

ISSN 1993-9175

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ



ВІСНИК

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

Випуск 21

Дніпропетровськ
2008

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

Випуск 21

Дніпропетровськ
2008

Редакційна колегія:

Головний редактор д-р техн. наук *Пишійко О. М.*
Заступник головного редактора д-р техн. наук *Мямлін С. В.*
Члени редколегії: д-р біолог. наук *Дворецький А. С.*;
д-ри техн. наук *Блохін С. П., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Браташ В. О., Вакуленко І. В., Гетьман Г. К., Дубинець Л. В., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Загарій Г. І., Казакевич М. І., Колесов С. М., Коротенко М. Л., Костін М. О., Курган М. Б., Петренко В. Д., Пунагін В. М., Радкевич А. В., Разгонов А. П., Рибкін В. В., Скалозуб В. В., Хандецький В. С., Шафіт Є. М.*;
д-ри фіз.-мат. наук *Гаврилюк В. І., Кравець В. В.*;
д-ри хім. наук *Біляєв М. М., Нейковський С. І., Федін О. В.*;
д-ри екон. наук *Бабіч В. П., Драгун Л. М., Зайцева Л. М. Крамаренко В. Д., Покотілов А. А.*
Відповідальний секретар канд. техн. наук *Корженевич І. П.*

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 7704.
Видане Державним комітетом телебачення і радіомовлення України 08.08.2003 р.*

*Друкується за рішенням вченої ради Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна від 31.03.2008, протокол № 8*

Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка
В53 В. Лазаряна. – Вип. 21. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна,
2008. – 293 с.

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.

В статтях 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.

ББК 39.2

ЗМІСТ

ГАЛУЗЬ ТЕХНІЧНИХ НАУК

РОЗДІЛ «РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ»

В. Л. ГОРОБЕЦ (ДИИТ), Ю. И. САВВИН (ГКБ «Южное») МОДЕЛЬ ВІНОСЛИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ С УЧЕТОМ ЕВОЛЮЦІЇ ІХ МЕХАНІЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	7
С. В. ПИЛИПЕНКО (Укрзалізниця), О. М. БОНДАРЄВ, В. Л. ГОРОБЕЦЬ, О. І. ГІЛЕВИЧ, В. В. ГЛУХОВ, К. І. ЖЕЛЕЗНОВ, В. П. ЛІТВІНОВ, Є. Ф. ФЕДОРОВ, О. М. ЗАБОЛОТНИЙ, Д. О. ЯГОДА (ДІТ) ПОКАЗНИКИ ДИНАМІКИ ТА ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРОВАЗА ВЛ40	16
А. В. РАДКЕВИЧ, Л. М. БОНДАРЕНКО, С. О. ЯКОВЛЄВ (ДІТ) ЩЕ ОДИН ПОГЛЯД НА ІСТОРІЮ КОЛЕСА І ТЕХНІЧНИЙ АСПЕКТ	26
Т. В. ШЕЛЕЙКО (ДП «УкрНДІВ») ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ДВУТАВРА ХРЕБТОВОЇ БАЛКИ ПІВВАГОНА МОДЕЛІ 12-532 НАПРИКІНЦІ НОРМАТИВНОГО ТЕРМІНУ СЛУЖБИ	29

РОЗДІЛ «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ»

Ю. Я. ВОДЯННИКОВ, А. В. ГРЕЧКО, С. А. СТОЛЕТОВ (ГП «УкрНИИВ») ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ДИСКОВОГО ТОРМОЗА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ПРИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ТОРМОЖЕНИЯХ	31
М. І. КАПЦА (ДІТ) ОРГАНІЗАЦІЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УТРИМУВАННЯ ТЕПЛОВОЗІВ СЕРІЇ ТГМ4 НА ПРИКЛАДІ ВАТ «МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»	41
Л. М. ЛОБОЙКО (Укрзалізниця), Ю. С. БАРАШ, О. О. КАРАСЬ (ДІТ) ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ	46

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ»

П. Д. АНДРИЕНКО (ОАО НИИ «Преобразователь»), А. О. КАПЛИЕНКО (Запорожский национальный технический университет) РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	53
М. КАНЕВСКИ, А. РОЙЕК, А. БЯЛОНЬ (Научно-технический центр железнодорожного транспорта, Отделение электроэнергетики, Варшава, Польша) ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК ТИПОВ 2С120-2С-3, УС120-2С150 И УС150-2С150	57
В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДІТ), М. О. ІВАНОВ (Донецька залізниця), Ф. О. ФІЧОРЯК (ДІТ) НОРМУВАННЯ ВІТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ВЛАСНІ ПОТРЕБИ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ	61
О. О. МАРЕНИЧ (ДІТ) ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ З РЕМОНТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТЕХНІКИ	69
О. Л. МАРЕНИЧ, О. О. МАРЕНИЧ (ДІТ) ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИСТРОЇВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ З РЕМОНТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТЕХНІКИ	72
А. И. ТЮРЮТИКОВ (Институт общей энергетики НАН Украины) МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С АНАЛИЗОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	74

РОЗДІЛ «ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ»

О. І. БЕЛОРУСОВ, В. В. НОВІКОВ (УкрДАЗТ, м. ХАРКІВ) ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВЕЛИЧИНУ МАКСИМАЛЬНОГО НЕБЕЗПЕЧНОГО РОЗМІРУ ШИРИНИ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ.....	78
К. Ц. ГЛАВАЦЬКИЙ (ДІТ) НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ ГРУНТОУЩІЛЬНЮЮЧИХ МАШИН І ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ БУДОВИ КОЛІЇ.....	80
І. П. КОРЖЕНЕВИЧ (ДІТ) ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ПОТРІБНОГО ГАБАРИТНОГО РОЗШИРЕННЯ МІЖКОЛІЙ В КРИВИХ	87

РОЗДІЛ «ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ»

Н. Н. БЕЛЯЕВ, Е. Ю. ГУНЬКО, С. А. САЧУК (ДИИТ) МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРОМПЛОЩАДКАХ.....	90
Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО, ЧЖУ ЖУЙ (ДИИТ) ОСОБЕННОСТИ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ МАСШТАБНЫМИ ЭМИССИЯМИ НЕФТЕПРОДУКТОВ	94
С. В. ХРИСТЯН, І. В. ТИТАРЕНКО (ДІТ) ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У КОНДИЦІОНЕРАХ ПОВІТРЯ ВИПАРНОГО ТИПУ	97
О. В. ЧЕРНИШОВА, С. В. ХРИСТЯН, І. В. ТИТАРЕНКО (ДІТ) ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІКИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ	101

РОЗДІЛ «ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО»

И. Г. ГАНИЕВ (Джизакский политехнический институт, Узбекистан) РАСЧЕТ БЕЗОПАСНОГО ВРЕМЕНИ РАБОТЫ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ НАКОПЛЕННОГО ИЗНОСА.....	105
М. И. КАЗАКЕВИЧ (ДИИТ) СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА МОСТОВ.....	107
А. Б. КАЗАРИН, Б. А. КАЗАРИН, Д. Е. ГУСЕВ, Г. П. ПАСТУШКОВ, В. Г. ПАСТУШКОВ, Д. В. ЖИХАРЕВ (БНТУ, Минск, Республика Беларусь) ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ТОННЕЛЕЙ.....	113
В. В. КОВАЛЕНКО (НМетАУ) РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОГО ХРОМОМАНГАНЦЕВОГО ЧУГУНА ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ЗАГРУЗОЧНЫХ ЖЕЛОБОВ И ТОРЦЕВЫХ СТЕН ПОЛУВАГОНОВ-ХОПРОВ 22-471, ПЕРЕВОЗЯЩИХ АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	117
В. В. КОВАЛЕНКО (НМетАУ), Ю. Л. ЗАЯЦЬ, Т. П. РЕШЕТНЯК, П. О. ПШІНЬКО (ДІТ) МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ, ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ДОГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ, БУДІВЕЛЬНИХ РОЗЧИНІВ ТА ЗАЛІЗОБЕТОНУ	122
В. В. КОВАЛЕНКО (НГУ, Российская Федерация), И. В. КУПЕНКО (ДонНТУ), А. Ю. ПРОКОПОВ (ЮРГТУ, Российская Федерация), С. В. КАРГАПОЛОВ, (ДИОС, г. Донецк) К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ АРМИРОВКИ СТЕЛОВ НА СКОРОСТЬ ИХ КОРРОЗИИ	125
В. П. КОЖУШКО (ХНАДУ) О РАЗВИТИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ.....	128
А. И. ЛАНТУХ-ЛЯЩЕНКО (НТУ, Киев) ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ	130
Й. Й. ЛУЧКО (Львівський державний аграрний університет), А. Я. ПЕНЦАК, Р. Я. ПЕЛЕХ (ТзОВ «Фірма Терміт», Львів) КОНСТРУКЦІЯ ТА РОЗРАХУНОК З'ЄДНАННЯ АРМАТУРНИХ СТЕРЖНІВ ОБТИСКНИМИ ВТУЛКАМИ.....	139
В. Д. ПЕТРЕНКО, В. Т. ГУЗЧЕНКО, О. Л. ТЮТЬКІН (ДІТ) ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОГО НАСИПУ ІЗ ВАРИАНТАМИ ПІДСИЛЕННЯ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ	150

А. Ю. ПРОКОПОВ, М. В. ПРОКОПОВА (ШИ(Ф) ЮРГТУ (НПИ), г. Шахты, Российская Федерация) ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ.....	159
А. Н. ПШИНЬКО, А. В. КРАСНЮК, Т. В. УЛЬЧЕНКО (ДИИТ) ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРРАСТВОРОМ	162
А. В. РАДКЕВИЧ (ДІТ) ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ УЛАШТУВАННЯ БУРОНАБІВНИХ ПАЛЬ У ВОДОНАСИЧЕНИХ ҐРУНТАХ	167
А. С. РАСПОПОВ (ДИИТ) КОНЕЧНО-ГРАФОВЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	170
О. И. РУБЛЕВА (ДонНТУ) ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БУРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОХОДКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ.....	177
Ю. Л. САВИН, А. П. ПРИХОДЬКО, Л. С. САВИН (ПГАСА) ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕТЫРЕХХЛОРИСТОГО ТИТАНА.....	185
С. Г. СТРАДАНЧЕНКО, А. Ю. ПРОКОПОВ, М. С. ПЛЕШКО (ШИ(Ф) ЮРГТУ (НПИ), г. Шахты, Российская Федерация) ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КРЕПИ И АРМИРОВКИ ГЛУБОКИХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ.....	187
А. А. ТАРНОПОЛЬСКИЙ, М. М. РОТМИСТРОВСКИЙ (ПИ «Днепрпроектстальконструкция»), М. И. КАЗАКЕВИЧ (ДИИТ) ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВИСЯЧЕГО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ АММИАКОПРОВОДА ЧЕРЕЗ р. ДНЕПР ПРОЛЕТОМ 720 м.....	193
О. Л. ТЮТЬКІН (ДІТ) ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГЛИНИСТОГО ПОРОДНОГО МАСИВУ ЯК В'ЯЗКО-ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	201
В. С. ШОКАРЕВ (ГНИИСК, Запорожское отделение) УТОЧНЕННЫЙ КРИТЕРИЙ ПИСАРЕНКО-ЛЕБЕДЕВА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	207
Э. ШПЕРФЕХТЕР («Sperno», г. Штутгарт, Германия), С. В. БОРЩЕВСКИЙ (ДонНТУ) РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ НАБРЫЗГ-БЕТОНА ТОНКИМ ПОТОКОМ В ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГЕРМАНИИ.....	211

РОЗДІЛ «АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ»

А. И. ТИМОШКИН (Ростовский государственный колледж связи и информатики, Российская Федерация) О НЕОБХОДИМОМ И ДОСТАТОЧНОМ УСЛОВИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПРОВЕРЯЮЩЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕСТА МИНИМАЛЬНО-ВОЗМОЖНОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ОДНОМЕРНОЙ ИТЕРАТИВНОЙ СТРУКТУРЫ.....	216
---	-----

РОЗДІЛ «МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ»

М. П. БОЖКО, О. О. МАЗУРЕНКО (ДІТ) РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЇ ВАГОНО-ГОДИН НАКОПИЧЕННЯ ВАГОНІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ДВОГРУПНИХ ПОЇЗДІВ	219
А. А. БОСОВ (ДИИТ), Г. Н. КОДОЛА (УкрГХТУ) ЦЕЛОЧИСЛЕННАЯ ВЕКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ.....	223
А. А. ЕРОФЕЕВ (Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь) ПОВЫШЕНИЕ ТРАНЗИТНОСТИ В СИСТЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ	228
В. Н. ЖУРАВЛЕВ, А. Е. АРХИПОВ (НТУУ «КПИ»), И. В. ЖУКОВИЦКИЙ (ДИИТ) АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ (КИНЕМ) РЕЧЕВОГО СИГНАЛА	233

А. П. ИВАНОВ (ДИИТ) ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ Поездов с учетом стоимости активной и реактивной электроэнергии	239
М. М. КОЛОС (Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь) ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ И РАЗМЕРОВ ПАРКА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ПРОДУКЦИИ РУП «ПО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»	242
Д. О. ОСТАПЕЦЬ, В. ЛАПИН (ДІПТ) РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ / АУТЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	249
В. И. ПРИХОДЬКО (ОАО «КрВСЗ»), А. А. БОСОВ, С. В. МЯМЛИН (ДИИТ) ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В КОНСТРУКЦИИ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ	255
Ю. И. ХМАРСКИЙ (ДИИТ) О ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМ СТАНЦИОННОЙ АВТОМАТИКИ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	259

РОЗДІЛ «МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

И. А. ВАКУЛЕНКО (ДИИТ) СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ТЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫДЕРЖЕК ПРИ СУБКРИТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	263
І. О. ВАКУЛЕНКО, М. А. ГРИЩЕНКО (ДІПТ), О. М. ПЕРКОВ (ІЧМ НАНУ) ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАПІВ ЗАРОДЖЕННЯ ТА ЗРОСТАННЯ ТРІЩИН ПРИ НАТУРНОМУ ВИПРОБУВАННІ НА ВТОМЛЕНІСТЬ	266
І. О. ВАКУЛЕНКО (ДІПТ), О. М. ПЕРКОВ (ІЧМ НАНУ), В. Г. АНОФРІЄВ (ДІПТ), В. С. КРОТ (Укрзалізниця) АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС	269
Т. М. МЕЩЕРЯКОВА (Львівська філія ДІПТу), М. О. КУЗІН (Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАНУ) ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДВИГУНІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ	272

ГАЛУЗЬ ЕКОНОМІЧНИХ НАУК

РОЗДІЛ «ЕКОНОМІКА ТРАНСПОРТУ»

В. Є. ВЛАСЮК (ДІПТ) НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ДЕРЖАВНОГО ВТРУЧАННЯ У ПЕРЕРОЗПОДІЛ ДОХОДІВ	279
В. В. КОМПАНИЕЦЬ (УкрДАЗТ, м. Харків) ЛЮДСЬКИЙ КАПІТАЛ: ВИЗНАЧЕННЯ, ОСОБЛИВОСТІ, ВІДТВОРЕННЯ	281
І. П. КОРЖЕНЕВИЧ, М. Б. КУРГАН, Ю. С. БАРАШ (ДІПТ) ВПЛИВ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ВИТРАТИ, ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗНОСОМ КОЛІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	285

МОДЕЛЬ ВЫНОСЛИВОСТИ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

У статті надано математичну модель, що описує процес зміни границі витривалості матеріалів і конструкцій залізничного рухомого складу з урахуванням зміни параметрів кривої витривалості в процесі їх навантаження.

В статье представлена математическая модель, описывающая процесс изменения предела выносливости материалов и конструкций железнодорожного подвижного состава с учетом изменения параметров кривой выносливости в процессе их нагружения.

In the article the mathematical model describing the process of changing a limit of durability of the railway rolling stock materials and structures with taking into account the change of parameters of durability curve during loading them is presented.

Исследование выносливости распространенных конструкционных материалов является неизменно актуальной проблемой. Поэтому разработка и совершенствование математических моделей, описывающих характеристики сопротивления усталости с учетом их изменения в процессе длительной работы конструкций, важна при решении задач прогнозирования и продления сроков службы, а также оценки их механических свойств.

В работе [1] предложена математическая модель, позволяющая описывать процесс понижения предела выносливости материала или детали под действием циклических нагрузок. Модель основана на использовании наиболее распространенной степенной аппроксимации кривой выносливости (Вёллера).

Основным расчетным соотношением, описывающим согласно [1] характер изменения во времени предела выносливости, является интегродифференциальное уравнение вида

$$\frac{d(\sigma_{-1}^m)}{dt} + \frac{\lambda}{N_{-1}} \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma^m f(\sigma) d\sigma = 0, \quad (1)$$

здесь $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(t)$ – предел выносливости материала или конструкции как функция времени t ; $\lambda = dn/dt$ – постоянная для стационарного или квазистационарного режимов нагружения интенсивность колебаний, определяемая как количество их циклов n в единицу времени; m – показатель степени кривой выносливости; N_{-1} – количество циклов нагружения образца или детали, соответствующее напряжению σ_{-1} (точка перелома кривой выносливости), принятое в работе [1] постоянным; $f(\sigma)$ – дифференциаль-

ная функция закона распределения вероятности появления в образце или детали напряжений с амплитудой σ .

При действии длительных переменных нагрузок параметры N_{-1} и m , которые относятся к механическим характеристикам материала (детали), меняются. Это явление обсуждается во многих работах (например, [2-4]). Поэтому эти параметры можно попытаться рассматривать как функции времени $N_{-1} = N_{-1}(t)$, $m = m(t)$ или предела выносливости $N_{-1} = N_{-1}(\sigma_{-1}(t))$, $m = m(\sigma_{-1}(t))$, когда сам предел выносливости является функцией времени.

Один из возможных способов задания характера изменения показателя степени кривой выносливости может быть предложен на основе эмпирического регрессионного уравнения, приведенного в работе [4]

$$m = 33 \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}, \quad (2)$$

где σ_b – предел прочности материала (или конструкции).

Эргодичность зависимости (2) на случай изменения предела выносливости в течение времени нагружения (то есть справедливость данного соотношения как для выборки по образцам из разных материалов, так и по реализациям процессов нагружения одного материала), по нашим данным, не исследовалась и не проверялась. Предположив справедливость такой зависимости и считая величину σ_b практически независимой [5] от времени, выражение (2) для материала в исходном состоянии и после нагружения в течение времени t запишем в форме

$$m_0 = 33 \cdot \frac{\sigma_{-10}}{\sigma_B};$$

$$m(t) = 33 \cdot \frac{\sigma_{-1}(t)}{\sigma_B}. \quad (3)$$

В выражениях (3): σ_{-10} – начальное (или на момент контроля выносливости) значение предела выносливости; m_0 – начальная (на момент контроля) величина показателя степени кривой выносливости.

