» іншим підрозділам компанії), але й про жодну «мінімізацію витрат» – так, для забезпечення стабільності збуту головного підрозділу корпорації на українські автомобілі продовжували ставити двигуни корейського виробництва, незважаючи на розробку фахівцями «АвтоЗАЗ» нового двигуна, значно дешевшого та економічнішого порівняно з корейським аналогом.

Отже, хоч оцінку впливу ТНК на економіку й можна проводити шляхом застосування поширених у сучасній економічній науці концепцій, однак для адекватного відображення ситуації вони потребують певної модифікації та комплексного застосування.

Величезна кількість публікацій, присвячених ТНК та їх впливу на економіку (передусім у формі інвестицій), безумовно засвідчує актуальність цієї тематики. Водночас вражає протиріччя і подекуди цілковита протилежність висловлюваних при цьому поглядів – від дифіра-

мбів ТНК, як становому хребту та ключовим фігурам глобалізованої економіки до гнівних звинувачень їм же, як таким собі спрутам світового імперіалізму, що для власного й без того безмірного збагачення витягують ресурси з беззахисних національних економік.

І перше, і друге твердження мають право на існування, оскільки впродовж історії свого розвитку ТНК давали підґрунтя для обох. З одного боку, незаперечним фактом є те, що ТНК – одна з головних рушійних сил глобалізації та науково-технічного прогресу [5]; зокрема, уже на початку 80-х років ТНК контролювали близько 40 % промислового виробництва, 60 % зовнішньої торгівлі та 80 % технологічних розробок капіталістичного світу, і ця тенденція триває [6].

Таким чином, в результаті аналізу переваг і недоліків іноземних інвестицій в економіку України можна зробити висновки про їх необхідність, але з урахуванням супутніх заходів, які б не давали погіршення стану в певній галузі економіки, безпосередньо або опосередковано. Визначення доцільності іноземних інвестицій слід робити також з урахуванням не тільки миттєвих економічних здобутків, а й наслідків у довгостроковій перспективі. Звичайно, основним критерієм має бути економічна та соціальна користь для підприємств, регіонів та галузей економіки.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Zhyzhko, K. An analysis of main methods for determining the value of enterprises [Text] / K. Zhyzhko // Proc. of the 6-th Int'l sci. conf. «Transbaltica 2009» (22–23.04.2009, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania).
2. Закон України «Про стимулювання виробництва автомобілів» від 18.09.1997 р. [Текст] (не діє з 01.01.2008 р.) / Верховна Рада України (Бібліотека офіційних видань).
3. Nickels, W. G. Understanding Business [Text] – 4-th ed. / W. G. Nickels, J. M. McHugh, S. M. McHugh. – IRWIN, 1996.
4. Друзик, Я. С. Мировая экономика на финише века [Текст] / Я. С. Друзик. – Мн.: Дрофа, 1997. – 257 с.
5. Основні показники по СЕЗ (офіційна доповідь) [Електрон. ресурс] / Міністерство економіки України. – 2008. – Режим доступу: <http://www.mineco.gov.ua>
6. Пехник, А. В. Іноземні інвестиції в економіку України [Текст] / А. В. Пехник. – К.: Знання, 2007. – 337 с.

Надійшла до редколегії 19.03.2010.
Прийнята до друку 23.03.2010.

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРІВУ ТЕПЛОВОЗІВ ВІД АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У статті розглянуто питання економічної ефективності використання прогріву тепловозів за рахунок працюючого на холостому ходу тепловозного дизеля та проведена економічна оцінка різних способів прогріву тепловозів.

В статье рассмотрены вопросы экономической эффективности использования прогрева тепловозов за счет работающего на холостом ходу тепловозного дизеля и проведена экономическая оценка разных способов прогрева тепловозов.

In the article the issues of economic efficiency of use of warming-up the diesel locomotives at the expense of an idle-run diesel engine are considered and the economic estimation of different ways of warming-up the diesel locomotives is carried out.

Постановка проблеми у загальному вигляді

Як відомо, для нормального функціонування тепловозного дизеля на будь-яких позиціях контролера машиніста згідно технічних умов заводу-виробника потрібно, щоб температура води та масла була не менше 40 °С. Географічне положення України та кліматичні умови експлуатації тепловозів вимагають підтримувати параметри води та масла дизелю тепловоза під час відстою на необхідному температурному рівні. Це можливо за рахунок роботи двигуна на холостому ході або прогріву від стороннього джерела енергії.

В Україні майже повсюдно практикується прогрів тепловозів за рахунок працюючого на холостому ходу тепловозного дизеля. Як показала практика, цей метод дуже неефективний, як з економічної, так і з екологічної точки зору. Згідно статистичних даних, за 2008 р. по залізницях України витрата палива на прогрів складала приблизно 3750 т натурального палива. При цьому зменшується моторесурс дизеля, час між капітальними ремонтами, а також значно погіршується екологічна ситуація в місцях відстою тепловозів. Особливо треба зауважити те, що тепловоз, який працює в режимі «гарячого» резерву, є небезпечним джерелом забруднюючих речовин. Оскільки при роботі дизеля на холостому ході до атмосфери викидається така кількість оксидів і діоксидів вуглецю, діоксидів сірки, оксидів азоту та вуглеводнів, яка дорівнює, а іноді навіть перевищує показники дизелів, які працюють на номінальних та максимальних режимах навантаження. Тому питання економії палива при прогріві тепловозів, які

знаходяться у «гарячому» резерві, а як наслідок зменшення викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами, є одними з найактуальніших проблем для України.

Аналіз досліджень щодо даного питання

Питаннями підвищення економічності тепловозних дизелів, де немало частку складають і питання економії дизельного палива при прогріві під час відстою, займалося та займається багато видатних вчених таких, як Хомич А. З., Симсон А. Є., Єрощенков С. А., Перельот В. І., Тупіцин О. І., Грищенко А. В., Володін А. І. та багато інших. Ними були проведені дослідження і запропоновано чимало альтернативних методів прогріву, які ми розглянемо в основній частині статті.

Основний матеріал

Як було сказано вище, в Україні прогрів тепловозів відбувається за рахунок працюючого на холостому ходу тепловозного дизеля. При цьому коефіцієнт корисної дії двигунів внутрішнього згоряння, як джерела енергії для самопрогріву, не перевищує 45...47 %.

Крім того, слід звернути увагу також на те, що необхідність у прогріві не залежить від географічного розташування тепловозного депо або точки обороту локомотива (у межах України) і не є характерним для якоїсь із серій тепловозів (дизеля), тобто тут не простежується прямий вплив кліматичної зони. На рис. 1 надано розподіл витрат палива на прогрів по залізницях України.