Разделив выражения (3) одно на другое, получим соотношение, определяющее связь показателя $m(t)$ с пределом выносливости $\sigma_{-1}(t)$ в некоторый момент времени

$$m(t) = m_0 \cdot \frac{\sigma_{-1}(t)}{\sigma_{-10}} = k_m \cdot \sigma_{-1}(t), \quad (4)$$

здесь $k_m = m_0 / \sigma_{-10}$ – коэффициент пропорциональности между пределом выносливости и показателем степени кривой выносливости, зависящий только от начальных свойств материала.

В работе [2] предлагается также эмпирическое соотношение, связывающее положение точки перегиба N_{-1} в циклах (ассоциируемой с величиной базы испытаний на выносливость) с величиной предела выносливости σ_{-1} (в кН/см^2) и показателем степени её кривой m в форме

$$\lg(N_{-1}) = 4,3214 + (1,3596 - \lg \sigma_{-1}) \cdot m. \quad (5)$$

Преобразовав формулу (5) к виду

$$\lg(N_{-1}) + \lg(\sigma_{-1}) \cdot m = 4,3214 + 1,3596 \cdot m$$

и приняв обозначения $\lg(N_{-10}) = 4,3214$ и $\lg(\sigma_{-10}) = 1,3596$, после потенцирования получим следующее выражение для суммарного объема наработки $D(0)$ до разрушения

$$D(0) = N_{-10} \cdot \sigma_{-10}^{m(t)}. \quad (6)$$

В течение циклического нагружения объем наработки уменьшается на величину, текущее значение которой зависит от уровня разрушающего напряжения. Для постоянного напряжения амплитудой σ_n он составит

$$D(t) = D(0) - d(t);$$

$$d(t) = \sum_{k=0}^{n(t)} \sigma_n^{m(t_k)} \uparrow t_k \in \overline{0, t}. \quad (7)$$

здесь $d(t)$ – величина показателя наработки, накопленная при циклическом нагружении до текущего времени t ; $n(t)$ – количество циклов

нагружения материала или детали за период времени $\overline{0, t}$.

Следует отметить, что соображения, на основании которых получено выражения (5), не вполне понятны. Для поверхностной оценки возможности использования этого выражения для определения положения точки перегиба кривой выносливости рассмотрим два варианта его использования:

- с постоянным показателем степени кривой выносливости m , что приводит к зависимости

$$N'_{-1} = 10^{4,3214 + (1,3596 - \lg \sigma_{-1}) \cdot m}; \quad (8)$$

- с переменным показателем степени кривой выносливости m по уравнению (4), что приводит к выражению

$$N''_{-1} = 10^{4,3214 + (1,3596 - \lg \sigma_{-1}(t)) \cdot k_m \cdot \sigma_{-1}(t)}. \quad (9)$$

Рассмотрим оба эти выражения как функции величины предела выносливости σ_{-1} . Графики указанных функций приведены на рис. 1 и 2. При постоянном показателе степени кривой выносливости значение абсциссы точки перегиба кривой выносливости с уменьшением текущего значения предела выносливости монотонно и интенсивно возрастает. Таким образом, выражение (8) не совместно с фактом понижения величины σ_{-1} и одновременным увеличением крутизны кривой выносливости. Выражение (9), как видно из характера соответствующей функции, представляется более адекватным.

Однако, как показывают численные эксперименты, применение формулы (8), полученной путем усреднения данных по различным типам сталей, приводит к возникновению существенных погрешностей при определении наработок в циклах до разрушения. Это наводит на мысль о необходимости учета дополнительных факторов, таких как уровень нагружения, что, в частности, косвенно затрагивается в работе [6].

Величины суммарной наработки до разрушения, определенные как интеграл от выражения (7), очевидно, будут иметь различные значения при постоянном и переменном показателе кривой выносливости. Это будет учитываться далее простейшим образом, путем введения постоянного поправочного коэффициента при величине наработки, зависящего от величины действующего разрушающего напряжения, а именно, из (7)

$$d(t) = \alpha(\sigma_n) \cdot \sum_{k=0}^{n(t)} \sigma_n^{m(t_k)} \uparrow t_k \in \overline{0, t}, \quad (10)$$

α – поправка, зависит от величины разрушающего напряжения $\sigma_{и}$, которая находится как полиномиальная функция указанного напряжения.

Путем численного подбора получены следующие выражения для полиномов поправочных $\alpha(\sigma_{и})$, аппроксимирующих ее как функцию действующих разрушающих напряжений:

- для конструкции (при $k_{\sigma}=3,5$) – полином первого порядка

$$\alpha_k(\sigma_{и}) = 0,017 \cdot \sigma_{и} + 4,041;$$

- для материала (при $k_{\sigma}=1,0$) – полином третьего порядка

$$\alpha_m(\sigma_{и}) = 7,583 \cdot 10^{-6} \sigma_{и}^3 - 4,323 \cdot 10^{-3} \sigma_{и}^2 + 0,8934 \cdot \sigma_{и}^1 - 42,215.$$

Графики поправочных коэффициентов приведены на рис. 3, 4 в типичных для них пределах изменения разрушающих напряжений.

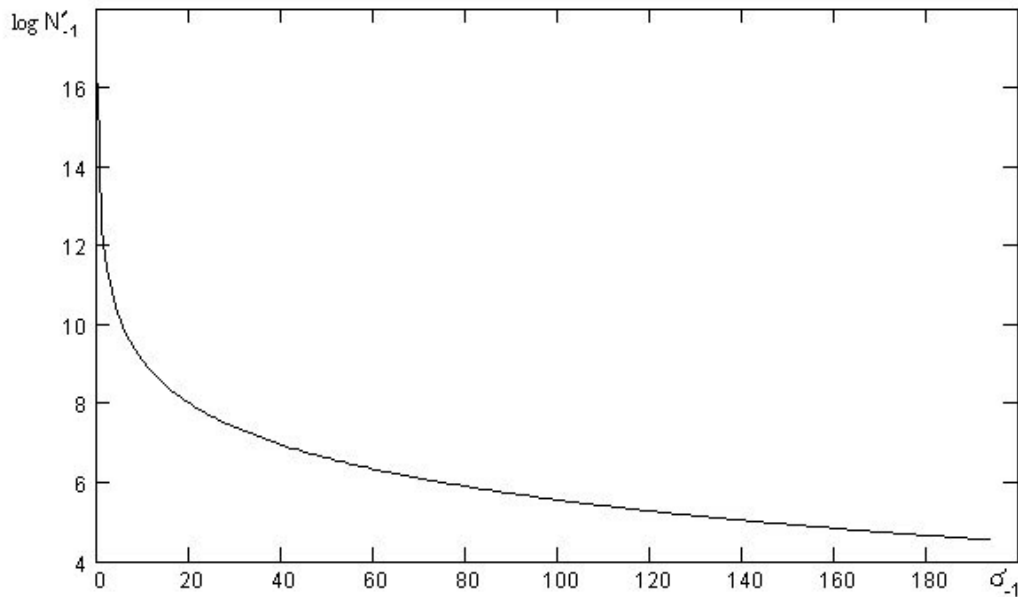


Рис. 1. Зависимость координаты точки перегиба в циклах от величины предела выносливости в МПа при постоянном показателе степени кривой выносливости

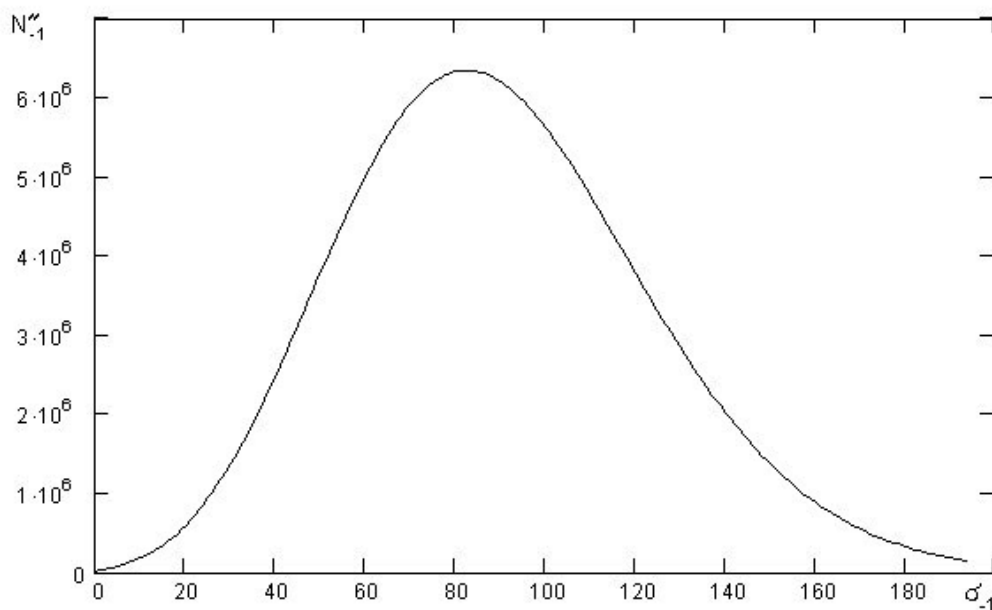


Рис. 2. Зависимость координаты точки перегиба в циклах от величины предела выносливости в МПа при переменном показателе степени кривой выносливости

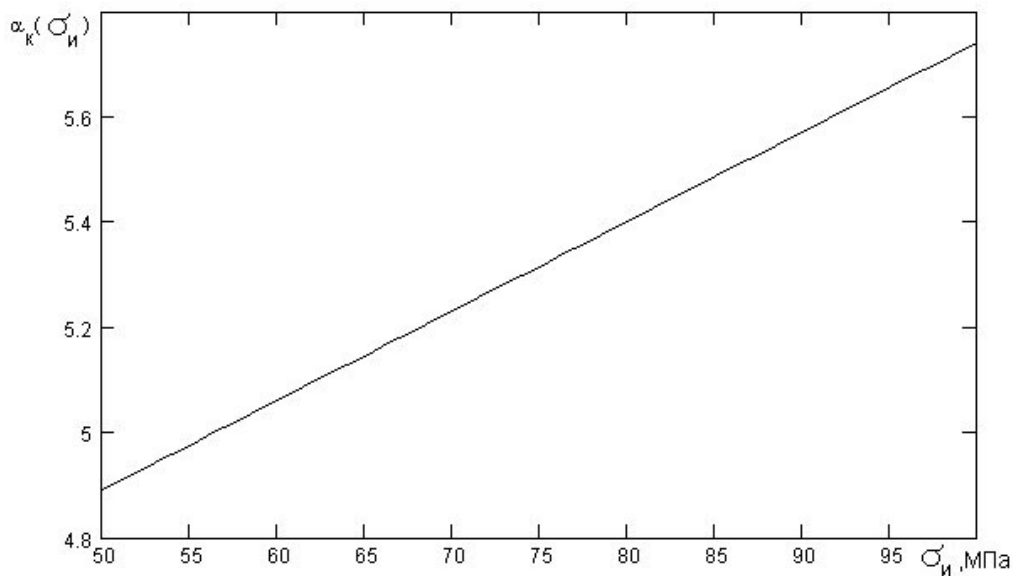


Рис. 3. Зависимость поправочного коэффициента наработки конструкции α_k от величины разрушающего напряжения $\sigma_{и}$

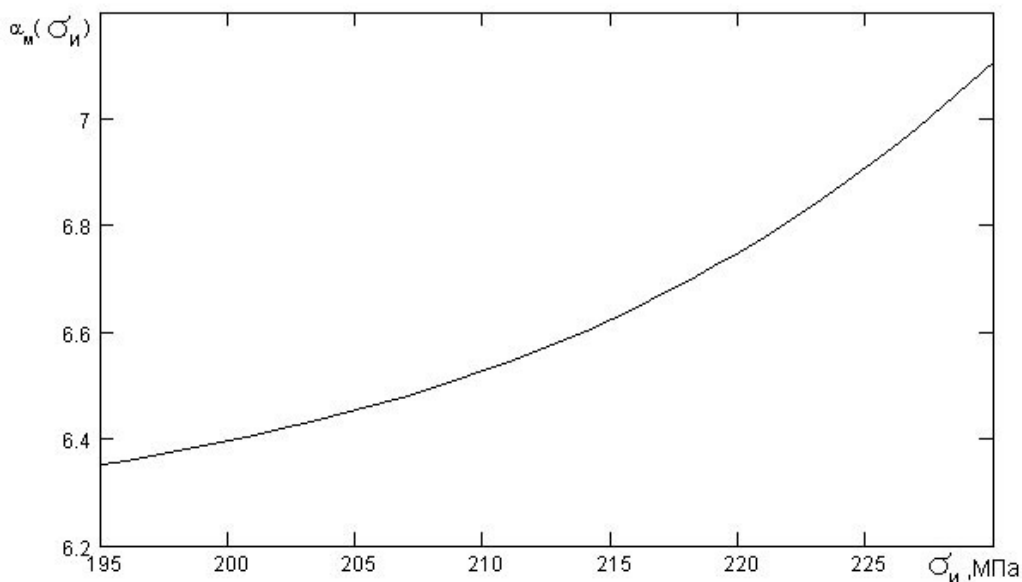


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента наработки материала α_m от величины разрушающего напряжения $\sigma_{и}$

Для дальнейшего рассмотрения предположим, что на каждом цикле нагружения (или достаточно небольшой группе таких циклов) уменьшение наработки до разрушения материала или конструкции осуществляется за счет уменьшения предела выносливости. Это может быть объяснено тем, что при таком подходе в число разрушающих напряжений ($\sigma > \sigma_{-1}$) попадает наибольшее количество их амплитуд. Это приводит к получению нижней границы ресурса конструкции за счет вовлечения в число разрушающих напряжений большего их ко-

личества в процессе исчерпания наработки. Из выражения (6) получим

$$N_{-1}(t) = \frac{D(t)}{\sigma_{-1}(t)^{m(t)}} \cdot \quad (11)$$

В начальном состоянии (или на момент контроля выносливости) координата точки перелома кривой выносливости $N_{-1}(0)$ определяется уравнением

$$N_{-1}(0) = N_{-10} = \frac{D(0)}{\sigma_{-10}^{k_m \cdot \sigma_{-10}(0)}} \cdot \quad (12)$$

Предложенные соотношения (1), (4) отражают динамику изменения характеристик сопротивления усталости в среднем, что следует из самого способа их задания в уравнении (2), который основан на линейной эмпирической аппроксимации экспериментальных данных.

Выражения (1), (4) и (11) могут быть использованы для уточнения уравнения выносливости (1). Подставив (4), (11) в уравнение (1), имеем

$$\frac{d(\sigma_{-1}^{k_m \cdot \sigma_{-1}})}{dt} + \frac{\lambda \cdot (\sigma_{-1})^{k_m \cdot \sigma_{-1}}}{D(t)} \times \times \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma^{k_m \cdot \sigma_{-1}} f(\sigma) d\sigma = 0. \quad (13)$$

Модифицированное уравнение выносливости (13) решается при следующих начальных условиях для нового образца или детали: $\sigma_{-1}(t)|_{t=0} = \sigma_{-10}$; $m(t)|_{t=0} = m_0$; $N_{-1}(t)|_{t=0} = N_{-10}$.

Вынося теперь функцию величины предела выносливости из-под дифференциала, с учетом

$$\frac{d(\sigma_{-1}^{k_m \cdot \sigma_{-1}})}{dt} = k_m \cdot (\sigma_{-1})^{k_m \cdot \sigma_{-1}} \times \times [1 + \ln(\sigma_{-1})] \cdot \frac{d(\sigma_{-1})}{dt} \quad (14)$$

уравнение выносливости в форме зависимости предела выносливости от времени окончательно получим в виде

$$\frac{d(\sigma_{-1})}{dt} + \frac{\lambda}{k_m \cdot [1 + \ln(\sigma_{-1})]} \cdot \frac{1}{D(t)} \times \times \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma^{k_m \cdot \sigma_{-1}} f(\sigma) d\sigma = 0. \quad (15)$$

Заметим попутно, что при $\lambda = 1$ полученное решение для гармонического нагружения численно совпадает с долговечностью детали или конструкции в циклах нагружения.

Особенностью выражения (15) является разрыв второго рода при $\sigma_{-1} = 0$ множителя, стоящего перед интегральной частью уравнения, обусловленный характером принятого за-

кона изменения показателя степени кривой выносливости $m(t)$.

Очевидно, что аналитическое решение данного уравнения при произвольном законе распределения напряжений $f(\sigma)$ является достаточно затруднительным. Поэтому приведенные в данной работе результаты решения уравнения (8) получены с использованием численных методов.

При действии разрушающих напряжений постоянной амплитуды, что может быть распространено и на случай блочных нагружений, с учетом (1), (4), (7), (10) и (11) получим

$$\sigma_{-1}(t) = \sigma_{-1}(t - \Delta t) \times \times \left(1 - \frac{n(t - \Delta t, t) \cdot \sigma_{и}^{m(t - \Delta t)}}{D(0) - d(t)} \right)^{\frac{1}{m(t - \Delta t)}};$$

$$d(t) = \alpha(\sigma_{и}) \cdot \sum_{k=0}^{n(t - \Delta t)} \sigma_{и}^{m(t - \Delta t)} \uparrow t_k \in \overline{0, t - \Delta t}, \quad (16)$$

где $n(t - \Delta t, t)$ – количество циклов нагружения за период времени $t - \Delta t..t$.

Аналогичные зависимости, построенные на основе уравнения (1), имеют вид

$$\sigma_{-1}(t) = \sigma_{-1}(t - \Delta t) \cdot \left(1 - \frac{n(t - \Delta t, t) \sigma_{и}^m}{D(0) - d(t)} \right)^{m^{-1}};$$

$$d(t) = \sum_{k=0}^{n(t - \Delta t)} \sigma_{и}^m \uparrow t_k \in \overline{0, t - \Delta t} \quad (17)$$

Зависимость (16) получена путем применения простейшей конечно-разностной формулы интегрирования (формула прямоугольников), с учетом предположения, что координата точки перегиба $N_{-1}(t)$ независимо изменяется таким образом, чтобы удовлетворять соотношению (11).

Параметры для расчета зависимостей рис. 2 приняты на основании данных железнодорожных Норм расчета [6] для стали ВСтЗсп с учетом соответствующих коэффициентов концентрации, вводимых при переходе от материала к сварной конструкции.

На рис. 5-8 приведены характерные графики изменения основных параметров уточненной модели выносливости (16).