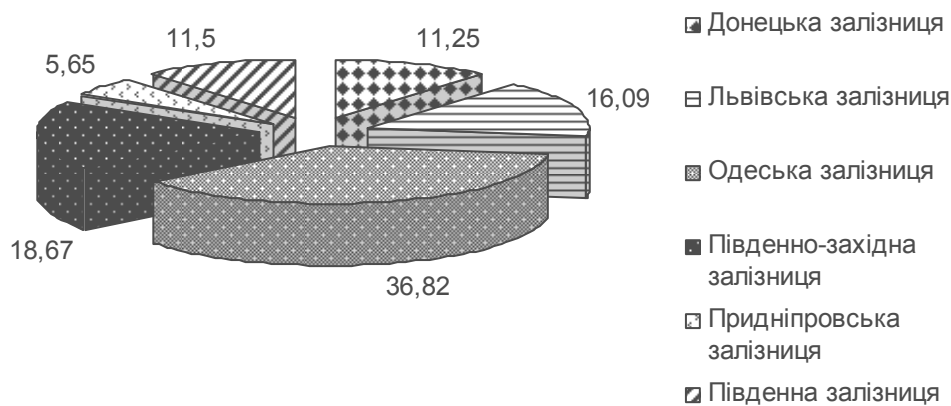


Рис. 1. Розподіл витрат палива на прогрів по залізницях України

Рівень витрати палива тепловозами на прогрів по депо залізниць України в основному залежить від рівномірності та пропорційності за часом у подачі тепловозів до поїздів, а також від наявності в депо вільних опалювальних приміщень (стійл) для очікування в непрацюючому стані тепловоза до відправлення поїздів.

Після розглянутого вище, робимо висновок, що економія палива на обігрів тепловозів і виключення інших недоліків, пов'язаних з їх самопрогрівом, можуть бути досягнуті використанням тільки альтернативних систем прогріву, які мають більш високий коефіцієнт корисної дії, ніж двигуни тепловозів, які працюють в режимі самопрогріву і забезпечують можливість підтримки силових установок тепловозів в мобільному стані на мінімально допустимому температурному рівні.

Умовно методи прогріву тепловозних дизелів можна розділити на три групи: стаціонарні, автономні, комбіновані. До стаціонарного відносять такі, як прогрів від депоської котельні, прогрів від електромережі, прогрів тепловоза гарячим повітрям, прогрів пальниками – інфрачервоним випромінюванням. До автономного відносять такі методи, як прогрів від тягового генератора, прогрів від котла-підігрівника, прогрів з використанням теплоти відпрацьованих газів й прогрів з використанням акумулятора теплоти.

Рядом авторів [3] було запропоновано економічну оцінку різних способів прогріву тепловозів за вартістю 1 МДж теплоти, що витрачається на прогрів. Вона є досить наближеною і умовною, оскільки виконується без обліку ви-

трат на модернізацію тепловоза і капітальних витрат. Але є дуже практичною для наглядного порівняння того чи іншого способу прогріву та визначення економічного ефекту від запровадження альтернативних або комбінованих систем прогріву. За даною методикою були проведені розрахунки, які представлені в табл. 1.

Як бачимо з цієї таблиці, перспективним способом прогріву є підігрів від акумулятора теплоти. Застосування прихованої теплоти фазових переходів хімічних речовин (відомого фізичного принципу переходу речовини з одного агрегатного стану в інший) дозволить значно підвищити ефективність передпускового прогріву системи охолодження тепловоза в холодну пору року. На жаль, багато конструкторів і фахівців-теплотехніки проходять повз факт використання (як акумуляторів теплової енергії) речовин, що мають низьку теплоту плавлення. Температура фазового переходу, так само як і кількість тепла, яка поглинається або виділяється при цьому процесі, залежить від типу застосованої речовини й змінюється в широких межах. Найбільший ефект можна одержати при взаємодії обраної речовини із системою охолодження, яка представлена розгалуженою водяною системою охолодження. Тому що максимальне значення температури охолоджувальної рідини тепловоза не перевищує 95 °С, існує невелика група речовин, що мають температуру плавлення нижче необхідної максимальної. Причому, чим вище температурний перепад і питома теплота плавлення робочої речовини, тим більший ефект можна одержати.

Таблиця 1

Результати розрахунку економічного ефекту при використанні альтернативних способів прогріву

| Серія тепловоза | Витрата дизельного палива на режимі холостого ходу тепловоза, кг/год | Витрата палива на самопрогрів від працюючого дизеля, т/рік | Вартість палива, витраченого на прогрівання, тис. грн/рік | Величина теплоти, що відводиться до системи охолодження і масла, кВт·год (МДж) | Витрати теплоти на самопрогрівання однієї секції тепловоза за рік, кВт·год/рік(МДж/рік) | I. Автономне прогрівання | | | II. Стационарне прогрівання | | |
|-----------------|--|--|---|--|---|--|--|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | | | | Вартість палива при прогріванні з підключенням тягового генератора, тис. грн/рік | Вартість палива при прогріванні з використанням теплоти відпрацьованих газів, тис. грн/рік | Вартість палива при прогріванні від акумулятора теплоти, тис. грн/рік | Економ. ефект, тис. грн/рік | Економ. ефект, тис. грн/рік | Економ. ефект, тис. грн/рік |
| ТГМ4 | 6 | 3,9 | 29,993 | 26,12 | 16978 | - | 22,572 | 0,000 | 6,597 | 10,638 | |
| | | | | 94,03 | 61120 | - | 7,422 | 29,993 | 23,396 | 19,355 | |
| ТГМ6 | 7 | 4,55 | 34,993 | 30,473 | 19807 | - | 26,334 | 0,000 | 7,697 | 12,411 | |
| | | | | 109,703 | 71307 | - | 8,659 | 34,993 | 27,296 | 22,581 | |
| ТЭМ2 | 9,8 | 6,37 | 48,990 | 42,66 | 27730 | 28,315 | 36,867 | 0,000 | 10,775 | 17,376 | |
| | | | | 153,58 | 99830 | 20,675 | 12,122 | 48,990 | 38,214 | 31,614 | |
| ТЭМ2М | 10 | 6,5 | 49,989 | 43,333 | 28296 | 28,893 | 37,619 | 0,000 | 10,995 | 17,731 | |
| | | | | 156,719 | 101867 | 21,097 | 12,370 | 49,989 | 38,994 | 32,259 | |
| 2М62 | 25 | 16,25 | 124,973 | 108,83 | 70741 | 72,232 | 94,049 | 0,000 | 27,488 | 44,326 | |
| | | | | 391,8 | 254668 | 52,742 | 30,925 | 124,973 | 97,485 | 80,647 | |
| 2ТЭ116 | 20 | 13,1406 | 101,051 | 88 | 57200 | 58,405 | 76,046 | 0,000 | 22,226 | 35,842 | |
| | | | | 316,8 | 205920 | 42,646 | 25,005 | 101,051 | 78,825 | 65,210 | |

Крім того, певні обмеження накладає специфіка роботи тепловозів у зимовий час, що полягає в необхідності багаторазового відтворення режимів фазового переходу. Тільки ті речовини, які дозволяють багаторазово проводити над собою знакозмінні режими, реально претендують на широке застосування. У цьому випадку термін служби робочої речовини та

всієї системи може бути необмежений. Наведено деякі техніко-хімічні параметри речовин, що реально претендують на проведення повномасштабних випробувань на локомотивах, у табл. 2. Її аналіз показує, що найкращими характеристиками володіють гідроокис барію й розчин їдкого натру, вони ж добре відповідають наведеним вище специфічним вимогам.

Таблиця 2

Техніко-хімічні параметри речовин з низькою теплою плавлення

| Речовина | Температура плавлення, °С | Густина у рідкому стані, г/см ³ | Питома теплота плавлення: | |
|---|---------------------------|--|---------------------------|-------|
| | | | кДж/кг | кДж/л |
| Вода H ₂ O | 0 | 1,00 | 335,3 | 333,0 |
| Розчин їдкого натру Na(OH)·H ₂ O | 65,0 | 1,72 | 255,0 | 446,0 |
| Гідроокис барію Ba(OH)·8H ₂ O | 78,0 | 2,06 | 280,0 | 576,0 |
| Пальмітинова кислота | 65,0 | 0,86 | 184,5 | 162,9 |
| Стеаринова кислота | 70,1 | 0,95 | 200,3 | 191,0 |
| Парафін (білий) | 55,0 | 0,80 | 187,7 | 150,3 |
| Нафталін | 80,0 | 1,15 | 150,3 | 172,1 |

Конструктивно система представляє собою звичайний теплообмінник, виконаний у вигляді термоса. Пристрій містить два корпуси з нержавіючої сталі: зовнішній з підвідним та відвідним штуцерами і внутрішній, у якому розташовані капсули з робочим тілом. Капсули являють собою герметичні порожнини, виготовлені з тонкого мідного листа. Пакет капсул зібраний у єдину матрицю. Розташування матриць може бути виконане за стільниковою схемою. У зазори, що утворилися, вкладаються турбулізатори.

Тобто акумулятор теплоти – це пристрій, який заряджається теплою за час роботи двигуна під навантаженням при виконанні тепловозом будь-яких маневрових або інших робіт. За час відстою тепловозу в «гарячому» резерві накопичена акумулятором теплота витрачається на прогрів. Тому, якщо не враховувати витрати роботи водяного насоса на циркуляцію води в системі охолодження (а вони були передбачені в попередніх розрахунках), тоді ціна 1 МДж теплоти, яка пішла на прогрів тепловозів, буде дорівнювати нулю, тобто $C_{МДж} = 0$.

Також можна додати, що з усіх запропонованих методів прогрів від котельної депо та прогрів від акумулятора теплоти є більш еко-

номічно ефективними. Але слід зауважити, що окремо кожен з цих методів не дуже ефективний і у більшості випадків не підходить із-за конструктивних особливостей тепловозів. Тому доцільно використовувати комбіновані системи прогріву, що реалізують якусь сукупність способів з наведених вище. Тому наведені вище розрахунки не є остаточними і підлягають подальшому аналізу та перерахунку.

Висновки

1. Зроблено висновок про доцільність запровадження альтернативної системи прогріву тепловозів, що перебувають в «гарячому» резерві.
2. Наведено класифікацію і економічну оцінку застосування різних способів прогріву тепловозів.
3. Показано, що найбільш ефективним є спосіб прогріву від деповської котельні (або стороннього джерела теплоти) та від акумулятора теплоти.
4. Зроблено висновок про доцільність використання комбінованих систем прогріву тепловозів, які знаходяться у «гарячому» резерві.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Хомич, А. З. Эффективность и вспомогательные режимы тепловозных дизелей [Текст] / А. З. Хомич. – М.: Транспорт, 1979. – 144 с.
2. Хомич, А. З. Экономия топлива и теплотехническая модернизация тепловозов [Текст] / А. З. Хомич, О. И. Тупицын, А. Э. Симсон. – М.: Транспорт, 1975. – 264 с.
3. Характеристика різних способів прогріву тепловозів та їх економічна оцінка за вартістю одиниці витраченої теплоти [Текст] / С. А. Єрощенков та ін. // Теплоенергетичні установки та екологія на залізничному транспорті : зб. наук. пр. – 2005. – № 68. – Х.: УкрДАЗТ, 2005. – С. 15-23.
4. Хомич, А. З. Электропрогрев водяной системы. Электрическая и тепловозная тяга [Текст] / А. З. Хомич, М. И. Мартышевский. – М.: Транспорт, 1978. – 30 с.
5. Каграманян, А. О. Аналіз витрат тепла секції тепловоза та його вплив на визначення кількості теплоти при самопрогріві дизеля [Текст] / А. О. Каграманян, А.В. Онищенко // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2007. – № 12. – С. 30.
6. Каграманян, А. О. Підвищення паливної економічності та поліпшення економічних показників тепловозних дизелів при роботі на холостому ході [Текст] / А. О. Каграманян, А. В. Онищенко // Зб. наук. пр. – Донецьк: ДонІЗТ, 2008. – Вип. 13. – С. 112-118.
7. Сергиенко, Н. И. Выбор и научное обоснование технико-экономических показателей тепловозных дизелей для локомотивного парка Украины [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук. – Х.: ХарГАЖТ, 2000. – 194 с.
8. Хомич, А. З. Топливная эффективность и вспомогательные режимы тепловозных дизелей [Текст] / А. З. Хомич. – М.: Транспорт, 1987. – 271 с.

Надійшла до редколегії 19.01.2010.

Прийнята до друку 21.01.2010.

А. А. КОВТУН (БелГУТ, Гомель, Беларусь)

ИННОВАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТРАСЛЕВОГО ОБРАЗОВАНИЯ И ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Досліджуються проблеми підвищення якості функціонування транспортного ВНЗ з урахуванням відповідності галузевої освіти потребам транспортного комплексу. Розглядається можливість зменшення навантаження на державний бюджет за рахунок створення ендаументу при Мінтрансі. При цьому відбудеться віднесення частини (всього обсягу) витрат з фінансування ВНЗ на галузеві міністерства та відомства, що призведе до вивільнення вагової частки коштів держбюджету для інших цілей.

Исследуются проблемы повышения качества функционирования транспортного вуза с учетом соответствия отраслевого образования потребностям транспортного комплекса. Рассматривается возможность уменьшения нагрузки на государственный бюджет за счет создания эндаумента при Минтрансе. При этом произойдет отнесение части (всего объема) расходов по финансированию вуза на отраслевые министерства и ведомства, что приведет к высвобождению значительной доли средств госбюджета для других целей.

The problems of increase of functioning quality of the transport high school in view of conformity of the branch education to requirements of the transport complex are investigated. The opportunity of reduction of load on the state budget due to creation of the endowment at the Ministry of Transport and Communications is considered. In doing so, the branch ministries and departments will bear a part (all amount) of charges on financing the high school that will lead to saving a significant share of the state budget means for other purposes.

В условиях глобального экономического кризиса основными приоритетными задачами государства являются сохранение темпов экономического роста, обеспечение инновационного развития экономики страны, ее конкурентных преимуществ и источников роста, к которым в первую очередь относится интеллектуальный потенциал нации. Формирование и повышение интеллектуального потенциала республики невозможно без совершенствования национальной системы образования, отвечающей приоритетам устойчивого социально-экономического развития и способной активно влиять на конкурентоспособность экономики.

Развитие рыночных отношений в Республике Беларусь поставило перед вузами проблему подготовки специалистов, ориентированных: на развитие инновационной деятельности предприятий и отраслей, подготовку научных кадров для инновационных структур; создание, восприятие, освоение и применение педагогических инноваций в образовательном процессе; участие вуза в инновационной деятельности отрасли; использование своей лабораторно-исследовательской базы для проведения научных исследований и разработок профессорско-преподавательского состава; генерирование научных идей, которые реализуются в инновационном цикле; оказание инновационным

предприятиям консультационных услуг и проведение экспертиз [2].