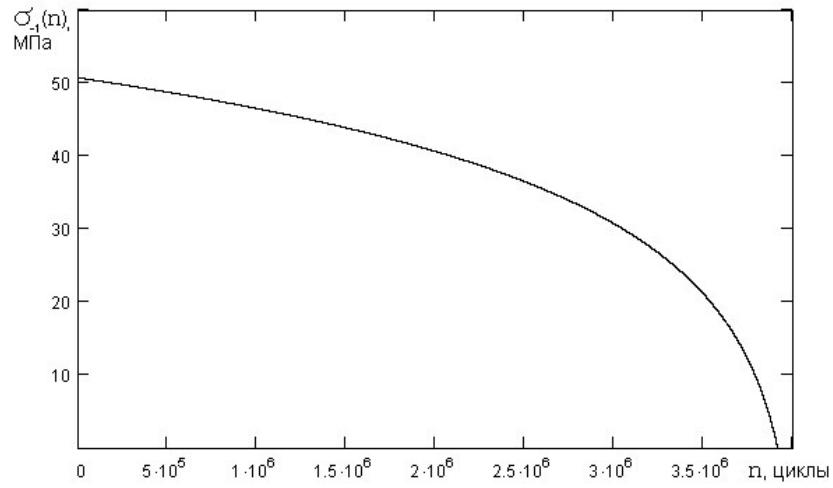


Рис. 5. Зависимость предела выносливости конструкции σ_1 от количества циклов нагружения

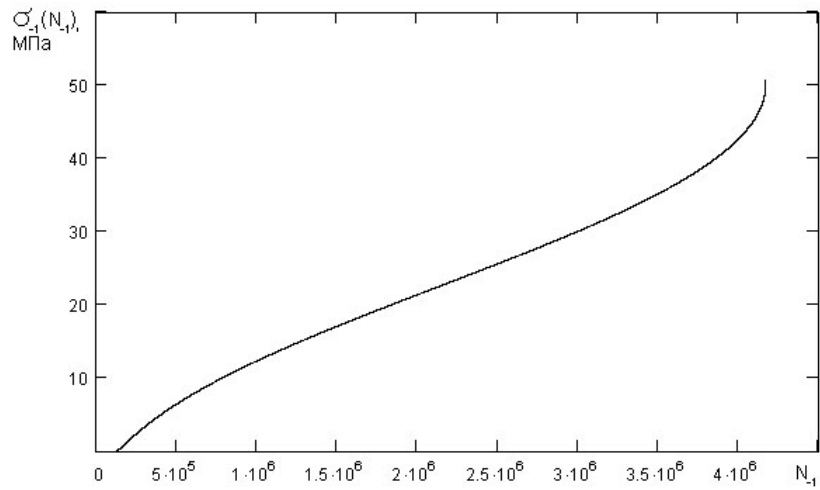


Рис. 6. Зависимость предела выносливости конструкции σ_1 от координаты точки перегиба кривой выносливости N_1



Рис. 7. Зависимость наработки конструкции $D(n)$ от количества циклов нагружения

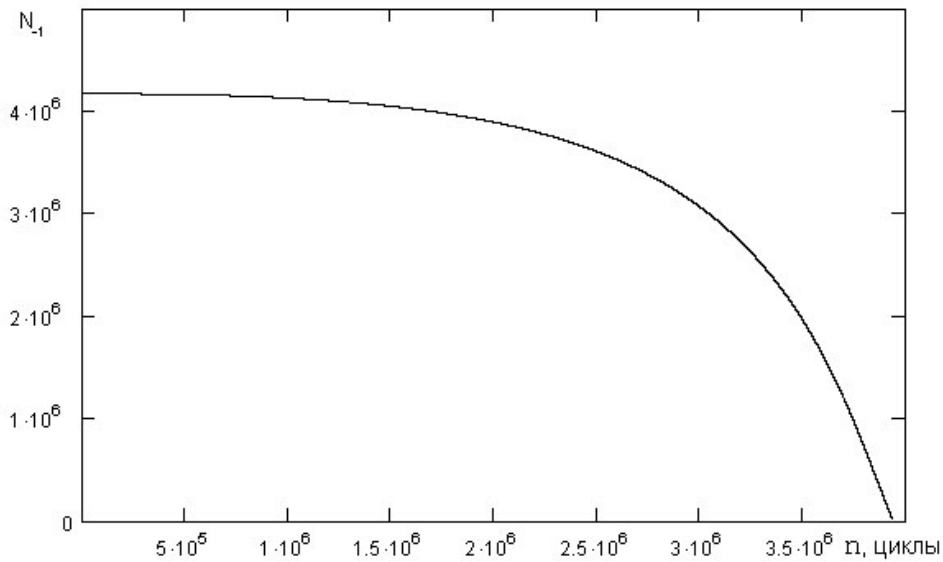


Рис. 8. Зависимость координаты точки перегиба N_1 кривой выносливости от количества циклов нагружения

Учитывая очевидный (по крайней мере, для не упрочняющихся материалов) факт, что под действием нагрузки предел выносливости снижается, можно предположить, что производная в области малых напряжений должна быть положительной, а функция f_1 – монотонно возрастающей. Поэтому решение уравнений (14) и (16) можно считать окончанным по достижении

пределом выносливости минимального значения $\sigma_{-1\min} \approx 0,4$ МПа, когда решение теряет физический смысл.

Для сравнения рассмотренных в статье моделей на рис. 9 приведены результаты расчета временных зависимостей $\sigma_{-1}(t)$, полученных при адекватных исходных данных.

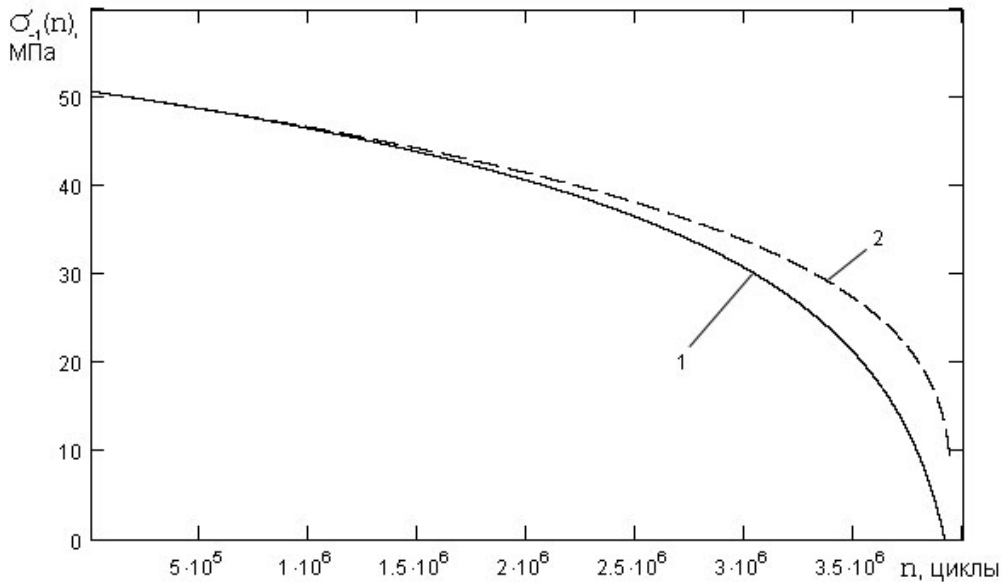


Рис. 9. Сравнение динамики изменения предела выносливости от количества циклов нагружения: 1 – модель, учитывающая изменение наклона кривой выносливости; 2 – упрощенная модель.

При этом использовались упрощенное уравнение выносливости (17) и уравнение (16), учитывающее изменение положения кривой выносливости, связанное с изменением механических свойств материала или конструкции.

В упрощенной модели приняты значения $m_0 = m = 3,5$, $\lambda = 1 \text{ с}^{-1}$ и $\sigma_{-10} = 50,7$ МПа, при коэффициенте концентрации $k_\sigma = 3,5$, которые рекомендованы нормативной документацией [6], как типичные расчетные значения для конст-

рукционной стали ВСтЗсп. В уточненной модели принято значение $m_0 = 3,5$ и дополнительно $D(0)=4,022 \cdot 10^{12}$, $\sigma_{-10}=50,7$ МПа и $N_{-10}=20960$. Расчеты проводились для случая нагружения конструкции нагрузками, вызывающими появление напряжений с постоянными амплитудами.

Как показывают результаты численных экспериментов, уточненное уравнение выносливости (16), как правило, дает решение $\sigma_{-1}(t)$, которое при равных условиях является оценкой снизу ресурса образца или детали за счет более интенсивного понижения предела выносливости, при общем подобии характера изменения предела выносливости от времени (или количества циклов нагружения).

Весьма интересным аспектом адекватности предлагаемой модели выносливости является возможность учета нелинейного накопления повреждений. Кривые накопления повреждений при разрушении образца на нескольких последовательных блоках с повышающимися или понижающимися амплитудами, приводятся в монографии [7]. Абстрагируясь от способа конкретной оценки вклада каждого такого блока, можно заметить, что если разрушение происходит с убывающими во времени амплитудами, то разрушение происходит при суммарном показателе меры повреждения, меньшем единицы.

Если же сначала действуют малые амплитуды напряжений, а затем большие, то разрушение происходит при суммарном показателе меры повреждения, большем единицы. Иногда говорят, что в этом случае происходит тренировка, приспособление к циклическому нагружению. Сказанное иллюстрируется графиками рис. 10, взятыми из монографии [8]. Экспериментальные значения суммы относительных долговечностей в момент разрушения колеблются от 1/4 до 4.

Представляется интересным, с учетом нелинейности изменения суммарной наработки детали (рис. 7) при использовании уточненной модели выносливости, выполнить численное моделирование последовательного блочного нагружения образцов материала и экземпляров конструкции напряжениями с возрастающими или убывающими амплитудами. Для двухблочного нагружения результаты оценки накопления повреждений приведены на рис. 11.

Из сравнения графиков рис. 11 и 12 можно заметить наличие сходного характера накопления повреждений, определенное как по экспериментальным данным, так и на уточненной

модели. Поскольку стохастическое нагружение после его схематизации [9] может быть рассмотрено, как последовательность блоков нагружения длительностью в один цикл, полученные результаты автоматически переносятся на случай нагружения образцов или деталей случайными нагрузками.

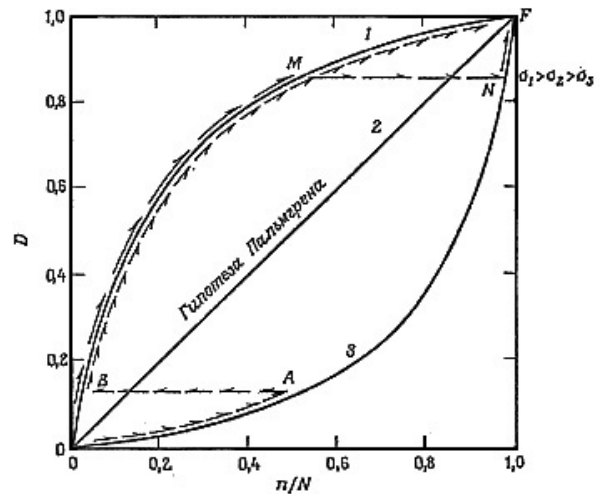


Рис. 10. Формы зависимости меры повреждения от нормированного числа циклов по данным работы [7]

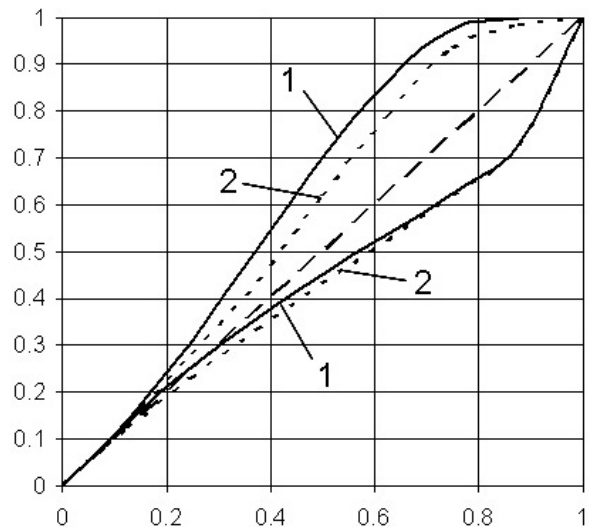


Рис. 11. Формы зависимости меры повреждения от нормированного числа циклов для уточненной модели выносливости с параметрами: 1 – сварной конструкции; 2 – конструкционного материала

Работы по оценке и продлению срока службы подвижного состава зачастую связаны с экспериментальной оценкой текущего предела выносливости материала или конструкции. Поэтому для решения задач, связанных с оценкой *остаточного* ресурса несущих конструкций, длительное время находящихся в эксплуатации, предпочтительнее применение уточненной мо-

дели (уравнение (8)), менее чувствительной к данному параметру. Однако параметры уточненной модели (особенно величины σ_{-10} , m_0 и $D(0)$) должны быть весьма тщательно определены на этапе контроля характеристик сопротивления усталости материалов, работавших под действием длительных циклических нагрузок.

ВЫВОДЫ

1. Предложена уточненная модель снижения предела выносливости материалов при действии циклических нагрузок, учитывающая изменение характеристик материала в течение длительного нагружения.
2. Предложенная уточненная модель выносливости является адекватной и позволяет учитывать нелинейный характер накопления повреждений при блочном и случайном нагружении.
3. Представляется предпочтительным использование уточненной модели выносливости для решения задач продления срока службы подвижного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горобец В. Л. Принцип эргодичности в модели выносливости материалов и конструкций //

- Залізн. транспорт України, 2003. – № 4. – С. 32-35.
2. Серенсен С. В. Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. Избр. тр. в 3-х т. – К.: Наук. думка, 1985. – Т. 3. – 232 с.
3. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М: Машиностроение, 1977.
4. Гольд Б. В. Основы прочности и долговечности автомобиля / Б. В. Гольд, Е. П. Оболенский, Ю. Г. Стефанович, О. Ф. Трофимов. – М: Машиностроение, 1974.
5. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости. – М: Машиностроение, 1969.
6. Гусев А. С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. – М.: Машиностроение, 1989.
7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.
8. Коллинз Д. Повреждение материалов в конструкциях, анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984.
9. ГОСТ 25.101-83, Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – М.: Госстандарт СССР, 1983. – 224 с.

Поступила в редколлегию 26.03.2008.

С. В. ПИЛИПЕНКО (Укрзалізниця), О. М. БОНДАРЄВ, В. Л. ГОРОБЕЦЬ,
О. І. ГІЛЕВИЧ, В. В. ГЛУХОВ, К. І. ЖЕЛЕЗНОВ, В. П. ЛІТВІНОВ, Є. Ф. ФЕДОРОВ,
О. М. ЗАБОЛОТНИЙ, Д. О. ЯГОДА (ДІПТ)

ПОКАЗНИКИ ДИНАМІКИ ТА ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ40^У

В статті наведено результати експериментального визначення показників динаміки та тягово-енергетичних показників електровоза ВЛ40^У. Встановлена придатність щодо експлуатації вказаних електровозів в пасажирському русі з пасажирськими поїздами до 15 вагонів включно.

В статье приведены результаты экспериментально установленных показателей динамики и тягово-энергетических показателей электровоза ВЛ40^У. На основании полученных результатов определена пригодность электровозов подобного типа для эксплуатации в пассажирском движении с поездами до 15 пассажирских вагонов включительно.

In the article the results of dynamic running and traction-energy tests of the electric locomotive VL40^U are presented. In accordance with the test results a conclusion about the suitability of electric locomotive of such a type for operation with trains containing up to 15 passenger coaches inclusive is made.

З економічної точки зору нераціонально використовувати ведіння пасажирських поїздів, які складаються з 10...15 вагонів електровозами ВЛ80^Т, бо при цьому підвищуються затрати електроенергії та затрати праці на одиницю корисної роботи. В Росії розробником електровозів ВЛ80 ВЕЛНДІ була проведена конструкторська робота щодо визначення можливості створення на базі секції вказаного електровоза чотирьохосного односекційного електровоза змінного струму.

Для забезпечення ведення пасажирських поїздів, які складаються з невеликої кількості вагонів (до 15 вагонів), за завданням Укрзалізниці на Запорізькому ЕРЗ та на Львівському ЛРЗ на початку 2003 року почали виготовляти електровози ВЛ40^У. Ці електровози виготовляються з одної секції електровозу ВЛ80 шляхом проведення певної кількості переробок із створенням двох кабін.

Під час переробок та модернізації щодо двох кабін, що створюються, додатково вводиться на тяговому трансформаторі обмотка опалення, при цьому на 20 % знижується потужність тягових обмоток та у 1,5 рази потужність і напруга обмоток власних потреб. Змінено компонування повітряно-масляних теплообмінників. Внаслідок цього знижується у 3 рази затрати повітря на охолодження трансформатора. Під час модернізації згладжуючих реакторів у 2 рази зменшуються затрати охолоджуючого повітря. За рахунок цього виникає можливість

зменшити у 1,5 рази потужність вентиляторів. На електровозі встановлено два головних компресори типу ВУ-3,5 загального виробництва 4 м³/хв. Сумарний об'єм головних повітряних резервуарів не менше 900 літрів. В кабінах управління встановлено калорифери та електроплитки загальною потужністю 8 кВт та два кондиціонери. Модернізовані тягові двигуни дозволять знизити затрати охолоджуючого повітря зі 105 до 70 м³/хв. Суттєво перероблені тягові двигуни. Попередньо проведені теоретичні тягові розрахунки показали, що електровоз ВЛ40^У має бути спроможним щодо ведення поїздів масою до 720 тс (12 вагонів пасажирського поїзду). Але керівництво Головного управління локомотивного господарства України запропонувало низку пропозицій, спрямованих на забезпечення ведення пасажирських поїздів вагою до 900 тс включно (15 вагонів). Тому в цій роботі і було розглянуто питання з визначення надійності роботи усіх пристроїв електровозу ВЛ40^У під час ведення пасажирських поїздів із складом до 15 вагонів відповідно до встановленого графіку руху пасажирських поїздів на основних напрямках Одеської залізниці зі швидкостями до 120 км/год включно. До речі, при проведенні конструктивних переробок передбачалась можливість використання цих електровозів у рухові зі складом вагонів пасажирських поїздів до 140 км/год включно.

Нижче наведено основні технічні характеристики електровоза ВЛ40^У.