В связи с переходом на инновационную модель развития экономики отраслевая высшая школа в высокой степени ответственна перед обществом и транспортом за качественную подготовку специалистов. В контексте модернизации отраслевой высшей школы создание интегрированных образовательных центров – когда в состав транспортного вуза включаются средние специальные учебные заведения, объединяется их учебная, научная, материально-техническая база и педагогический потенциал – позволит изменить роль вуза в подготовке, повышении квалификации и переподготовке кадров в связи с внедрением новой техники и технологий, новых экономических отношений и активным взаимодействием вуза и отрасли. В свою очередь, это будет способствовать повышению эффективности вузовской науки как фактора коренного усиления фундаментальности университетского образования, ускорения научно-технического прогресса в отрасли. Образованный таким образом транспортный научно-инновационный образовательный комплекс позволит сохранить единую систему подготовки кадров для транспорта, обеспечить непрерывность и преемственность образования.

Транспортный вуз и транспортная отрасль не могут эффективно развиваться без взаимной интеграции и тесного взаимодействия (как и с реальным сектором экономики). Для кадрового обеспечения транспортной стратегии вузы Республики Беларусь должны осуществлять учебный процесс в соответствии с потребностями транспортного комплекса в специалистах всех уровней. Поэтому необходим обоснованный прогноз потребности в конкретных специалистах на ближайшее время и на перспективу для транспортной отрасли в целом и для крупнейших предприятий транспорта. Транспортный вуз должен иметь четкое представление не только о количестве требуемых специалистов, но и о том, какими квалификационными характеристиками они должны обладать. Не менее актуален вопрос и о новых специальностях. Транспортной системе страны сегодня необходимы специалисты по управлению взаимодействием видов транспорта, инновациям, сервису и туризму. В учебные программы вуза должен быть заложен принцип получения студентами знаний и умений, соответствующих развитию инфраструктуры транспортного комплекса, внедрению новых, в том числе телекоммуникационных, технологий, современных методов управления, инновационных достижений науки [4].

Рынок порождает конкуренцию, и вполне естественно, что неотраслевые вузы предлагают свои услуги транспортным предприятиям. Таким образом, для улучшения работы системы транспортного образования, наращивания потенциала транспортных вузов, расширения сферы их влияния транспортный вуз призван готовить специалистов по уровню на порядок выше, чем возможные конкуренты. Но и предприятия транспорта должны осознавать, что только отраслевой вуз способен подготовить специалистов с квалификационными характеристиками, максимально отвечающими интересам заказчиков. Государственный заказ на подготовку кадров для транспортного комплекса и по основным, и по «непрофильным» специальностям должен полностью обеспечиваться отраслевым вузом. Повышенные требования к вузу в современных условиях требуют развития его материально-технической базы. Подготовить инженерные управленческие кадры для транспорта возможно только при использовании современного оборудования. Выпускник вуза, приходя на производство, не должен терять время на освоение новой техники – этот процесс должен проходить в стенах вуза. Если

нет возможности обеспечения вуза новейшими образцами техники и программного обеспечения, необходимо создание отраслевых лабораторий или/и филиалов кафедр на предприятиях транспорта. Будущий выпускник уже с первых лет обучения должен иметь четкое представление о своей профессии – а это задача не только вуза, но и отрасли. Практико-ориентированную кадровую направленность обеспечит производственная практика в отраслевых лабораториях непосредственно на предприятиях транспорта. Идеальным в этих условиях представляется организация на базе вуза и заинтересованных предприятий (при финансовом участии отраслевых министерств и ведомств) специализированных лабораторий и научно-технических центров, включая подразделения двойного подчинения, работающих на постоянной основе в интересах указанных предприятий и ведомств и осуществляющих научно-технологическое сопровождение производств и целевую подготовку.

Отраслевая система транспортного образования требует значительных материальных затрат, нуждается в постоянной поддержке, и прежде всего со стороны транспортного комплекса. Инновационные проекты и доходы транспортных отраслей должны распределяться с учетом того, что подготовка кадров – это важнейшая стратегическая задача, залог успешной работы транспортного комплекса.

Таким образом, оптимальным вариантом экономических взаимоотношений транспортного вуза с отраслевыми ведомствами представляется передача транспортного вуза (вместе с транспортными техникумами и колледжами) в ведение Министерства транспорта и коммуникаций. Министерство образования зачастую унифицирует образовательные программы без учета специфики обучения в отраслевых вузах, недостаточно обеспечивая полноценную практику на производствах и материально-техническую базу транспортных учебных заведений. Целевая подготовка специалистов в этих условиях должна проводиться с использованием такого внебюджетного механизма, как эндаумент. Эндаумент – целевой фонд, предназначенный для использования в некоммерческих целях, который наполняется за счет отчислений транспортных предприятий. Эндаумент может инвестировать свои средства с целью извлечения дохода, однако обязан направлять весь полученный доход в пользу того вуза, для поддержки которого он был создан.

Изменение существующего баланса полномочий в пользу отраслевого подчинения транспортного вуза позволит уменьшить нагрузку на государственный (республиканский) бюджет за счет отнесения части (всего объема) расходов по финансированию вуза на отраслевые министерства; обеспечить высокий уровень подготовки кадров для транспорта с учетом сложившейся специфики в подготовке кадров, что в свою очередь будет способствовать эффективному функционированию этой особой отрасли в экономике и обеспечению экономической безопасности страны.

Отчисления на содержание учреждений образования, обеспечивающих получение транспортного образования, а также переподготовку кадров для этой отрасли могут производиться предприятиями транспорта по нормативам, которые относятся на себестоимость, включаться в состав затрат на производство и реализацию продукции, товаров (работ, услуг) и учитываться при налогообложении. Созданный таким образом эндумент позволит перейти от режима бюджетного содержания системы высшего транспортного образования к режиму инвестирования в него. Инвесторами при этом станут бизнес и государство.

Как показывает опыт развитых стран, ответ системы образования на современные вызовы новой стадии развития общества оказался связанным с глубокой реформой ее экономического механизма [2]. По рекомендациям Всемирного банка, эти реформы все больше переводят образование на концептуальную основу теории человеческого капитала. Эта теория, отразив сдвиги в использовании ресурсов общества, рост роли человеческого фактора, коренным образом изменила представление о характере затрат на образование. Они стали рассматриваться не столько как потребительские расходы, единовременная, безвозвратная затрата ресурсов общества на процесс обучения, а как одно из направлений инвестиций в человеческий капитал, которое увеличивает будущий поток доходов человека, предприятий и общества, а также способствует достижению справедливости, созданию равенства возможностей в выборе направлений занятости и получении устойчивого дохода. Если раньше образование характеризовалось как отрасль, потребляющая блага и ресурсы, выделяемые государством и инвесторами (юридическими и физическими лицами) на основе перераспределения их доходов в процессе потребления, то в новых условиях она должна характеризоваться как сфера

производства и инвестирования со стороны заинтересованных в ее продукте субъектов, приносящая доход в форме более высокого дохода и повышения прибыли (для инвесторов), ускорения темпов роста и решения актуальных социальных проблем общества (для государства). Таким образом, рассматривая деятельность вуза в рыночных условиях, а также в условиях смешанного финансирования, с учетом наличия у вузов собственных фондов экономического стимулирования, можно сделать вывод о наличии прибавочного продукта в стоимости подготовки специалистов. Выпускник вуза, попадая в сферу материального производства, включается в производственный процесс, начинает создавать новую стоимость, которая значительно больше благодаря более высокому уровню своей квалификации и тем затратам, которые понесло общество на его подготовку. В конечном итоге эта новая стоимость и образует ту часть национального дохода, которая создается высококвалифицированными специалистами [4].

В условиях рыночной социально ориентированной экономики необходимо, чтобы совершенствование национальной системы образования основывалось на принципе государственно-частного партнерства. Среди проблем, которые тормозят развитие государственно-частного партнерства в сфере высшего образования, можно отметить отсутствие налоговых стимулов для работодателя вкладывать средства в подготовку специалистов. В связи с этим, расходы белорусских предприятий в этой области находятся на уровне 1 % прибыли, тогда как в европейских странах этот показатель составляет 10...12 %. И хотя такие крупные предприятия, как Белорусская железная дорога, Белавтодор, Белоруснефть и ряд других реализуют программы подготовки специалистов, это скорее исключение. Для решения данной проблемы необходим законопроект о предоставлении бизнесу соответствующих налоговых льгот в качестве поддержки со стороны государства.

Бизнес действительно заинтересован в подобных мерах налогового стимулирования, так как он нуждается в квалифицированных кадрах. Со своей стороны предприятия готовы активно сотрудничать как с государством, так и с образовательными учреждениями.

Важность государственно-частного партнерства в области образования для всех заинтересованных сторон несомненна – использование этого механизма позволит государству развивать рынок образовательных услуг, приумножать передовой опыт, внедрять механизмы

взаимодействия вузов с работодателями, обеспечивая распределение выпускников, совершенствовать системы управления в сфере инновационной деятельности; инвесторам – участвовать в научной деятельности вузов, создавать и совершенствовать образовательные стандарты, развивать на базе учебных учреждений инфраструктуру инновационной деятельности, привлекать студентов и преподавателей к выполнению научно-исследовательских работ; учреждениям образования – получать дополнительное финансирование и создавать новые модели интегрированного образовательного комплекса [1].

Таким образом, консолидация усилий всех участников образовательного, научно-технического и инновационных процессов откроет возможность создания в ближайшие годы в Республике Беларусь эффективной белорусской модели национальной инновационной системы, которая обеспечит широкое распространение знаний и высокие темпы научно-технического прогресса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модели финансирования вузов: анализ и оценка [Текст] / С. А. Беляков и др.; под ред. С. А. Белякова. – М.: Технопечать, 2005. – 274 с.
2. Бычкова, Г. М. Экономические основы реализации инновационной политики в высшей школе [Текст] / Г. М. Бычкова; под науч. ред. П. Г. Никитенко. – Мн.: Ин-т экономики НАН Беларуси, Право и экономика, 2009. – 274 с.
3. Гинзбург, А. И. Экономическая эффективность высшего технического образования [Текст] / А. И. Гинзбург. – М.: НИИЖТ, 1990. – 48 с.
4. Левин, Б. Отраслевое образование в контексте развития транспортного комплекса [Текст] / Б. Левин // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 3. – С. 74-77.

Поступила в редколлегию 22.03.2010.

Принята к печати 30.03.2010.

С. В. МЯМЛИН, А. С. БЛОХИНА (ДИИТ), З. Х. ЦЕЧОЕВА (Октябрьская железная дорога, Санкт-Петербург, Российская Федерация)

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ

На прикладі одного з проектів порівнюються його економічні оцінки, порашовані з використанням дисконтного метода та метода, в якому в основі лежить розрахунок повного економічного результату проекту.

На примере одного из проектов сравниваются его экономические оценки с использованием метода дисконтирования и метода, в основе которого лежит определение полного экономического результата проекта.

On the example of one of projects its economical assessments using the discount method and the method of absolute economic result of the project are compared.

Вопросы, связанные с экономической оценкой проектов всегда были и остаются весьма актуальными. С учетом специфики проектов в разное время были предложены те или иные методы решения соответствующих задач.

В данной статье на одном из примеров сравниваются результаты экономической оценки, произведенной с использованием метода дисконтирования и метода, в основе которого лежит определение полного экономического результата (ПЭР) проекта [1].

Сравнение проведено применительно к проекту, посвященному технико-экономическому обоснованию выбора профиля поверхности катания колеса подвижного состава железных дорог. В качестве исходных данных приняты результаты выполненной ранее работы [2], посвященной сравнению суммарных затрат и экономического эффекта по отрасли в предположении, что все полувагоны железных дорог Украины имеют в одном случае колеса со стандартным профилем поверхности катания, а в другом – колеса с профилем типа МИНТЕК.

Доходная часть проекта состоит из экономического эффекта по отрасли на основании следующих показателей: ресурс колеса и рельсов и экономия эксплуатационных расходов.

В расходной части проекта учтены только расходы, связанные с ресурсом колес, рельсов и тягой поездов. Расходы, связанные с обточкой колес, их заменой в связи с износом (выпрессовка колеса, напрессовка нового колеса на ось, монтаж буксового узла) и прочие – не учтены, в предположении, что они одинаково присущи как колесам со стандартным профилем, так и с профилем предлагаемым.

В табл. 1 и 2 приведены заимствованные из [2] упомянутые суммарные затраты и ожидаемые экономические эффекты по отрасли, в случае реализации проекта, за год и за установленный срок службы грузовых вагонов, который принят равным 30 годам.

Таблица 1

Суммарные затраты по отрасли

| Показатели | Стандартный профиль | | Предлагаемый профиль | |
|---|---------------------|-----------|----------------------|-----------|
| | Затраты, млн грн | | | |
| | за год | за 30 лет | за год | за 30 лет |
| Ресурс колеса | 483 | 14487 | 397 | 11914 |
| Топливо-энергетический ресурс | 1264 | 37920 | 1231 | 36930 |
| Ресурс рельсов | 243 | 7290 | 148 | 4440 |
| Инвестиции на создание колёс с новым профилем | - | - | 0,16 | 5 |
| Всего | 1990 | 59697 | 1776,16 | 53289 |

Таблица 2

Экономический эффект по отрасли за счет замены колес со стандартным профилем поверхности катания на колеса с предлагаемым профилем

| Показатели | Экономический эффект, млн грн | |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------|
| | Годовой | За 30 лет |
| Ресурс колес | 85,8 | 2573 |
| Топливо-энергетический ресурс | 33 | 990 |
| Ресурс рельсов | 95 | 2850 |
| Всего | 213,8 | 6413 |

Расчет экономической эффективности рассматриваемого проекта выполнен согласно «Методическим рекомендациям по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте» № В-1024У и с помощью программного продукта «Альт-Инвест». Эти рекомендации соответствуют требованиям Методических рекомендаций по оценке эффективности инвестиционных проектов, утвержденных Министерствами экономики и финансов Российской Федерации, Государственным комитетом РФ по строительной архитектурной и жилищной политике 21.06.1999 г. № ВК 477, и согласуются с методами оценки эффективности инвестиций Комитета по промышленному развитию при ООН (ЮНИДО) и сложившимися в мировой практике подходами к оценке эффективности инвестиционных проектов.