Таблиця 1

**Основні технічні характеристики електровоза
ВЛ40^у 1851-1**

№ з/п	Назва характеристики	Значення
1	Габарит за ГОСТ 9238-83	1-Т
2	Номінальне навантаження від колісної пари на рейки, кН (Тс)	235,4 (24,0)
3	Конструкційна швидкість, км/год.	110
4	Частота напруги живлення, Гц	50
5	Сила тяги годинного режиму, кН	160
6	Швидкість годинного режиму, км/год.	71,5
7	Ширина колії, мм	1520
8	Діаметр колеса по кругу кочення при нових бандажах, мм	1250
9	Передаточне відношення тягового редуктора	3,04
10	Система підвищення тягових двигунів	Опірно-осьова
11	Жорстка база візка	3000 мм
12	Тип тягового двигуна	НБ-418 К6
13	Колісні пари згідно ГОСТ 11018-87	Профіль бандажа – креслення №3 ГОСТ 11018-87
14	Потужність системи опалення поїзда при температурі навколишнього середовища нижче 10 °С, кВт	750
15	Вага електровоза, кН (Тс)	941,8 (96,0)

З метою визначення показників динамічності, запасу стійкості і плавності руху та тягово-енергетичних характеристик електровоза ВЛ40^у і встановленню їх відповідності вимогам Норм та Технічному завданню були проведені комплексні динамічні ходові та тягово-енергетичні випробування вказаного електровоза на Одеській залізниці.

Під час проведення випробувань дослідні поїздки були здійснено: зчепом, який складався з дослідного електровозу, вагона-лабораторії ДНУЗТу, тягово-енергетичної лабораторії Оде-

ської залізниці та допоміжного електровоза ВЛ80Т; у складі поїздів № 605 Христинівка – Одеса, № 94 Одеса – Мінськ, № 21 Львів – Донецьк. У складі поїздів дослідні поїздки виконувалися дослідним електровозом, до якого були причеплені вагон-лабораторія ДНУЗТу та тягово-енергетична лабораторія Одеської залізниці. В результаті проведених випробувань були зареєстровані величини, за якими визначалися коефіцієнти вертикальної та горизонтальної динаміки, визначено коефіцієнт запасу стійкості від сходу колеса з рейки і показники плавності руху, а також тягово-енергетичні показники.

Загальний вигляд цього електровоза наведено на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд електровоза ВЛ40^у (виробництва ЗЕРЗ) та дослідний зчеп під час проведення випробувань

При випробуваннях на всьому маршруті безперервно реєструвалися всі процеси, а при обробці зареєстрованих процесів виділялися такі, коли поїзд, або дослідний зчеп рухався по прямих, а також кривих ділянках колії радіусів $350 < R \leq 650$ м, $R > 650$ м.

Найбільшою допустимою швидкістю переважно була швидкість 100 км/год та на деяких ділянках допустимою була швидкість 120 км/год. Різні швидкості руху, при яких про-

водилась реєстрація вимірюваних процесів, практично визначалися графіком руху швидкісних, вантажних та поїздів міжміського сполучення.

Під час проведення динамічних ходових випробувань вимірювалися: переміщення за допомогою реохордних датчиків; прискорення за допомогою акселерометрів; горизонтальні поперечні рамні сили за спеціальною схемою з'єднання тензорезисторів. По виміряних: переміщеннях визначалися динамічні добавки вертикальних сил, які виникають у першому та другому ступенях підвішування; вертикальних та горизонтальних поперечних прискореннях, що виникають у кабіні машиністів, визначалися показники плавності руху; вертикальних прискореннях на редукторі контролювався стан редукторів та колісно-моторних блоків при можливих зриву колісних пар на буксування; деформаціях за відповідним з'єднанням тензорезисторів визначалися горизонтальні поперечні рамні сили. За визначеними динамічними добавками вертикальних сил визначалися коефіцієнти динаміки, а за динамічними добавками сил, що виникають у першому ступені підвішування та горизонтальними поперечними рамними силами визначався коефіцієнт запасу стійкості від сходу колеса з рейки. За величинами прискорень визначалися коефіцієнти плавності руху у горизонтальній та у вертикальній площинах.

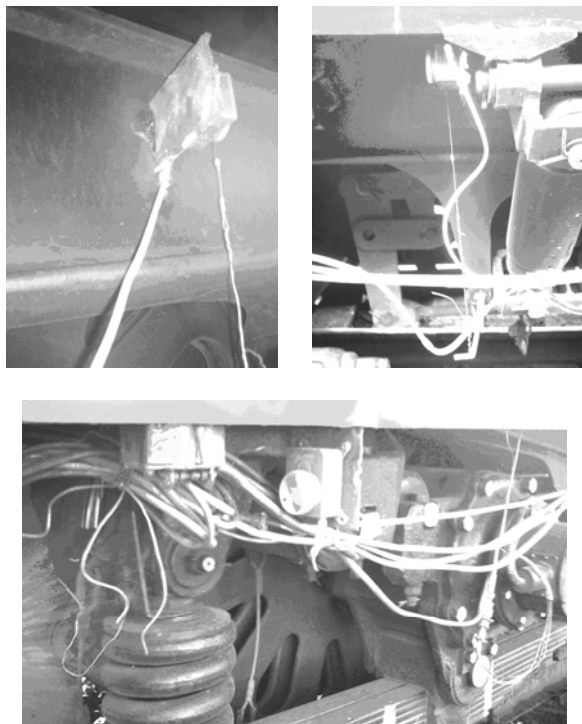


Рис. 2. Датчики та місця їх встановлення на дослідному електровозі

Для вимірювання вертикальних \ddot{Z} та горизонтальних поперечних \ddot{Y} прискорень на підлозі у кабіні машиністів встановлювалося два датчики (акселерометри), за якими визначалися показники плавності руху. На корпусі тягового редуктора першого в напрямку руху візка встановлено датчик вимірювання вертикальних прискорень для контролювання моментів зриву першої колісної пари на буксування.

Для визначення динамічних складових вертикальних сил у першому та другому ступенях підвішування перших візків у буксових вузлах встановлені реохордні датчики $R11, R12, R21, R22, R13, R14$.

Виявлення першого візка відносно кузова електровоза визначалося за допомогою реохордного датчика переміщень $R1Y$, який встановлено у місці розташування першої колісної пари.

Для визначення горизонтальних поперечних рамних сил на бічних поверхнях повздовжніх балок рам візків на рівні нейтрального шару в перерізах, розташованих навколо шкворневих балок з двох сторін, встановлено чотири тензорезистори, які попарно з'єднувалися і далі за їх показаннями визначалися горизонтальні поперечні рамні сили $H1, H2$.

Сила тяги локомотива вимірювалася за допомогою динамометричної автозчепки, що була встановлена на вагоні-лабораторії.

Таким чином, при проведенні динамічних ходових випробувань реєструвалося 13 процесів.

Середні значення стискань пружинних комплектів, які визначено під час проведення підйомів кузова складали: у першому ступені підвішування – 49,3 мм; у другому ступені підвішування – 78,5 мм. Значення вертикальних жорсткостей ресорних комплектів першого та другого ступенів підвішування відповідно складали: 1,54 кН/мм, 0,97 кН/мм (1,94 кН/мм – на один бік візку).

Для визначення коефіцієнтів динаміки, необхідна інформація про статичні навантаження, що створюються у відповідних пружинних комплектах. Величини статичного навантаження мають такі значення: (вага електровозу ВЛ40^У складає 929 кН, вага візків – 320 кН, вага кузова – 609 кН) статичне навантаження, яке припадає на кожний буксовий вузол, дорівнює 87,7 кН; величина статичного навантаження, яка приходить на одну сторону кожного візка від ваги кузова, дорівнює 152 кН.

На рис. 3...5 наведено значення коефіцієнтів вертикальної динаміки динамічних складових

зусиль у першому та другому ступенях підвищення першого за напрямком руху електровоза візка.

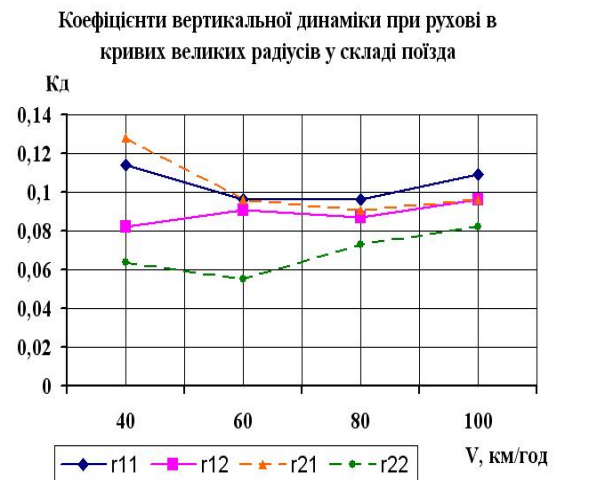
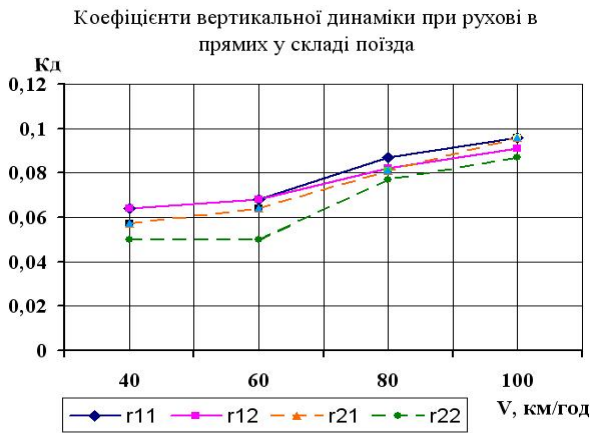


Рис. 3. Коефіцієнти вертикальної динаміки у першому ступені підвищення при рухові в прямих та кривих радіусів $R > 650$ м у складі поїзда

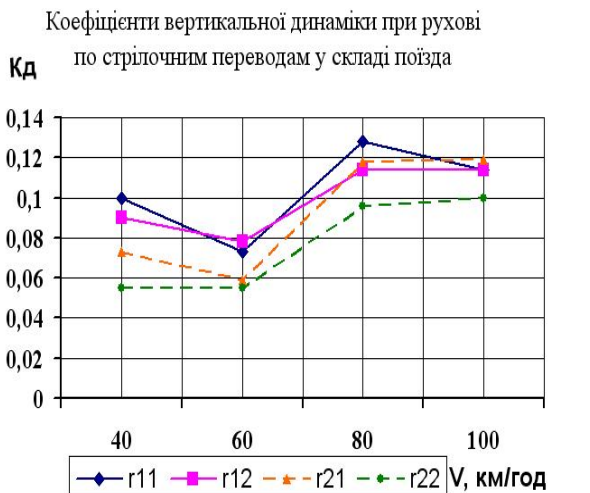


Рис. 4. Коефіцієнти вертикальної динаміки у першому ступені підвищення при рухові по стрілочних переходах у складі поїзда

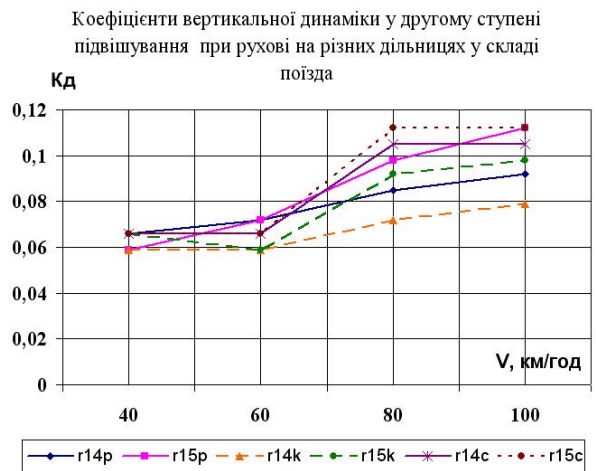


Рис. 5. Коефіцієнти вертикальної динаміки у другому ступені підвищення при рухові на різних дільницях колії у складі поїзда

На наведених рисунках введені такі позначення: $r11, r12, r21, r22$ – графіки зміни коефіцієнтів динамічності у першому ступені підвищення, а $r14$ та $r15$ – у другому ступені підвищення. Додатковими літерами «р», «к», «с» позначено види колії: пряма, крива середніх та великих радіусів, стрілочні переводи.

З наведених результатів виходить, що дослідний електровоз має хороші показники динаміки при рухові на всіх дільницях експлуатації Одеської залізниці. Для пасажирських локомотивів найбільші значення показників динаміки відповідно до вимог Норм складають 0,3 для першої та 0,2 для другої ступенів підвищення.

На рис. 6 наведено залежності сили тяги від швидкості руху. Ці результати отримані шляхом статистичної обробки значень сил тяги на відповідних рівнях швидкості руху.

Тут, як і на попередніх рисунках введені подібні додаткові літери, які відображають вид колії.

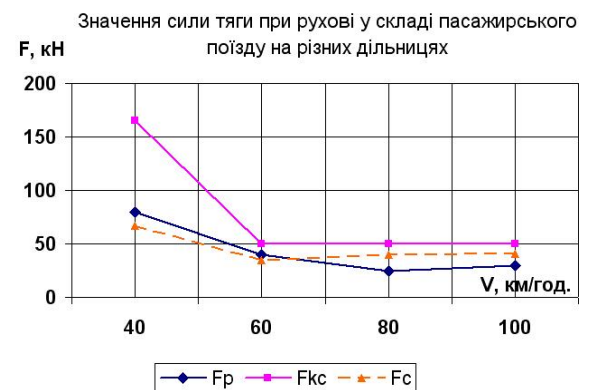


Рис. 6. Залежності сили тяги від швидкості при рухові у складі пасажирського поїзда на різних дільницях колії

На рис. 7 наведені залежності горизонтальних поперечних рамних сил при русові дослідного електровозу у складі пасажирського поїзду.

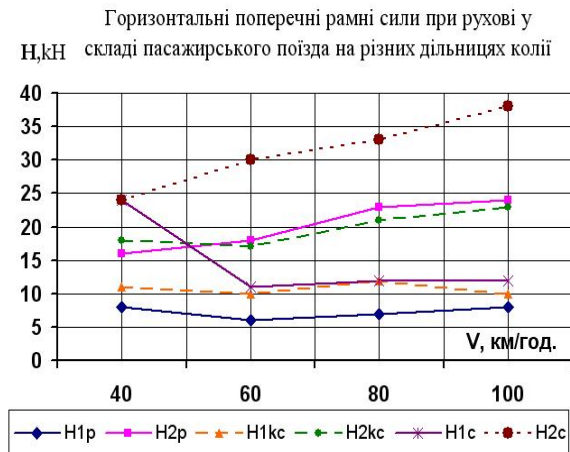


Рис. 7. Залежності горизонтальних поперечних рамних сил при русові у складі пасажирського поїзду на різних ділянках колії

З рис. 7 видно, що найбільші значення горизонтальних поперечних рамних сил H не перевищують Нормативних значень.

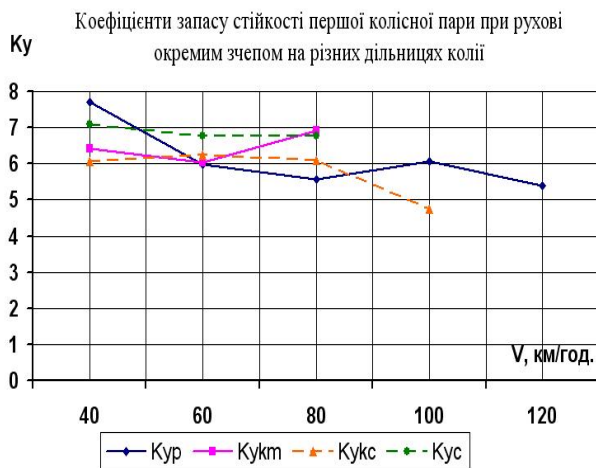


Рис. 8. Значення коефіцієнтів запасу стійкості першої колісної пари при русові окремого зчепу на різних ділянках колії

Використовуючи спеціальну програму, були проведені розрахунки по визначенню коефіцієнтів запасу стійкості від сходу колісних пар з рейок. Результати цих розрахунків наведено на рис. 8...9. Найменше значення коефіцієнту запасу стійкості за Нормами дорівнює 1,4. За отриманими результатами вимірювань та відповідної обробки найменше значення було отримано близько 4,5. Таким чином, по показнику запасу стійкості при швидкостях руху до 120 км/год. включно дослідний електровоз має також суттєвий запас.

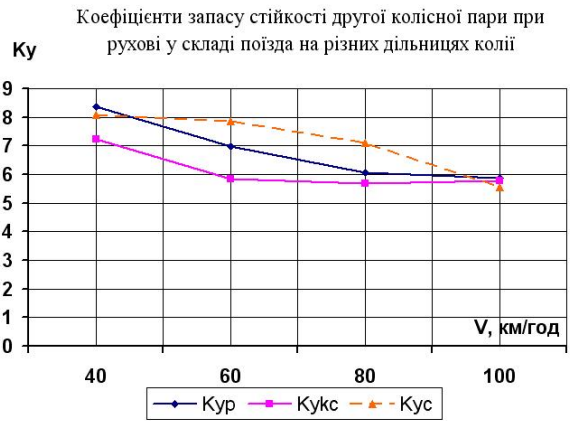


Рис. 9. Значення коефіцієнтів запасу стійкості другої колісної пари при русові у складі пасажирського поїзду на різних ділянках колії

При русові в кривих різних радіусів для електровоза ВЛ40^у показники динаміки знаходяться в межах, які не перевищують Нормативних значень для пасажирських локомотивів.

Далі, за спеціальною програмою та співвідношеннями, наведеними у Нормах, за величинами прискорень, які вимірювалися на підлозі в кабіні машиністів, були визначені показники плавності руху.

В табл. 2 наведено значення показників плавності руху дослідного електровоза ВЛ40^у, визначених при різних швидкостях.

Таблиця 2

Показники плавності руху

V, км/год	Показники плавності руху W1, W2	Електровоз ВЛ40 ^у	
		Вертикальний напрямок	Горизонтальний напрямок
40	W1	2,64	2,43
	W2	2,64	2,43
60	W1	3,08	2,51
	W2	3,08	2,51
80	W1	3,27	2,72
	W2	3,27	2,72
100	W1	3,41	2,81
	W2	3,41	2,81

В цій таблиці: W1 – плавність руху, яка визначалася за середніми значеннями прискорень; W2 – плавність руху, яка осереднена за усіма реалізаціями. При цьому повний час вимірювань у вказаних діапазонах швидкості складав: 40 – 767 с; 60 – 1879 с; 80 – 1859 с; 100 – 894 с. Найбільше нормативне значення показника

плавності руху за Нормами складає 3,75. За цим показником електровоз відповідає вимогам Норм [1-3].