1. Оценка инвестиционного проекта методом дисконтирования

Согласно данным табл. 1, горизонт исследования составляет 30 лет, предварительно найденный экономический эффект по отрасли за это время – 6413 млн грн, инвестиционные затраты проекта – 5000 тыс. грн. Индекс дисконтирования принят в расчете равным 15 %.

В процессе расчета определены чистый дисконтированный доход (ЧДД или NPV), внутренняя норма доходности, простой и дисконтированный сроки окупаемости проекта, проведен однопараметрический анализ чувствительности проекта.

Чистый дисконтированный доход, найденный согласно (1), рассчитан по интервалам планирования и равен выручке за вычетом операционных затрат, налогов и инвестиционных издержек, понесенных в данном интервале планирования.

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{(R_t - Z_t)}{(1 + E)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{\mathcal{E}_t}{(1 + E)^t} = \sum_{t=0}^T \mathcal{E}_t \alpha_t \quad (1)$$

где R_t – результаты (доходы), достигаемые на t -ом интервале планирования;

Z_t – затраты (текущие издержки и инвестиции), осуществляемые на t -ом интервале планирования;

T – продолжительность горизонта планирования;

\mathcal{E}_t – эффект, достигаемый на t -ом интервале планирования;

α_t – коэффициент дисконтирования;

t – номер шага расчета ($t = 0, 1, \dots, T$).

Чистый дисконтированный доход за 30 лет составил 963931 тыс. грн.

Простой срок окупаемости, найденный согласно (2),

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_t}{P_t - Z_t} \quad (2)$$

и дисконтированный срок окупаемости проекта, найденный из равенства (3)

$$\sum_{t=0}^{T_{\text{ок}}} \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} = \sum_{t=0}^{T_{\text{ок}}} \frac{K_t}{(1 + E)^t} \quad (3)$$

оказались равными, соответственно, 0,2 года и 0,3 года.

Внутренняя норма доходности ($E_{\text{ВН}}$), т.е. рентабельности (IRR) проекта, найденная путем решения уравнения (4)

$$\sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E_{\text{ВН}})^t} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E_{\text{ВН}})^t} \quad (4)$$

при ставке 15 % равна 376 %.

Анализ чувствительности проекта (см. рис. 1) показывает, что при уменьшении ставки сравнения (дисконта) ценность будущих денежных поступлений от проекта, приведенная к настоящему времени, увеличится, а при росте ставки уменьшится.

Таким образом, согласно предварительным теоретическим оценкам и оценкам, уточненным методом дисконтирования, проект является эффективным, прибыльным, и предлагаемый профиль поверхности катания может быть принят к дальнейшему рассмотрению.

2. Метод определения полного экономического результата (ПЭР) инвестиционного проекта

Оценка проекта, выполненная с использованием «метода полного экономического результата (ПЭР)», произведена на основании тех же исходных данных, что и оценка рассматриваемого проекта методом дисконтирования.

Величина стоимости бизнеса принята из расчета 5 % от годовой прибыли проекта, которая согласно данным табл. 1 составляет 213800 тыс. грн./год.

Расчет полного экономического результата проекта (ПЭР) по каждому периоду развития проекта проводится следующим образом:

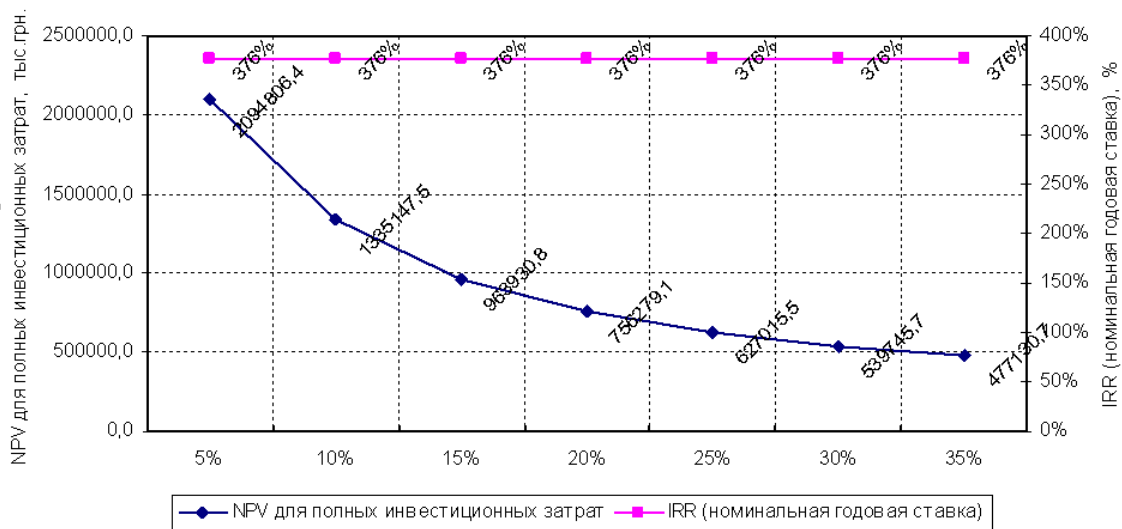


Рис. 1. Зависимость чистого дисконтированного дохода ЧДД (NPV) от индекса дисконтирования

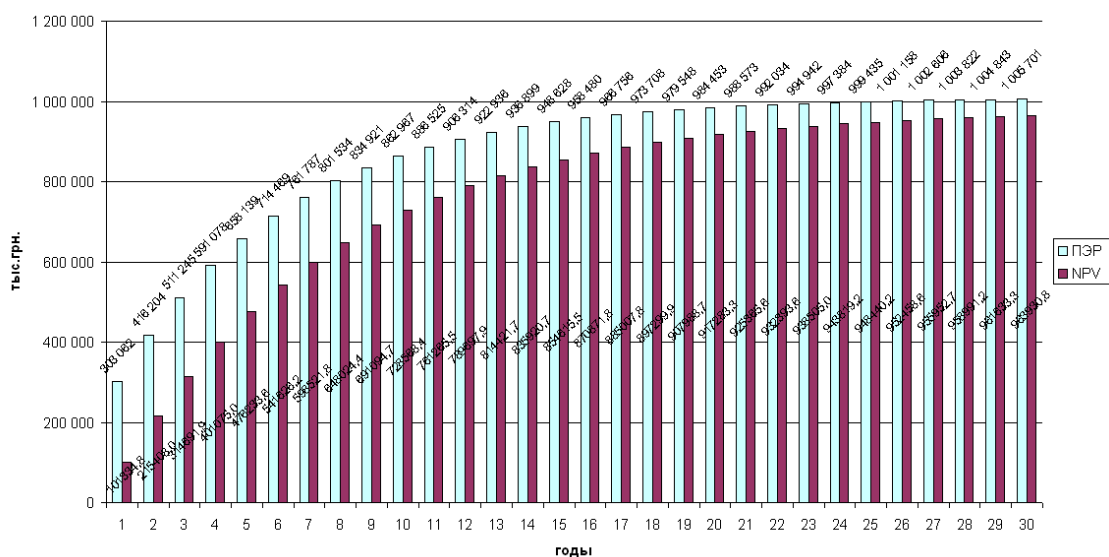


Рис. 2. Сравнение расчетов методом П&Р и методом дисконтирования ЧДД (NPV)

$$PR_j = \sum_{t=1}^{T_j} \sum_{k=1}^{K_t} \sum_{i=1}^I [(Dit - Zit) - Nlit] \cdot (1 - p_{ik}) + \sum_{t=1}^{T_j} \sum_{k=1}^{K_t} DPkt + St - \sum_{t=1}^{T_j} It,$$