На підставі вимірних прискорень також за спеціальною програмою і співвідношеннями Норм [6-8] та вимог ГОСТ 12.2.056-81 були знайдені значення віброприскорень при кожному значенні швидкості руху. Порівнювання із пороговими значеннями прискорень за Нормами, показують відповідність вимогам Норм виготовленого електровозу за вимогами ГОСТ 12.2.056-81.

На рис. 10 наведено тягові характеристики електровозу ВЛ40^У у відповідності з технічною документацією ЗТС.001.011.РЭ1.

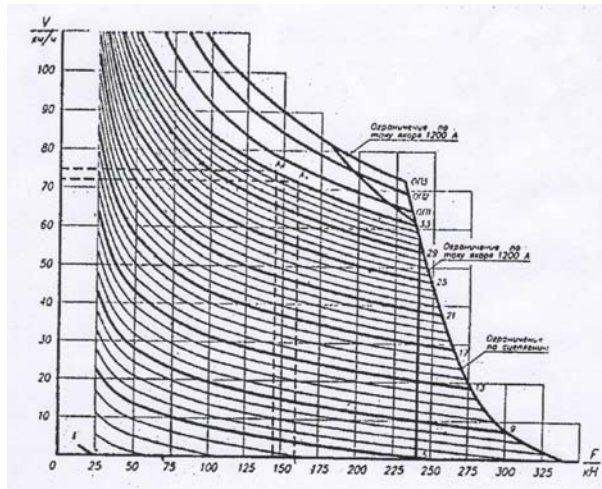


Рис. 10. Тягові характеристики електровоза (ЗТС.001.011.РЭ1)

На рис. 11 наведено пускові характеристики електровозу ВЛ40^У у відповідності з технічною документацією ЗТС.001.011.РЭ1.

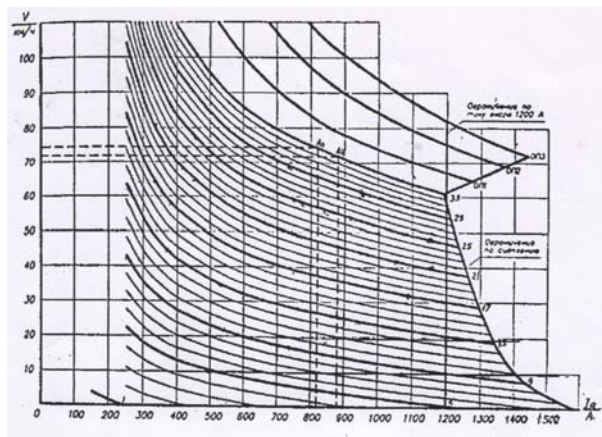


Рис. 11. Пускові характеристики електровоза (ЗТС.001.011.РЭ1)

Пускові характеристики електровоза ВЛ40^У-1851-1, виготовленого відповідно до ТЗ [1] та паспорту [2] згідно з програмою-

методикою [9] визначалися у процесі руху дослідного зчепу, який складався з дослідного електровозу ВЛ40^У-1815-1, вагона-лабораторії ГНДЛ ДМРС ДНУЗТу, тягово-енергетичної лабораторії Одеської залізниці та допоміжного електровоза ВЛ80^Т-2348. Тягове навантаження дослідного електровозу забезпечувалося за рахунок реостатного гальмування електровоза ВЛ80^Т-2348. Під час цих випробувань дослідний електровоз рухався у перед другою кабіною. В такому разі четверта колісна пара була першою в напрямку руху.

При цьому у тягово-енергетичній лабораторії вимірювалися напруга контактної мережі, струми тягових двигунів першої та четвертої колісних пар, напруга живлення першого тягового двигуна. Швидкість руху реєструвалася за показниками швидковимірювача дослідного електровоза, та швидковимірювачів двох вагонів-лабораторій. Номер позиції головного контролера (ЕКГ) реєструвалася показниками сельсина-повторювача, підключеного до сельсина-датчика ЕКГ, який має шкалу з номерами позицій, відповідній шкалі сельсина-приймача на пульті управління електровозом ВЛ40^У-1815.

Значення швидкостей руху, які вимірювалися під час випробувань, перераховувалися до умовних, що відповідають пусковим характеристикам електровоза ВЛ40^У-1815-1 (рис.11) та відповідають параметрам:

Напруга контактної мережі – $U_{км} = 25$ кВ;

Діаметр бандажів колісних пар 1210 мм.

Підрахунки проводилися за формулами:

$$V_{роз} = V_{вим} \frac{U_{дв.н} - I_{дв} \sum r_{дв}}{U_{дв.вим} - I_{дв} \sum r_{дв}}, \quad (1)$$

$$V_{н} = V_{роз} \frac{1210}{D_{к.вим}}, \quad (2),$$

де $V_{роз}, V_{вим}$ – відповідно розрахункові та виміряні значення швидкості руху, км/год;

$V_{н}$ – нормалізоване (приведене до $D_{к} = 1210$ мм) значення швидкості, км/год;

$I_{дв}$ – значення струму, що вимірюється, А (для побудови пускових характеристик використовувалися величини струму першого тягового двигуна, як найбільш навантаженого);

$\sum r_{дв} = 0,03$ Ом – величина опору ланцюга живлення тягового двигуна;

$D_{к.вим}$ – діаметр коліс електровоза по колу кочення, мм (використовувалися значення за

даними вимірювань спеціалістами локомотивного депо Котовськ).

Далі виміряні значення напруг, струмів та швидкостей вводилися у ПЕОМ, яка виконувала перерахунок значень швидкостей за формулами (1)-(2) і розбудовувалися пускові характеристики на підставі використання стандартних програм Excel.

Для оцінки параметрів тягової характеристики додатково вимірювалася величина сили тяги за допомогою динамометричного автозчепного пристрою, який встановлено на вагоні-лабораторії ГНДЛ ДМРС. На підставі вимірних значень зусиль проводилася статистична обробка при фіксованому значенні швидкості руху. Одночасно реєструвалися позиції контролера ЕКГ. Для реєстрації номера позиції головного контролера було зібрано логічну схему, яка реагувала на зміну стану блок-контактів ЕКГ. При цьому значення параметрів, що вимірюються (швидкість руху та сила тяги) перераховувалися згідно параметрів тягової характеристики (рис. 10) за співвідношеннями (1), (2), а сила тяги – за наступною формулою

$$F_{АСН} = F_{АСВМ} \frac{D_{к.ВМ}}{1210}, \quad (3),$$

де $F_{АСН}$ – нормалізоване (приведене до $D_k = 1210$ мм) значення сили тяги у автозчепці, кН;

$F_{АСВМ}$ – вимірне за допомогою динамометричного автозчепного пристрою значення сили тяги, кН;

$D_{к.ВМ}$ – вимірний (фактичний) діаметр колеса електровоза, мм.

Визначення фактичних діаметрів бандажів по колу катання $D_{к.ВМ}$ проводилася на основі вимірювань в локомотивному депо Котовськ. Для перерахування величин швидкостей та сили тяги до приведених (нормалізованих) значень прийнято середній діаметр бандажу $D_{к.ВМ} = 1236$ мм.

Досліди по визначенню параметрів пускових (струмових) характеристик проводилися при поїздках дослідного зчепу на дільницях Котовськ – Вапнярка, Котовськ – Одеса.

В процесі поїздок попередньо здійснювалось порівняння значень контрольованих параметрів, що вимірювалися апаратурою тягово-енергетичної лабораторії (ТЕВЛ) та вагону-лабораторії ГНДЛ ДМРС (ДВЛ) при їх одночасній реєстрації. Результати для декількох до-

слідів наведено в табл. 3. Різниця результатів вимірювань не перевищувала 5 %. Подальші дослідження проводилися на основі даних реєстрації значень параметрів апаратурою ДВЛ, яка здійснювалася з інтервалом у одну секунду.

На протязі дослідів на дільниці Вапнярка – Котовськ загальною тривалістю 3 год 29 хв 04 с було виконано 12544 реєстрації, а на дільниці Котовськ – Одеса загальною тривалістю 2 год 57 хв 01 с, було зроблено 10621 реєстрацію, крім того, на дільниці Одеса – Бугаз загальною тривалістю 2 год 17 хв 01 с було виконано 8241 реєстрацію, результати обробки яких наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри, які реєструвалися на дільниці Одеса – Бугаз

Поїздка Одеса – Бугаз								
№ з/п	Т _{ас} , с	Поз	ОП	I _{д1} , А	I _{д4} , А	U _д , В	V, км/год	U _{кс} , В
1	206	5	0	260	257	195	21	24,8
2	408	0	0	13	10	3	26	24,9
3	1244	0	0	12	10	4	50	25,6
4	1665	14	0	343	329	436	48	25,2
5	1942	0	0	26	24	11	24	26,1
6	2832	0	0	14	9	12	44	18,2
7	2955	5	0	148	163	203	39	26,5
8	3195	1	0	41	61	60	23	26,5
9	5579	0	0	15	10	2	13	26,6
10	7739	21	3	601	614	660	75	25,1
11	8754	0	0	14	10	3	50	25,6

З табл. 3 виходить, що величина струму ТЕД четвертої колісної пари значно нижче (до 105 А), ніж струм ТЕД першої колісної пари. Це може бути пояснено проковзуваннями четвертої колісної пари.

При струмах 930...1000 А відзначалось проковзування першої колісної пари, яке супроводжувалось різким зменшенням струму ТЕД1. Подібні явища в умовах експлуатації не спостерігаються, оскільки при веденні пасажирських поїздів, які можуть мати до 18 вагонів включно вище вказані значення струмів у тягових двигунах не досягаються.

На підставі зазначених реєстрацій після їх нормалізації випробувально-обчислювальним комплексом побудовані пускові характеристики електровозу ВЛ40У-1851-1. Деякі з них наведено на рис. 12...15.

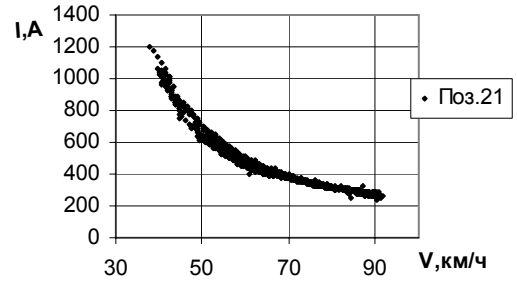
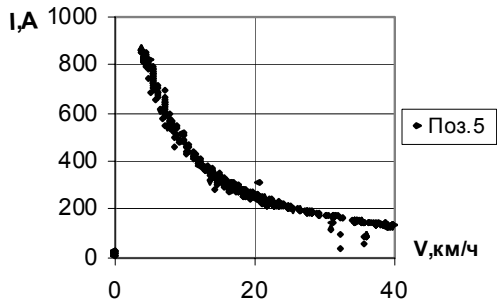
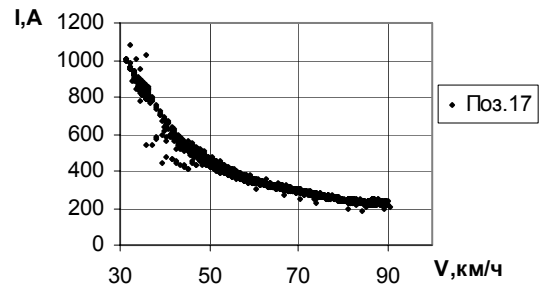
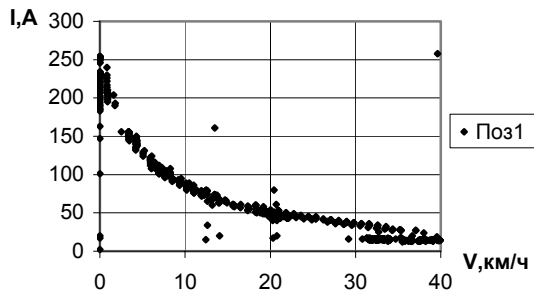


Рис. 12. Контролер у позиціях 1, 5

Рис. 14. Контролер у позиції 17, 21

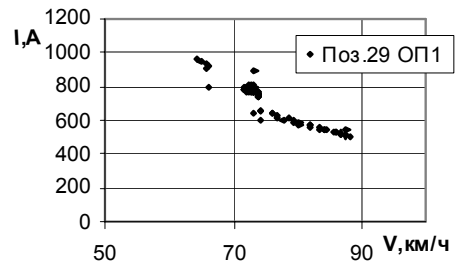
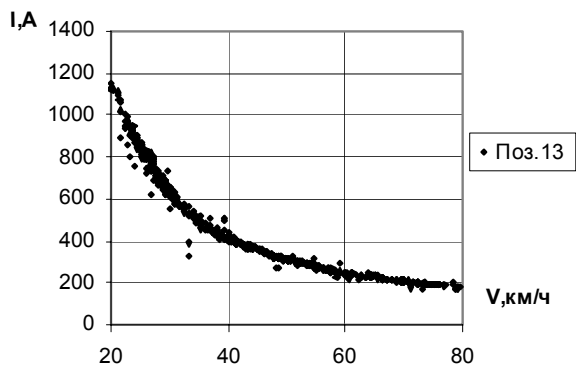
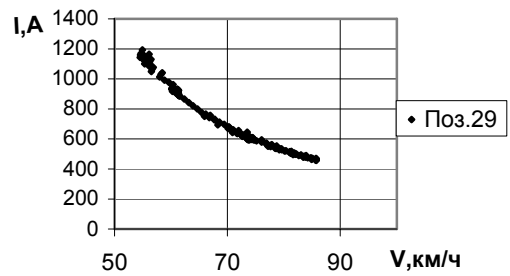
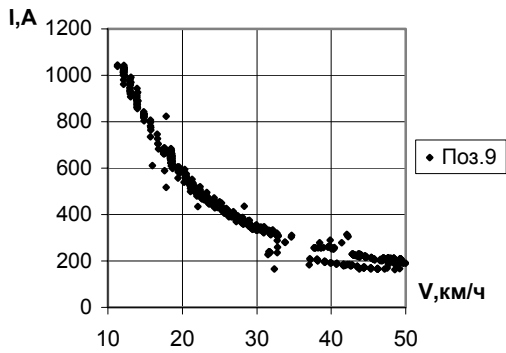


Рис. 13 Контролер у позиції 9, 13

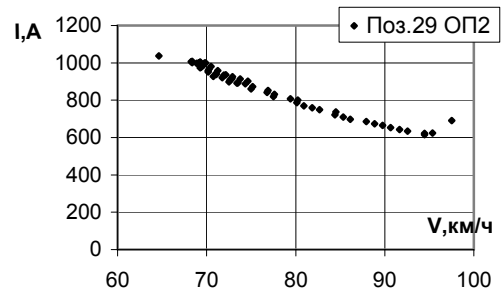


Рис. 15. Контролер у позиції 29, 29 ОП1, 29 ОП2

Вище було наведено пускові характеристики електровозу ВЛ40^у у відповідності з технічною документацією ЗТС.001.011.РЭ1 (рис.11) для коефіцієнту зубчатої передачі

$$\mu = \frac{81}{28} = 2.89, \text{ діаметру бандажу } D_k = 1210 \text{ мм.}$$

при $U_{км} = 25$ кВ (розрахункові характеристики). Порівняння результатів вимірювання після їх нормалізації з рис. 11 показує, що розрахункові характеристики та нормалізовані пускові характеристики, що отримано в процесі дослідження, відрізняються не більш 5 % по усіх перевірених позиціях (від поз. 1 до поз. 19).

Визначення параметрів тягової характеристики здійснювалось на підставі даних дослідних поїздок. Значення дотичної сили тяги встановлювалось на основі вимірювань величин струму ТЕД на різних позиціях електромеханічних характеристик ТЕД НБ418К6 (Н.169.211)

$$\text{при } \mu = \frac{81}{28} = 2.89 \text{ та } D_k = 1210 \text{ мм. В процесі}$$

дослідів встановлено значення дотичної сили тяги, які отримано на основі вимірювань $F_{д.вим}$ та розрахункові нормовані значення дотичної сили тяги $F_{др}$, які відповідають тяговій характеристиці електровозу ВЛ40^у (ЗТС.001.011.РЭ1), яку наведено на рис. 10.

З порівняння тягових характеристик виходить, що значення $F_{д.вим}$ та $F_{др}$ відрізняються не більше 10 %. В процесі руху спостерігалися випадки буксування при струмах першого ТЕД від 950 А до 1090 А.

З метою оцінки навантаження на тягові двигуни електровозу при виконанні поїздок з графіковими поїздами за пропозицією Одеської залізниці було обрано найбільш напружений напрямок Одеса – Котовськ – Жмеринка зі складним планом та профілем шляху. Електровоз ВЛ40^у-1851-1 було встановлено в поїзд № 94 Одеса – Мінськ, який складався з 12 пасажирських вагонів та двох вагонів-лабораторій.

В процесі руху поїзда на апаратурі ДВЛ реєструвались величини швидкості та ефективні значення струмів тягових двигунів першої та четвертої колісних пар. Оцінка нагрівання тягових двигунів здійснювалась методом еквівалентного струму з умови $I_{екв} \leq I_{ном}$,

де $I_{екв}$ – еквівалентний струм ТЕД за годину або за поїздку, А;

$I_{ном}$ – номінальний струм ТЕД годинного (тривалого) режиму, А.

$$I_{екв} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 \cdot t_i}{T}} \quad (4)$$

Інтервал часу реєстрації $t_i = 1$ с, T – період часу, за який здійснюється оцінка еквівалентного струму, с.

Враховуючи, що $T = N \cdot t_i$, де N – кількість реєстрацій за час T , то

$$I_{екв} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2}{N}} \quad (5)$$

Обчислення значень $I_{екв}$ здійснювалось для інтервалів часу $T = 1$ хв ($I_{хв}$) та за всю поїздку ($I_{эф}$).

У відповідності з технічною документацією [1, 2], електровоз ВЛ40^у-1851-1, обладнаний тяговими двигунами НБ-418-К6, зав. № 3301, 3073, 2368, 7630, піддавався комплексу випробувань, подібним приймально-здавальним випробуванням та випробуванням на нагрівання струмом годинного режиму, що дорівнює $I_{год} = 880$ А (струм тривалого режиму $I_{тр} = 820$ А).

В табл. 4 наведено результати обчислень максимальних значень еквівалентного струму ТЕД у процесі поїздки в напрямку Одеса – Жмеринка по дільницях наведених станцій, починаючи від ст. Одеса.