где PR_j – полный экономический результат j -го периода ($j = 1, 2, 3$);

Dit – доходы от i -го вида деятельности (продукта) по проекту в году t ;

Zit – расходы по i -му виду деятельности (продукту) в году t ;

$Nlit$ – налоговые выплаты по i -му виду деятельности (продукту) проекта в году t ;

$DPkt$ – доходы от инвестиции прибыли компании в прошлые годы, полученные ею в году t ;

p_{ik} – доля прибыли компании, направляемая на k -й вид инвестиционной деятельности в году t ;

K_t – общее число видов инвестиционной деятельности, осуществляемых ею до года t ;

S_t – рыночная оценка компании в году t ;

It – инвестиции по проекту в году t (обозначения – согласно [1]).

Результаты расчетов П&Р и его изменение с течением времени (по годам) за 30-летний период приведены в табл. 3, из которой следует, что рассматриваемый проект эффективен, и чистый доход по проекту за 30 лет ожидается в размере 1005701 тыс. грн.

Сравнение результатов, полученных двумя методами, приведено в табл. 4 и более наглядно представлено на рис. 2.

Таблица 3

Результаты расчетов ПЭР и его изменение по годам

| Расчет ПЭР | Краткосрочный период | | | Среднесрочный период | | Долгосрочный период | | | | |
|--|----------------------|---------|---------|----------------------|---------|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Годы | | | | | | | | | | |
| Инвестиционные затраты | 5 000 | | | | | | | | | |
| Прибыль до налогообложения | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 |
| Налоговые выплаты | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 |
| Чистая прибыль по годам | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 |
| Доля реинвестируемой прибыли | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Средний % доходности реинвестируемой прибыли | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Отдача прибыли прошлых периодов | | | | | | | | | | |
| 1-го года | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 |
| 2-го года | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 |
| 3-го года | | | 134694 | 113143 | 95040,1 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 |
| 4-го года | | | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 |
| 5-го года | | | | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 |
| 6-го года | | | | | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 |
| 7-го года | | | | | | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 |
| 8-го года | | | | | | | | 134694 | 113143 | 95040 |
| 9-го года | | | | | | | | | 134694 | 113143 |
| 10-го года | | | | | | | | | | 134694 |
| 11-го года | | | | | | | | | | |
| 12-го года | | | | | | | | | | |
| 13-го года | | | | | | | | | | |
| 14-го года | | | | | | | | | | |
| 15-го года | | | | | | | | | | |
| 16-го года | | | | | | | | | | |
| 17-го года | | | | | | | | | | |
| 18-го года | | | | | | | | | | |
| 19-го года | | | | | | | | | | |
| 20-го года | | | | | | | | | | |
| 21-го года | | | | | | | | | | |
| 22-го года | | | | | | | | | | |
| 23-го года | | | | | | | | | | |
| 24-го года | | | | | | | | | | |
| 25-го года | | | | | | | | | | |
| 26-го года | | | | | | | | | | |
| 27-го года | | | | | | | | | | |
| 28-го года | | | | | | | | | | |
| 29-го года | | | | | | | | | | |
| 30-го года | | | | | | | | | | |
| ИТОГО отдача прибыли | 134694 | 247837 | 342877 | 422711 | 489771 | 546102 | 593419 | 633166 | 666554 | 694599 |
| Стоимость бизнеса | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 |
| ПЭР без учета стоимости бизнеса | 295 044 | 408 187 | 503 227 | 583 061 | 650 121 | 706 452 | 753 769 | 793 516 | 826 904 | 854 949 |
| ПЭР с учетом стоимости бизнеса | 303 062 | 416 204 | 511 245 | 591 078 | 658 139 | 714 469 | 761 787 | 801 534 | 834 921 | 862 967 |

Таблица 3 (продолжение)

| Расчет ПЭР | Долгосрочный период | | | | | | | | | |
|--|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Годы | | | | | | | | | | |
| Инвестиционные затраты | | | | | | | | | | |
| Прибыль до налогообложения | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 |
| Налоговые выплаты | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 |
| Чистая прибыль по годам | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 |
| Доля реинвестируемой прибыли | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Средний % доходности реинвестируемой прибыли | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Отдача прибыли прошлых периодов | | | | | | | | | | |
| 1-го года | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 |
| 2-го года | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8275,9 | 6951,8 | 5839,5 |
| 3-го года | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852,3 | 8275,9 | 6951,8 |
| 4-го года | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 |
| 5-го года | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 |
| 6-го года | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 |
| 7-го года | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 |
| 8-го года | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 |
| 9-го года | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 |

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 10-го года | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 |
| 11-го года | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 |
| 12-го года | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 | 33387 |
| 13-го года | | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 | 39747 |
| 14-го года | | | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 | 47318 |
| 15-го года | | | | | 134694 | 113143 | 95040 | 79834 | 67060 | 56331 |
| 16-го года | | | | | | 134694 | 113143 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 |
| 17-го года | | | | | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 |
| 18-го года | | | | | | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 |
| 19-го года | | | | | | | | | 134694 | 113143,0 |
| 20-го года | | | | | | | | | | 134694 |
| 21-го года | | | | | | | | | | |
| 22-го года | | | | | | | | | | |
| 23-го года | | | | | | | | | | |
| 24-го года | | | | | | | | | | |
| 25-го года | | | | | | | | | | |
| 26-го года | | | | | | | | | | |
| 27-го года | | | | | | | | | | |
| 28-го года | | | | | | | | | | |
| 29-го года | | | | | | | | | | |
| 30-го года | | | | | | | | | | |
| ИТОГО отдача прибыли | 718157 | 737946 | 754569 | 768532 | 780261 | 790113 | 798389 | 805341 | 811180 | 816085 |
| Стоимость бизнеса | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 |
| ПЭР без учета стоимости бизнеса | 878 507 | 898 296 | 914 919 | 928 882 | 940 611 | 950 463 | 958 739 | 965 691 | 971 530 | 976 435 |
| ПЭР с учетом стоимости бизнеса | 886 525 | 906 314 | 922 936 | 936 899 | 948 628 | 958 480 | 966 756 | 973 708 | 979 548 | 984 453 |

Таблица 3 (окончание)

| Расчет ПЭР | Долгосрчный период | | | | | | | | | |
|--|--------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 21 | 22 | 23 | 24 | 24 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Инвестиционные затраты | | | | | | | | | | |
| Прибыль до налогообложения | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 | 213 800 |
| Налоговые выплаты | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 | -53450 |
| Чистая прибыль по годам | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 | 160 350 |
| Доля реинвестируемой прибыли | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Средний % доходности реинвестируемой прибыли | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Отдача прибыли прошлых периодов | | | | | | | | | | |
| 1-го года | 4120 | 3461 | 2907 | 2442 | 2051 | 1723 | 1447 | 1216 | 1021 | 858 |
| 2-го года | 4905,2 | 4120,3 | 3461,1 | 2907,3 | 2442,1 | 2051,4 | 1723,2 | 1447,5 | 1215,9 | 1021,3 |
| 3-го года | 5839,5 | 4905,2 | 4120,3 | 3461,1 | 2907,3 | 2442,1 | 2051,4 | 1723,2 | 1447,5 | 1215,9 |
| 4-го года | 6952 | 5839 | 4905 | 4120 | 3461 | 2907 | 2442 | 2051 | 1723 | 1447 |
| 5-го года | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 | 4120 | 3461 | 2907 | 2442 | 2051 | 1723 |
| 6-го года | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 | 4120 | 3461 | 2907 | 2442 | 2051 |
| 7-го года | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 | 4120 | 3461 | 2907 | 2442 |
| 8-го года | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 | 4120 | 3461 | 2907 |
| 9-го года | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 | 4120 | 3461 |
| 10-го года | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 | 4120 |
| 11-го года | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 | 4905 |
| 12-го года | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 | 5839 |
| 13-го года | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 | 6952 |
| 14-го года | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 | 8276 |
| 15-го года | 47318 | 39747 | 33387 | 28045 | 23558 | 19789 | 16623 | 13963 | 11729 | 9852 |
| 16-го года | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 | 33387,4 | 28045,4 | 23558,1 | 19788,8 | 16622,6 | 13963,0 | 11728,9 |
| 17-го года | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 | 33387,4 | 28045,4 | 23558,1 | 19788,8 | 16622,6 | 13963,0 |
| 18-го года | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 | 33387,4 | 28045,4 | 23558,1 | 19788,8 | 16622,6 |
| 19-го года | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 | 33387,4 | 28045,4 | 23558,1 | 19788,8 |
| 20-го года | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 | 33387,4 | 28045,4 | 23558,1 |
| 21-го года | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 | 33387,4 | 28045,4 |
| 22-го года | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 | 33387,4 |
| 23-го года | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 | 39746,9 |
| 24-го года | | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 | 47317,7 |
| 25-го года | | | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 | 56330,6 |
| 26-го года | | | | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 | 67060,3 |
| 27-го года | | | | | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 | 79833,7 |
| 28-го года | | | | | | | | 134694 | 113143,0 | 95040,1 |
| 29-го года | | | | | | | | | 134694 | 113143,0 |
| 30-го года | | | | | | | | | | 134694 |
| ИТОГО отдача прибыли | 820206 | 823667 | 826574 | 829016 | 831068 | 832791 | 834238 | 835454 | 836475 | 837333 |
| Стоимость бизнеса | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 | 8017,50 |
| ПЭР без учета стоимости бизнеса | 980 556 | 984 017 | 986 924 | 989 366 | 991 418 | 993 141 | 994 588 | 995 804 | 996 825 | 997 683 |
| ПЭР с учетом стоимости бизнеса | 988 573 | 992 034 | 994 942 | 997 384 | 999 435 | 1 001 158 | 1 002 606 | 1 003 822 | 1 004 843 | 1 005 701 |

Сравнение расчетов согласно ПЭР и ЧДД (NPV)

| Годы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ПЭР | 303 062 | 416 204 | 511 245 | 591 078 | 658 139 | 714 469 | 761 787 | 801 534 | 834 921 | 862 967 |
| NPV | 101334,8 | 215408,0 | 314691,9 | 401075,0 | 476233,6 | 541626,2 | 598521,8 | 648024,4 | 691094,7 | 728568,4 |

Таблица 4 (продолжение)

| Годы | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ПЭР | 886 525 | 906 314 | 922 936 | 936 899 | 948 628 | 958 480 | 966 756 | 973 708 | 979 548 | 984 453 |
| NPV | 761265,5 | 789697,9 | 814421,7 | 835920,7 | 854615,5 | 870871,8 | 885007,8 | 897299,9 | 907988,7 | 917283,3 |

Таблица 4 (окончание)

| Годы | 21 | 22 | 23 | 24 | 24 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ПЭР | 988 573 | 992 034 | 994 942 | 997 384 | 999 435 | 1 001 158 | 1 002 606 | 1 003 822 | 1 004 843 | 1 005 701 |
| NPV | 925365,6 | 932393,6 | 938505,0 | 943819,2 | 948440,2 | 952458,6 | 955952,7 | 958991,2 | 961633,3 | 963930,8 |

Как видим, согласно этому методу расчета предлагаемый проект также является прибыльным и более эффективным в сравнении с тем, что показывает метод дисконтирования.

Такое различие объясняется тем, что, как отмечено в [1], в отличие от методики дисконтирования, обесценивающей поступления будущих периодов, расчет полного экономического результата проекта учитывает влияние на общие результаты проекта прибыли предшествующих периодов, направляемой на инвестирование в прошлые годы, а также реальную рыночную оценку стоимости проекта (стоимости бизнеса) на всех периодах реализации проекта. При этом, как утверждает в [1], все показатели, входящие в ПЭР, а также сам полный экономический результат полностью соответствует бухгалтерской и финансово-экономической отчетности организации, свободны от искажающего влияния коэффициентов дисконтирования.

Таким образом, рассмотрены основные преимущества и недостатки различных методов экономической оценки инвестиционных проектов для железнодорожного транспорта. Несмотря на некоторое отличие в абсолютных показателях, полученных с использованием ме-

тода дисконтирования и метода определения полного экономического результата, общий вывод по оценке рассматриваемого инвестиционного проекта, посвященного разработке нового профиля поверхности катания колеса подвижного состава, положительный.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маленков, Ю. А. Новые методы инвестиционного менеджмента [Текст] / Ю. А. Маленков. – СПб.: Бизнес-Пресс, 2002. – 205 с.
2. Блохина, А. С. Экономическая оценка мероприятий по внедрению новых профилей поверхности катания колес подвижного состава железных дорог [Текст] / А. С. Блохина // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 256-262.
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [Текст] : Утверждены Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Гос. комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК 477 от 21.06.1999 г. – М.: Экономика, 2000.

Поступила в редколлегию 22.03.2010.

Принята к печати 30.03.2010.

Наукове видання

В І С Н И К

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Випуск 32

(українською, російською та англійською мовами)

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 7704
від 08.08.2003 р. видане Державним комітетом телебачення і радіомовлення України*

Відповідальний за випуск *І. П. Корженевич*
Комп'ютерне верстання *В. В. Кузьменко*

Статті в збірнику друкуються в авторській редакції

Формат 60 × 84¹/₈. Ум.друк.арк. 31,85. Тираж 100 пр. Зам. № 685.

**Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця та ділянки оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ-10, 49010, Україна

Тел.: +38 (0562) 33-58-96, факс: +38 (0562) 33-58-97

<http://www.diitrvv.dp.ua>

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003.