Таблиця 4

Значення еквівалентних струмів на протязі слідування

Поїздка Одеса – Жмеринка						
Станція	Час	Хв	І _{эф1}	І _{эф4}	І _{хв1}	І _{хв4}
Одеса Гол.	14:36	0	0	0	0	0
Одеса Заст.	14:51	15	445	420	373	368
Усагово	14:57	21	441	423	315	318
Дачна	15:01	25	428	413	284	278
Єреміївка	15:21	45	407	393	507	491
Роздільна 1	15:36	60	361	349	503	496
Роздільна Сорт.	15:46	70	381	367	430	421
В. Кут	16:00	84	372	358	802	760
Мардарівка	16:38	122	360	348	0	0
Котовськ	17:03	147	332	318	0	0
Слобідка	17:46	190	324	311	487	458
Вапнярка	19:12	276	318	305	533	485
Жмеринка	20:16	340	310	298	0	0

Як виходить з табл. 4, еквівалентні струми за 1 год не перевищували значень $I_{год} = 880$ А, а за час усієї поїздки – значення $I_{тр} = 820$ А.

Оцінка нагрівання тягового трансформатора ОДЦЭ-5000 (25-БМ-02 (зав. № 2259)) здійснювалась шляхом реєстрації показань термометру ТКП-160С, який входить у комплект трансформатора (1ВП.712.259РЭ). В процесі поїздки з графіковим поїздом № 94 (14 вагонів) на напрямку Одеса – Котовськ реєстрація проводилась на станціях. При температурі навколиш-

нього повітря на ст. Одеса +280 °С та на ст. Жмеринка +23 °С, було зареєстровано наступні показання термометру:

ст. Одеса–Застава1 +550 °С, ст. Раздельная1 +50 °С, ст. Котовськ +47,5 °С, ст. Жмеринка +40,5 °С.

У відповідності до технічної документації [1, 2] максимальна температура нагрівання трансформаторного масла не повинна перевищувати +85 °С.

Основні висновки

В процесі проведення динамічних ходових випробувань отримані значення коефіцієнтів вертикальної динаміки як у першому, так і у другому ступенях підвищення, що були визначені з імовірністю 0,95, значно менші за допустимі Нормативні значення. Найбільші значення цих величин не перевищували значень 0,13 як у першому так і у другому ступенях підвищення. Нормами передбачено, що найбільші значення цих величин складають 0,3 для першого ступеня та 0,2 для другого ступеня, якщо відповідний локомотив призначено для пасажирського руху. Коефіцієнти запасу стійкості проти сходу коліс колісних пар з рейок не менше значень 4,5, в той час за Нормами встановлено, що найменша величина цього показника дорівнює 1,4. Найбільші значення показників плавності руху дорівнюють 3,41, а за відповідними Нормативними показниками найбільше значення вказаних величин може досягати 3,7. Найбільше значення горизонтальних поперечних рамних сил було зафіксовано на рівні 75 кН при проїзді по стрілочних переводах, де спостерігалися бічні кидки за рахунок неякісного утримання стрілочних переводів. Але ж і це значення знаходиться в межах припустимих величин. При рухові у складі пасажирського поїзда горизонтальні поперечні рамні сили не перевищували 40 кН. З точки зору віброприскорень дослідний локомотив також відповідає Нормативним вимогам.

1. На підставі результатів, отриманих у дослідній поїздки дослідного зчепу на прямолінійній дільниці безстикової колії зі швидкістю 120 км/год, а також візуального контролю за коливаннями електровозу ВЛ40^У з вагона-лабораторії ДНУЗТу доцільно розглянути пропозицію щодо виявлення можливості підвищення конструкційної швидкості електровоза до 140 км/год включно.

2. Пускові (струмові) характеристики електровозу ВЛ40^У-1851-1 відповідають розрахунковим, які приведено у керівництві з експлуатації (ЗТС.001.011РЭ1).

3. Значення струму тягових двигунів при русі зі складом із 14 вагонів на протязі години не

перевищує струму годинного режиму. Температура масла тягового трансформатора не перевищувала +550 °С при температурі навколишнього повітря +280 °С. Таким чином, теплові режими основного обладнання в поїздах з графіковими поїздами у напрямку ст. Одеса – Жмеринка не накладають обмежень на графік руху.

4. В процесі розгону та під час руху відзначається значне (до 150 А) перевищення струму ТЕД першою колісною парою над струмом ТЕД четвертої (першої по ходу) колісної пари.

5. Доцільно в обох кабінах встановити амперметри ТЕД першої та четвертої колісних пар.

6. З метою зниження кількості відмов ТЕД доцільно ввести заборону набору позицій при включеному послабленні поля та при напрузі на колекторах ТЕД вище 950 В.

7. На підставі обмеження за зчепленням та обмеження за граничною величиною струму при реалізації тяги у 1200 А встановити розрахункові значення сили тяги у 230 кН, та швидкості руху 60 км/год.

Результати, які отримані під час проведення випробувань, дозволяють внести пропозицію про введення в експлуатацію електровозів серії ВЛ40^У виробництва ВАТ «Запорізький електровагонобудівний завод» з встановленими швидкостями руху до 120 км/год включно.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Техническое задание на разработку рабочей конструкторской документации электровоза ВЛ40 (модернизация секции электровоза типа ВЛ80^Т), утв. директором ПКТБ - главным конструктором ТГТС Укрзалізнички 06.06.2003.
2. Модернизация секции грузового электровоза ВЛ80^Т для вождения пассажирских поездов на железных дорогах Украины. Паспорт ЭЗ.340.00.00.000ПС.
3. Электровоз ВЛ40. Программа-методика приемо-сдаточных испытаний. ЗТС.001.011ПМ. Утверждено директором ПКТБРЛ – Главным конструктором ТПС железных дорог Украины, 2004.
4. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М: МПС РФ, ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
5. СТ ССФЖТ ЦТ 15-98 Тяговый подвижной состав. Типовая методика динамико-прочностных испытаний локомотивов.
6. Санитарные нормы. Вибрации в кабине машиниста тягового подвижного состава железнодорожного транспорта.

Надійшла до редколегії 27.03.2008.

ЩЕ ОДИН ПОГЛЯД НА ІСТОРІЮ КОЛЕСА І ТЕХНІЧНИЙ АСПЕКТ

Прослідковано історію колеса в початковий період його розвитку з точки зору фізичних можливостей приручених людиною тварин. Також доведено, що, виходячи із останніх досліджень віку колеса, історія людства повинна бути переглянута.

Прослежена история колеса в начальный период его развития с точки зрения физических возможностей прирученных человеком животных. Также доказано, что исходя из последних достижений века колеса, история человечества должна быть пересмотрена.

The history of wheel in an initial period of its development from a viewpoint of physical possibilities of the animals domesticated by a man is traced. It is proved that coming from the last achievements of wheel age the history of humanity must be revised.

Звичайно, що історію колеса розглядати тільки з технічного боку було б не зовсім точним без зв'язку з розвитком суспільства. Тому коротко зупинимось на тих суспільно-економічних явищах, які сприяли його появі.

На перших ступенях життя суспільства виробництво товару не було, а товар виник з появою суспільного розподілу праці. Сама проста форма розподілу праці зародилась в середині первісних родових общин внаслідок статевих та вікових відмінностей, тобто на чисто фізіологічному підґрунті [1].

Першим значним суспільним розподілом праці було відокремлення тваринництва від землеробства, а другим – ремесла від землеробства, а сам процес розподілу праці робить вплив на розвиток продуктивних сил, підвищення продуктивності праці, виробничі відношення.

Можна вважати, що вже при рабовласницькому устрої розподіл праці досяг розквіту, а це, як відомо, відбулося на межі 4-го і 3-го тисячоліть до н. е. в Месопотамії та Єгипті [2].

Якраз рабовласницький устрій виник в результаті розпаду первісно-суспільного устрою. При його розквіті, що викликало посилений обмін особистої власності на результати праці, а потім рабами і частково землею.

Звичайно, що з появою товару значно сама здорова частина суспільства перетворювалась в носіїв цього товару [3]. Очевидно, що для цієї цілі треба було приручати і привчати тварин. По-перше, на неї можна було і навантажити більше, чим на раба, та і одна людина могла правити декількома тваринами. Задача обміну дещо спрощувалась, але утримання достатньої кількості в'ючних тварин коштувало дорого. Можна було їх використовувати і як джерело м'яса або молока, але вступало в силу проти-

річчя: більше молока (м'яса) – менша вага вантажу на спині, або навпаки.

Саме на цьому етапі, тобто 4...3 тис. до н.е., розвитку людства і повинна була виникнути ідея колеса: можливість перевезення однією твариною вантажу, який значно перевищував його вагу при використанні її як в'ючної. Нагадаємо, що саме 4...3 тисячі років до н. е. були побудовані і перші піраміди – самі великі споруди того часу; так-що і це могло бути стимулом появи колеса.

І з цим можна було б погодитись повністю, якщо б не знахідка колеса на півдні Донеччини, вік його біля 7 тис. років.

Виходить, що на цілі три тисячі років треба зсунути вглиб появу рабовласницького устрою. Кочівник не міг його придумати, оскільки перехід від осілого тваринництва до кочового відбувся всього-навсього в першому тисячолітті нової ери.

Оставимо це непорозуміння історикам, а самі спробуємо прослідкувати можливий розвиток конструкції колеса, із яких міркувань виходили наші предки, установлюючи ті чи інші розміри колеса, їх кількість.

Звичайно, що першим питанням було: якого діаметру повинне воно бути. Якщо це була рівнина (і більше всього, що це було так), то діаметр колеса, на перший погляд, велику роль і не грав. У залежності від радіуса коліс R і висоти тварини H , яка застосовувалась як тяглова, сила тяги F могла бути прикладена горизонтально, або під кутами α^+ чи α^- (рис. 1,а). Але, а це очевидно, що буде змінюватися тиск на колесо: при α^+ він зменшується, збільшуючи тиск на тварину, а при α^- – збільшується, зменшуючи на неї тиск. Де ж тут золота середина? На рис. 1,б і 1,в показані опори руху колеса у залежності від α . А тиск на «плечі» тварини у за-

лежності від кута прикладання сили (у відносних величинах) показано на рис. 2, а на рис. 3 – у залежності від відстані між центром колеса і хомутом.

Із рис. 1,б і рис. 1,в видно, що найменший опір коченню дає сума значень кривих 3 та 3' на

рис. 1,б. Тобто, спостереження за поведінкою тварин, які тягли віз (а може і власні) підказувало, що найменше втомлення викликали колеса більшого діаметра і при плюсовому (+) (величина якого залежала із співвідношення висоти тварини і діаметра колеса).

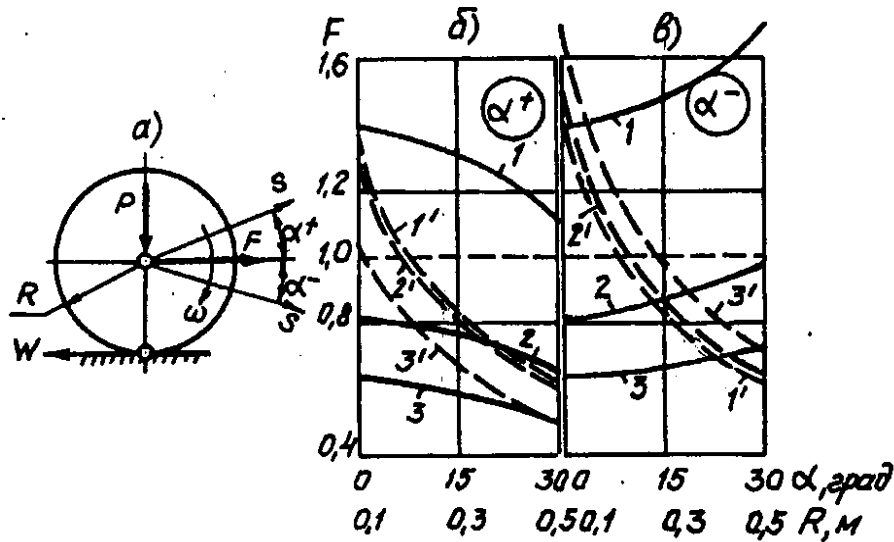


Рис. 1. а) схема прикладання тягового зусилля до колеса; б) залежність опору кочення у напрямку сили тяги: 1, 2, 3 – від кута α^+ при радіусі колеса 0,1; 0,3 і 0,5 м; 1', 2', 3' – від радіуса колеса при $\alpha^+ = 0; 15$ і 30 град.; в) те ж при α^-

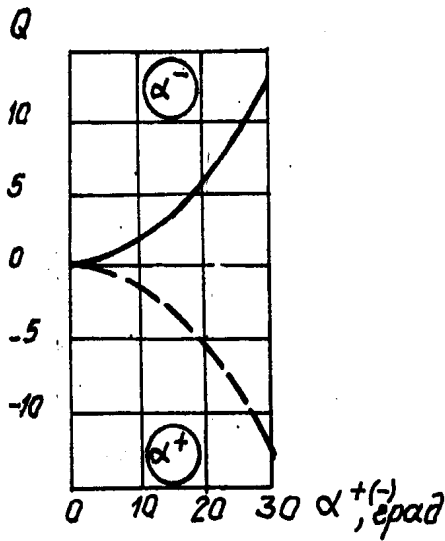


Рис. 2. Залежність навантаження на тварину від кута прикладання сили до візка

Таким чином, установили, чому людство на протязі декількох тисячоліть прийшло до колеса, наприклад, при кінський тязі це діаметри приблизно 1,0...1,5 метра, а не, допустимо, 0,1 або 0,15 метра.

Тепер, очевидно, треба було установити ширину обода колеса. Звичайно, що тут простір був не меншим, ніж при виборі діаметра. Що на

пухкому ґрунті нога вгрузає більше, ніж на твердому, людина, без сумніву, уже знала і не могла не перенести це на ширину обода колеса. Але навряд давнішній фурман збирався їздити по болоті або піску. По-перше, утомлювалась сама тварина, а з досвіду ходіння по ним було очевидним, що і котитись колесу буде важко.

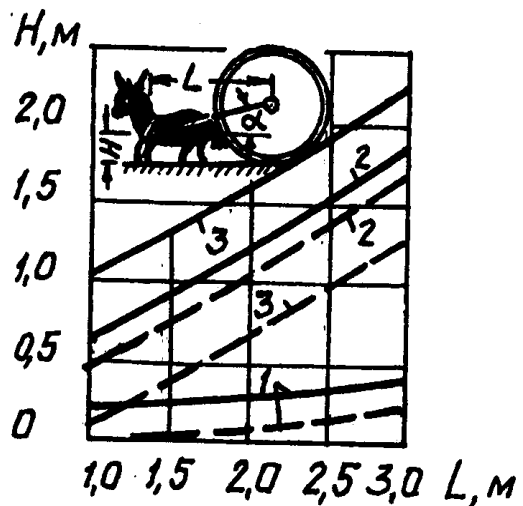


Рис. 3. Залежність висоти тварини H від відстані між вісю колеса і хомутом 1: 1, 2, 3 – відповідно $R = 0,2; 0,3; 0,5$ м (пунктиром $R = 0$)

Більш усього, що наш предок взяти товар для обміну або продавати збирався сухою дорогою: і товар і дорога сухі, та і настрої в хорошу погоду кращий [4]. Тоді ж із яких міркувань встановлювалась ширина обода колеса? На рис. 4 у відносних одиницях показано опір коченню колеса у залежності від ширини обода [5].

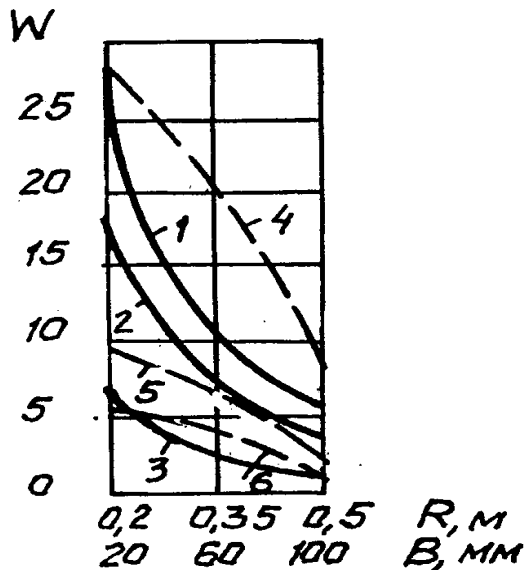


Рис. 4. Залежність у відносних величинах опору руху колеса від: 1, 2, 3 – ширини обода відповідно при радіусах коліс 0,2; 0,35; 0,5 м; 4, 5, 6 – радіуса при ширині обода 20, 60, 100 мм

Що кидається в очі без особливого аналізу, так це різке зниження опору руху зі збільшенням ширини обода (криві 1, 2, 3), але, якщо наприклад, для встановленої вище величини радіуса $R = 0,5$ м, зі збільшенням ширини з 20 до 60 мм опір коченню падає майже у 3 рази, то з його збільшенням з 60 до 120 мм, на таку ж величину, він зменшується лише в 1,6 рази.

Очевидно, що немає сенсу ширину обода робити було значно більшим 60 мм, оскільки це не призводило до різкого зниження опору руху тим більше, що збільшення ширини вимагало ускладнення колеса, його вартості та і до збільшення ширини доріг, ускладненню зберігання візків.

Наприкінці розглянемо, як вирішувалось питання про кількість коліс. Що їх кількість повинна бути парною питання не виникало: з одним колесом візок перевертався, а «п'яте колесо до возу» спробуємо поставити після розгляду парної кількості.

Опір руху візка у відносних одиницях у залежності від кількості коліс n при одному і тому ж навантаженні показано на рис. 5.

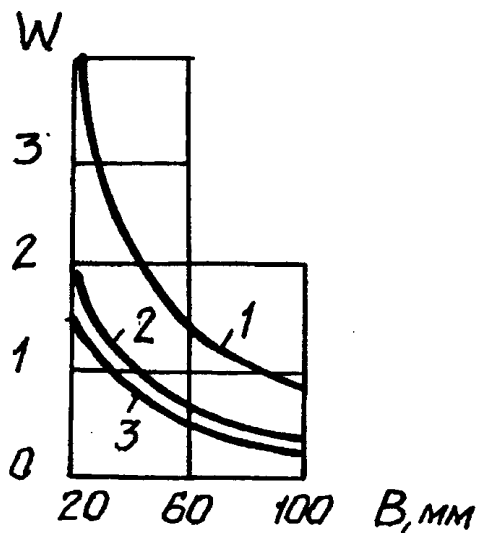


Рис. 5. Відносна залежність опору руху візка від кількості коліс: 1 – $n = 2$; 2 – $n = 4$; 3 – $n = 5$

Видно, що при $n = 4$ опір руху значно менший, ніж при $n = 2$, а при $n = 5$, крім мороки з його приладнанням, практично ніякого зниження не давало.

На нашу думку, були пропозиції і про шість і більше коліс, але у цьому випадку значно збільшувались габарити візка по довжині, та і маневреність різко падала.

Таким чином, ми прослідкували найбільш можливий шлях розвитку колеса і по можливості його роль у товарній метаморфозі «товар – гроші – товар».

До найбільш важливих задач в області удосконалення коліс треба вважати установлення аналітичної залежності для визначення коефіцієнта тертя кочення. Який зразу визначається експериментально. Це б дозволило інженеру при розрахунку вузлів кочення варіювати як геометричними розмірами, так і матеріалами, добиваючись оптимального його рішення як з точки зору вартості, так і витрат енергоносіїв [5].

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Малая Советская энциклопедия: В 10 т. Т. 6. – М.: Изд-во БСЭ, 1959. – 1306 с.
2. Малая Советская энциклопедия: В 10 т. Т. 7. – М.: Изд-во БСЭ, 1959. – 1259 с.
3. Малая Советская энциклопедия: В 10 т. Т. 9. – М.: Изд-во БСЭ, 1959. – 1210 с.
4. Малая Советская энциклопедия: В 10 т. Т. 3. – М.: Изд-во БСЭ, 1959. – 1274 с.
5. Бондаренко Л. М. Деформационні опори в машинах / Л. М. Бондаренко, М. П. Довбня, В. С. Ловейкін. – Д.: РВА «Дніпро-VAL», 2002. – 200 с.

Надійшла до редколегії 06.03.2008.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ДВУТАВРА ХРЕБТОВОЇ БАЛКИ ПІВВАГОНА МОДЕЛІ 12-532 НАПРИКІНЦІ НОРМАТИВНОГО ТЕРМІНУ СЛУЖБИ

Наведені результати дослідження корозійного пошкодження двотавра хребтової балки піввагона моделі 12-532 наприкінці нормативного терміну служби. По отриманих результатах були побудовані емпіричні криві імовірності роботи кожного елемента двотавра в його справному стані (до появи наскрізної корозії).

Приведены результаты исследования коррозионного повреждения двотавра хребтовой балки полувагона модели 12-532 в конце нормативного срока службы. По полученным данным были построены эмпирические кривые вероятности работы каждого элемента двотавра в его исправном состоянии (до появления сквозной коррозии).

Results of research of a corrosion damage of the H-beam center girder of a gondola car of model 12-532 at the end of normative service life are presented. On the basis of data obtained the empirical probability curves for operation of each part of the H-beam in its serviceable condition (before occurrence of penetration corrosion) have been built.

Корозія, як процес руйнування металів при їх фізико-хімічній взаємодії з навколишнім середовищем, для піввагонів характеризується наступними ознаками [1]:

– за механізмом протікання – електрохімічна, що розвивається при дії на метал електропровідного середовища – електроліту;

– за умовами протікання – атмосферна, однією з причин виникнення якої є зволоження металічних поверхонь конструкцій, що експлуатуються в атмосферних умовах; в залежності від додаткових зовнішніх обмежень і впливу може бути щільною, контактною, застійною, під напруженням;

– за характером руйнування – загальна і локальна.

Найбільш небезпечною для піввагонів є локальна наскрізна корозія, оскільки при порівняно невеликій втраті металу міцність і функціональні характеристики конструкції різко знижуються. Прикладом цього може бути найбільш поширена для піввагонів з люками в полу наскрізна корозія стінки двотавра хребтової балки, що зосереджена в місцях розташування кришок розвантажувальних люків. Причина її – просипання сипкого вантажу крізь зазори по периметру люка та накопичення його на верхній полиці зета хребтової балки з послідуочим намоканням.

В ході обстеження 875 вагонів моделі 12-532 з 21-24-річними термінами експлуатації (нормативний термін служби для піввагонів моделі, що розглядається, складає 22 роки) були виявлені найбільш характерні пошкодження хребтових балок.

Інформація, зібрана в процесі обстеження вагонів, підлягала первинній якісній і подальшій кількісній обробці, а також ранжируванню

– систематизації в порядку зростання терміну експлуатації.

Досвід і нагляд вагонів в експлуатації дозволяє стверджувати, що наскрізна корозія двотавра хребтової балки має явно виражену залежність від часу експлуатації. Приймаючи, що імовірність F появи пошкодження в достатньо малому інтервалі часу Δt пропорційна довжині цього інтервалу з коефіцієнтом пропорційності λ [2], отримуємо:

$$F(t) = \exp\left(-\int \lambda(\tau) d\tau\right), \quad (1)$$

де $\lambda(\tau)$ є в кожний момент сумою інтенсивностей відмов (появи наскрізної корозії) в i -й зоні з семи, на які в процесі обстеження була розбита хребтова балка.

Таким чином, первинна обробка статистичних даних припускає визначення:

– частоти q появи наскрізної корозії в кожному часовому інтервалі t ($t_1 = 21$ рік... $t_4 = 24$ роки):

$$q_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad (2)$$

де n_i – кількість відмічених пошкоджень в i -й зоні двотавра хребтової балки:

$i = 1(7)$ – зона між кінцевою і шворневою балками гальмівного (негальмівного) кінця вагона;

$i = 2(6)$ – зона між шворневою гальмівного (негальмівного) кінця вагона і першою (четвертою) проміжною балками;

$i = 3(5)$ – зона між першою і другою (третьою і четвертою) проміжними балками;

$i = 4$ – зона між другою і третьою проміжними балками вагона.

N_i – кількість оглянутих елементів.

– накопиченої інтервальної частоти r_{it} появи несправності

$$r_{it} = \sum_{t=t_1}^{t_4} q_{it} = \sum_{t=t_1}^{t_4} \frac{n_{it}}{N_{it}}, \quad (3)$$

– емпірична імовірність Q_{it} роботи елемента в справному стані (до появи наскрізної корозії):

$$Q_{it} = \exp(-r_{it}) = \exp\left(-\sum_{t=t_1}^{t_4} \frac{n_{it}}{N_{it}}\right). \quad (4)$$

По отриманих результатах були побудовані емпіричні криві імовірності роботи кожного елемента двотавра хребтової балки в справному стані в часовому зрізі (рис. 1) і по довжині хребтової балки (рис. 2).

Аналіз кривих показує, що наскрізну корозію найбільше зазнає середня частина хребтової балки. Оскільки зниження дії корозійної активності навколишнього середовища і вантажів, що перевозяться, не представляється можливим, то зниження корозійних збитків доцільно забезпечити шляхом реалізації заходів щодо захисту конструкції від залежування мокрого вантажу в місцях з'єднання двотавра і зета хребтової балки.

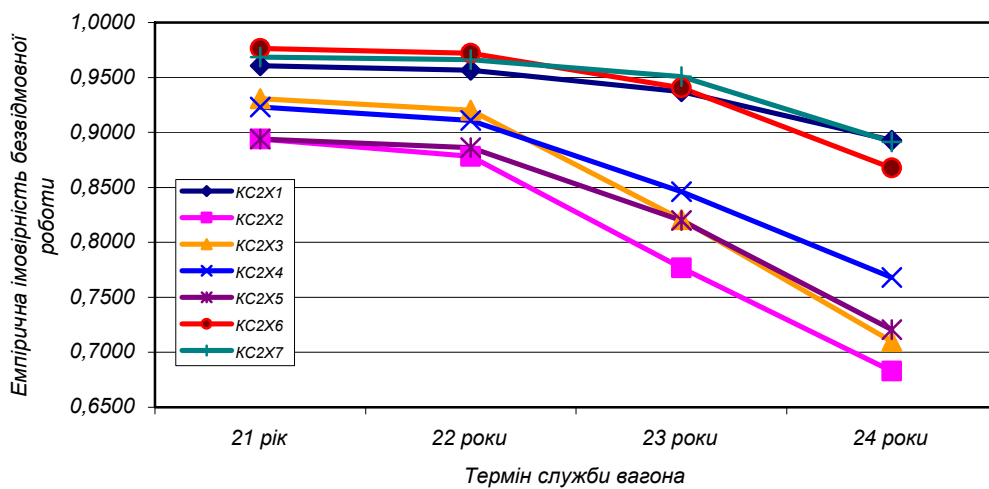


Рис. 1. Емпіричні криві імовірності роботи елементів двотавра хребтової балки

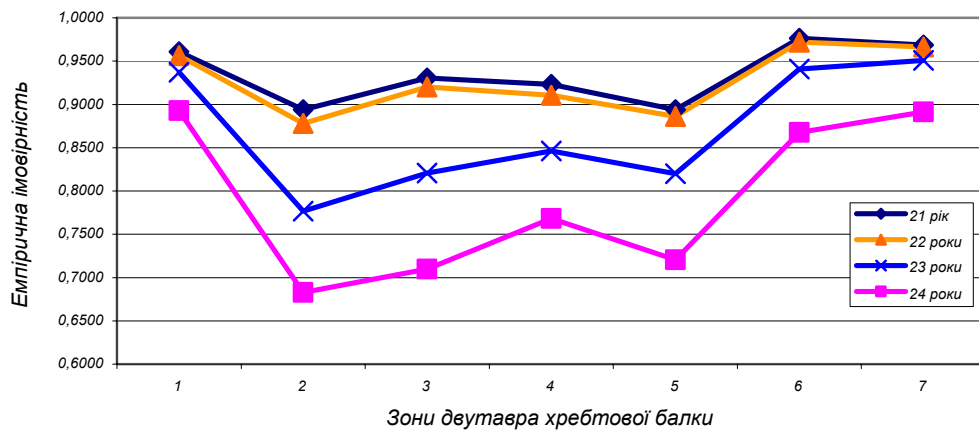


Рис. 2. Змінювання імовірності роботи двотавра по довжині хребтової балки

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Рачев Х. Справочник по коррозии / Х. Рачев, С. Стефанова. – М.: Мир, 1982.
2. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высш. школа, 1982.

Надійшла до редколегії 26.03.2008.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ДИСКОВОГО ТОРМОЗА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ПРИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ТОРМОЖЕНИЯХ

Наведено результати досліджень температури нагрівання гальмового диска під накладкою при регулювальних гальмуваннях пасажирського поїзда. Установлено, що найбільша температура в диску виникає на виході з накладки по напрямку обертання колісної пари, а її величина залежить від тиску в гальмовому циліндрі (коефіцієнт кореляції 0.556) і тривалості гальмування (коефіцієнт кореляції 0.331), коефіцієнт кореляції для швидкості на початку регулювального гальмування склав 0.135.

Приведены результаты исследований температуры нагрева тормозного диска под накладкой при регулировочных торможениях пассажирского поезда. Установлено, что наибольшая температура в диске возникает на выходе из накладки по направлению вращения колесной пары, а ее величина зависит от давления в тормозном цилиндре (коэффициент корреляции 0.556) и длительности торможения (коэффициент корреляции 0.331), коэффициент корреляции для скорости в начале регулировочного торможения составил 0.135.

Results of research of the brake disk heating temperature under the brake shoe lining during the regulating braking of a passenger train are presented. It is established that the greatest temperature in the disk arises at an exit of a brake shoe lining on a direction of the wheel pair rotation, and its value depends on pressure in the brake cylinder (correlation factor 0.556) and braking time (correlation factor 0.331), the correlation factor for speed in the beginning of regulating braking was equal to 0.135.

В настоящее время в Украине создан и прошел испытания пассажирский вагон с дисковыми тормозами для скорости 160 км/ч. Отсутствие нормативной базы, а также опыта эксплуатации пассажирских вагонов с дисковыми тормозами, потребовало проведения детальных исследований характеристик тормозной системы. Важнейшей составной частью дисковой тормозной системы является тормозной диск, подвергающийся при торможении значительным силовым воздействиям, к основным из которых следует отнести температурные. Поэтому вопросы, связанные с распределением температурных полей в тормозном диске при торможении, являются актуальными.

Тормозные испытания проведены применительно к пассажирскому вагону производства ОАО «КВСЗ», установленному на тележки моделей 68-7007 (с котловой стороны) и 68-7012 (с котловой стороны вагона). В тормозной системе вагона на каждой из осей тележки жестко закреплены по 2 чугунных тормозных диска W610 B110 PGUP (KNORR-BREMSE) диаметром 610 мм, толщиной 110 мм и радиусом трения 233 мм, выполненные из серого чугуна с пластинчатым графитом.

Целью исследований являлась оценка влияния графика движения скоростного пассажир-

ского поезда по маршруту «Днепропетровск – Киев – Днепропетровск» на нагруженность тормозной системы вагонов, а также регулировочных торможений на температуру нагрева тормозного диска. Пассажирский поезд состоял из 10 вагонов производства ОАО «КВСЗ», два из которых были оборудованы дисковыми тормозными системами.

В процессе движения регистрации подвергались:

- скорость в начале и конце регулировочного торможения;
- давление в тормозном цилиндре;
- время движения;
- длительность торможения от начала повышения давления в тормозном цилиндре до полного отпуска;
- температура в диске под накладкой (на входе и выходе из накладки).

Замеры указанных параметров проводились по специально разработанной методике, а обработка результатов – с применением методов математической статистики [1]. Температуры в диске при торможении определялись с помощью термоэлектрических преобразователей температуры (термопар) и записывались на компьютер с использованием аналогового преобразователя (АЦП).

В качестве статистического закона распределения определяемых параметров принимался нормальный закон распределения, а выравнивание экспериментальных данных проводилось методом наименьших квадратов.

Замеры скорости движения производились с интервалом 1 минута. Анализ скорости движения пассажирского поезда по маршруту «Днепропетровск – Киев – Днепропетровск» показал, что ос-

новной диапазон скорости движения соответствует интервалу скорости 80...120 км/ч, причем наибольшая частота соответствует скорости, приходящейся на интервал 90...100 км/ч (рис. 2).

Анализ статистического расчета (рис. 3) свидетельствует, что математическое ожидание скорости движения при доверительной вероятности 0.95 составляет 103.3...105.3 км/ч.

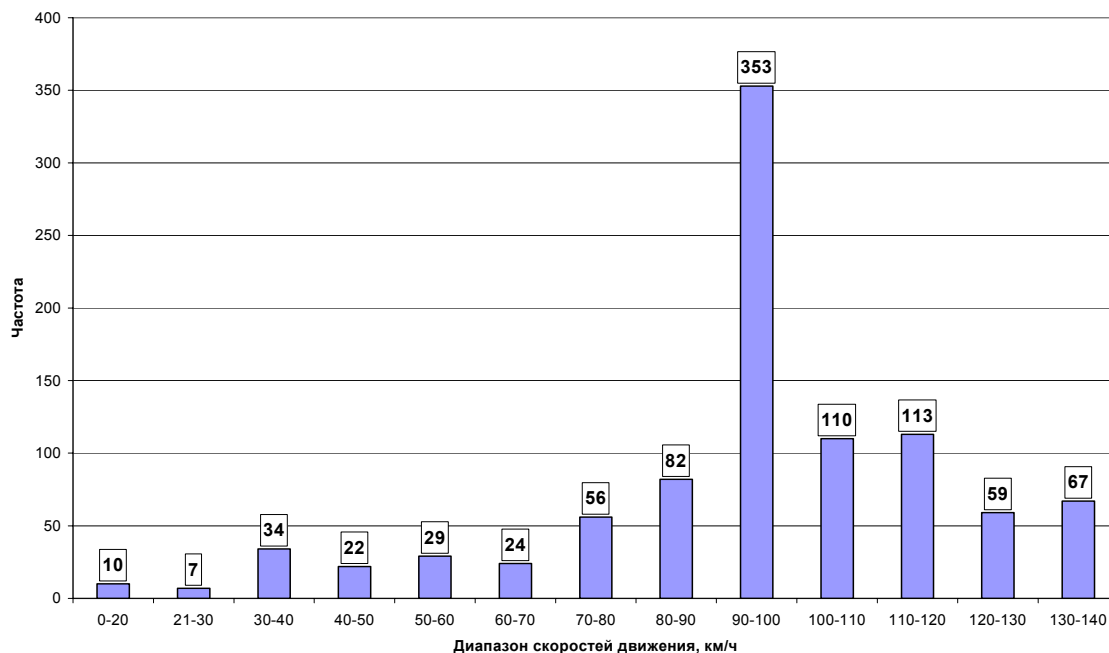


Рис. 1. Гистограмма распределения скорости движения пассажирского поезда по интервалу 10 км/ч

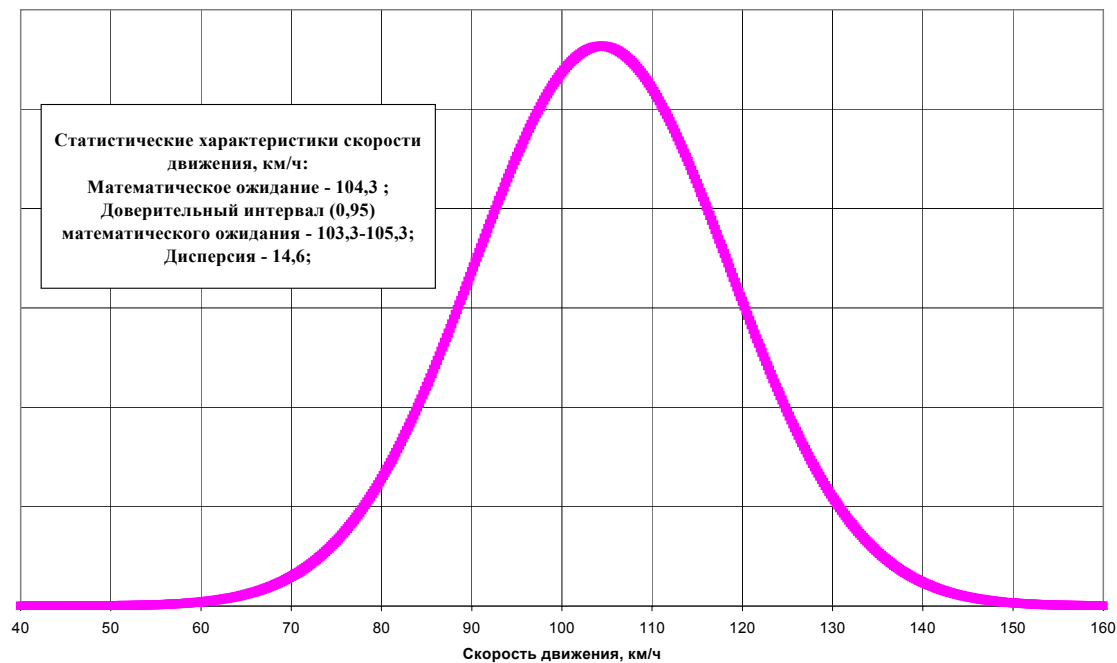


Рис. 2. Плотность вероятности распределения скорости движения пассажирского поезда по маршруту «Днепропетровск – Киев – Днепропетровск»

Тормозная нагруженность оценивалась по количеству торможений, величине давления в тормозном цилиндре и длительности торможения. Анализ показал, что наибольшее количество регулировочных торможений приходится на третью ступень торможения (рис. 3), причем наибольшее число торможений за одну поездку составило 43 торможения.

Статистические характеристики величины давления в тормозном цилиндре при регулировочных торможениях показаны на рис. 4, при этом математическое ожидание давления составило 2.36 кгс/см^2 , что соответствует третьей ступени торможения.

Математическое ожидание времени торможения составило 24.03 с (рис. 5).

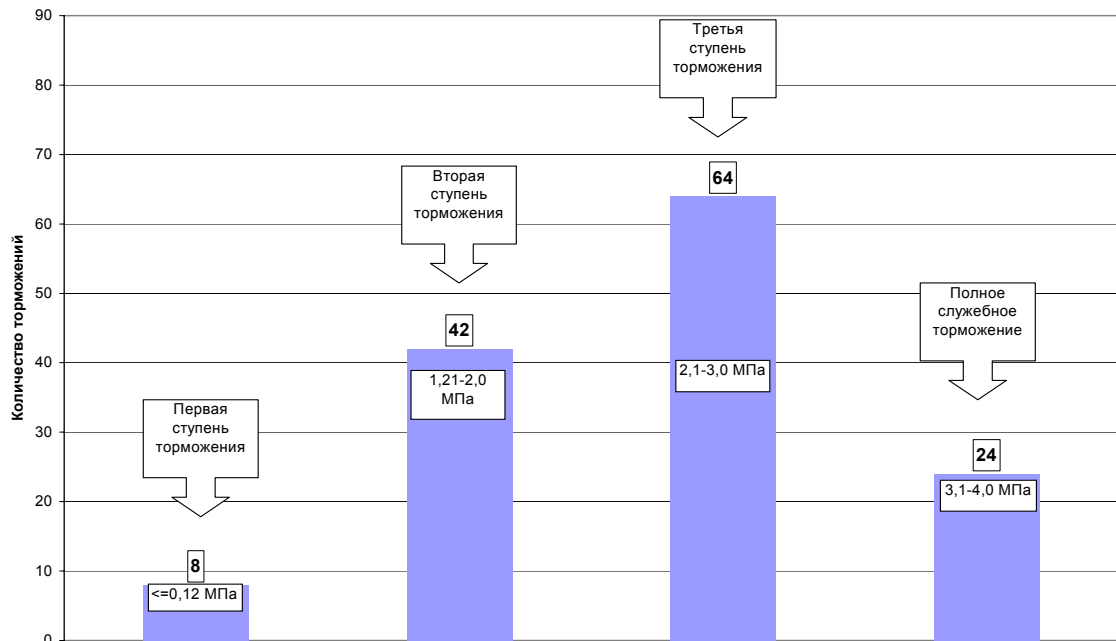


Рис. 3. Распределение количества торможений по ступеням регулировочных торможений

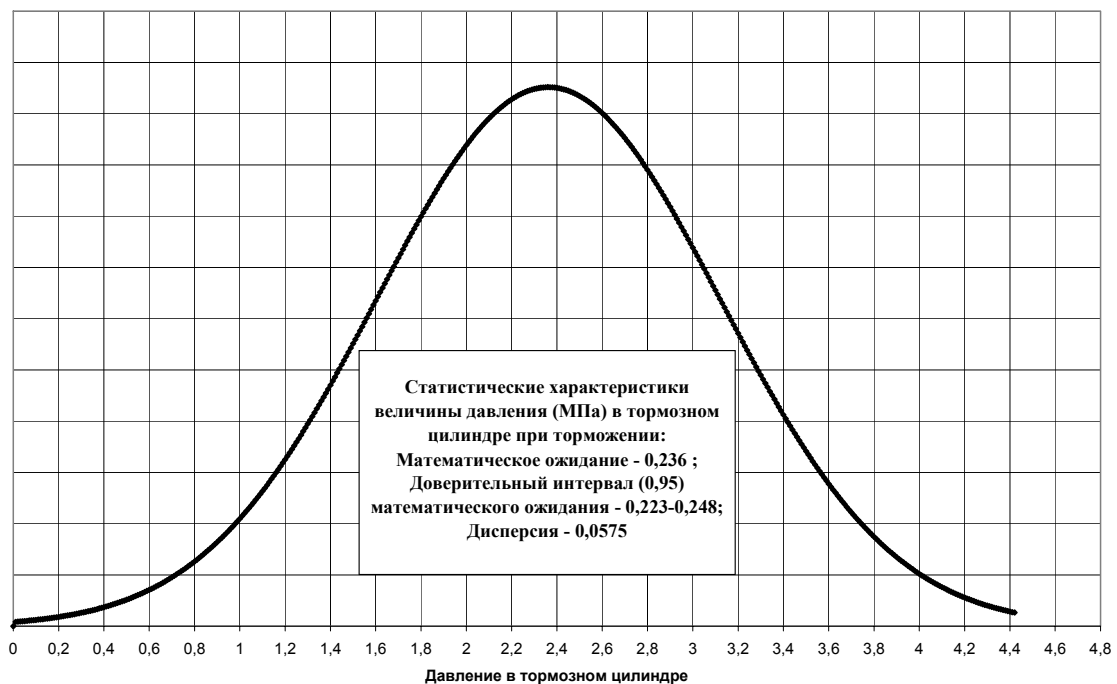


Рис. 4. Плотность вероятности величины давления в тормозном цилиндре при регулировочных торможениях

Максимальная интенсивность регулировочных торможений в основном приходится на начальный и конечный периоды движения, причем может достигать величины 0.7 торм./мин.

Полигоны распределения температур в диске на входе и выходе из накладки при регулировочных торможениях представлены на рис. 6 и 7.

Анализ результатов замеров температуры в

диске (рис. 8 и 9) показал, что математическое ожидание температуры диска на выходе из накладки составляет 103.1 °С, а дисперсия – 69 °С, на входе в накладку соответственно – 59.7 °С и 35.8 °С.

Величина температуры в диске в значительной степени зависит от давления в тормозном цилиндре и длительности торможения (рис. 10).

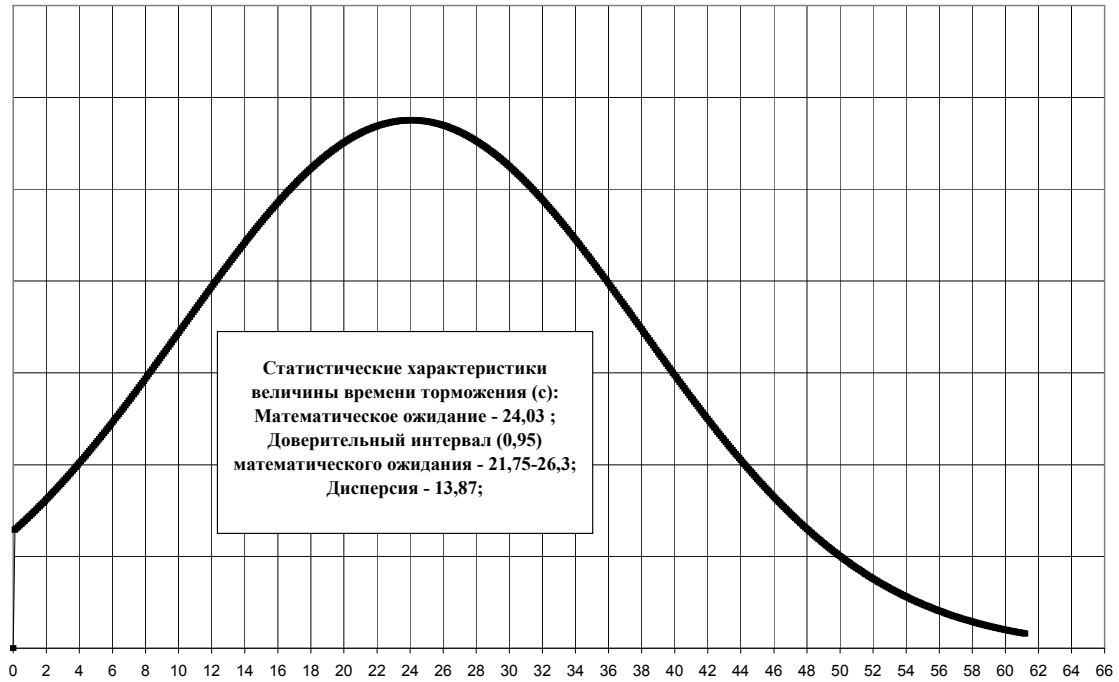


Рис. 5. Распределение плотности вероятности величины длительности регулировочного торможения

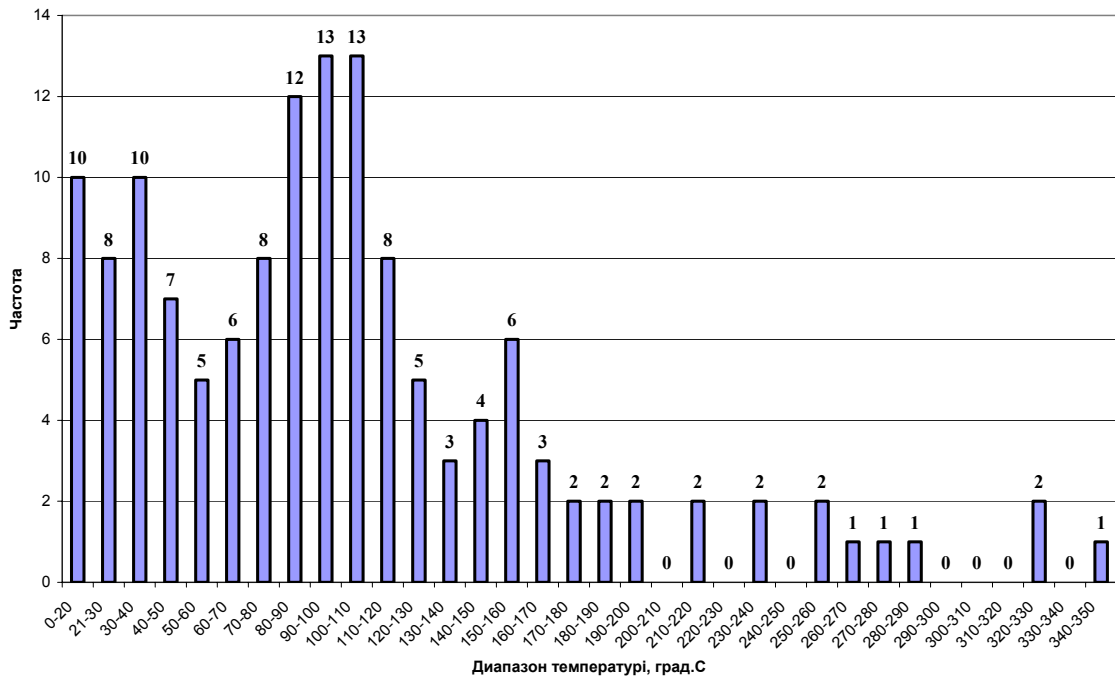


Рис. 6. Гистограмма распределения температуры диска на выходе из накладки

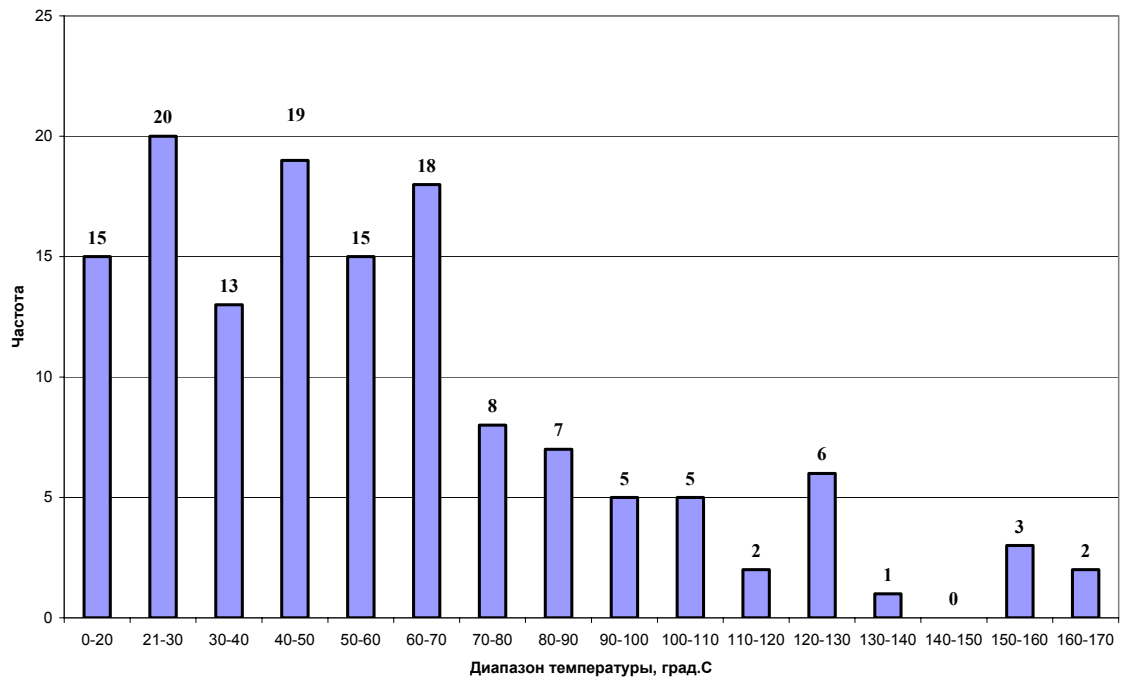


Рис. 7. Гистограмма распределения температуры диска на входе в накладку

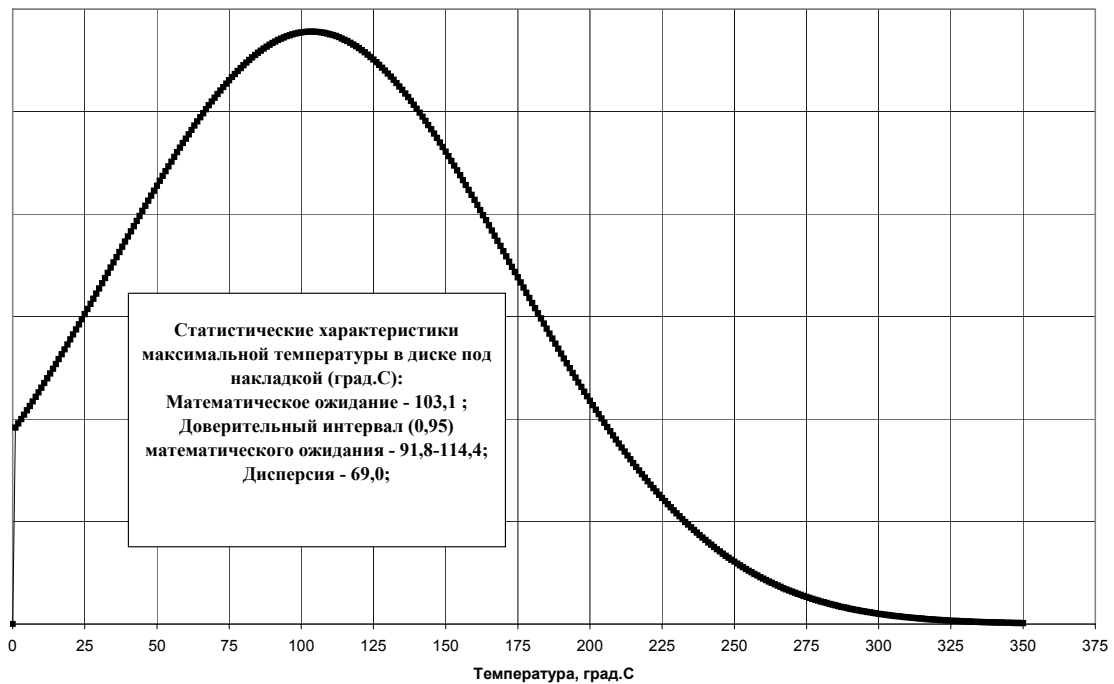


Рис. 8. Плотность вероятности распределения температуры диска на выходе из накладки

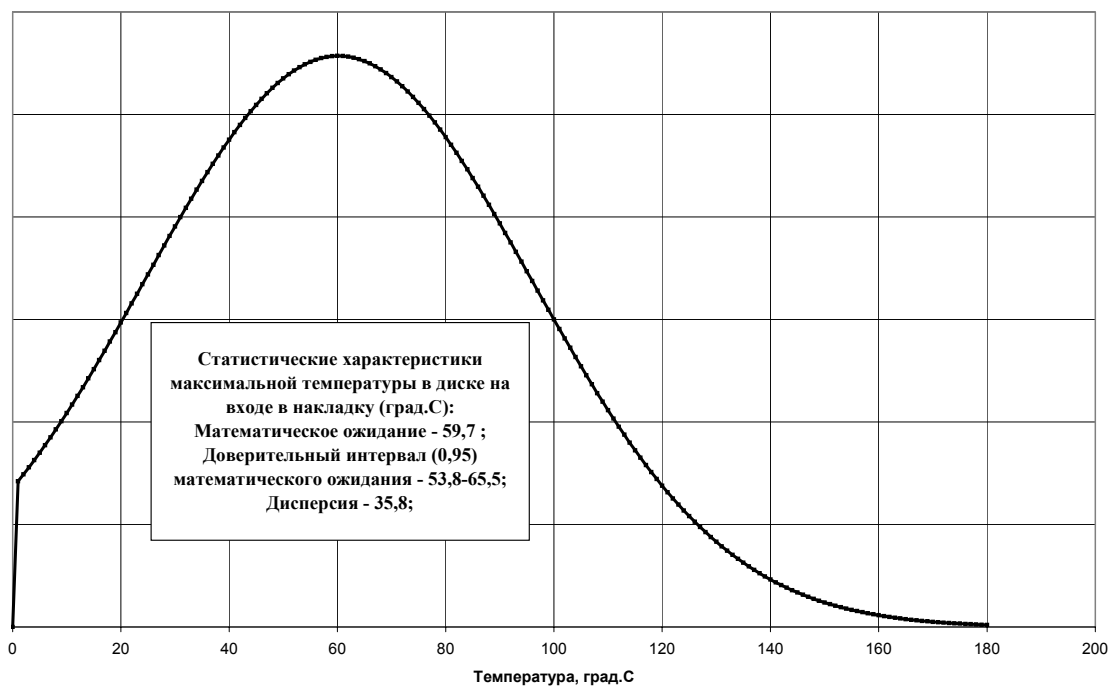


Рис. 9 Плотность вероятности распределения температуры диска на входе в накладку

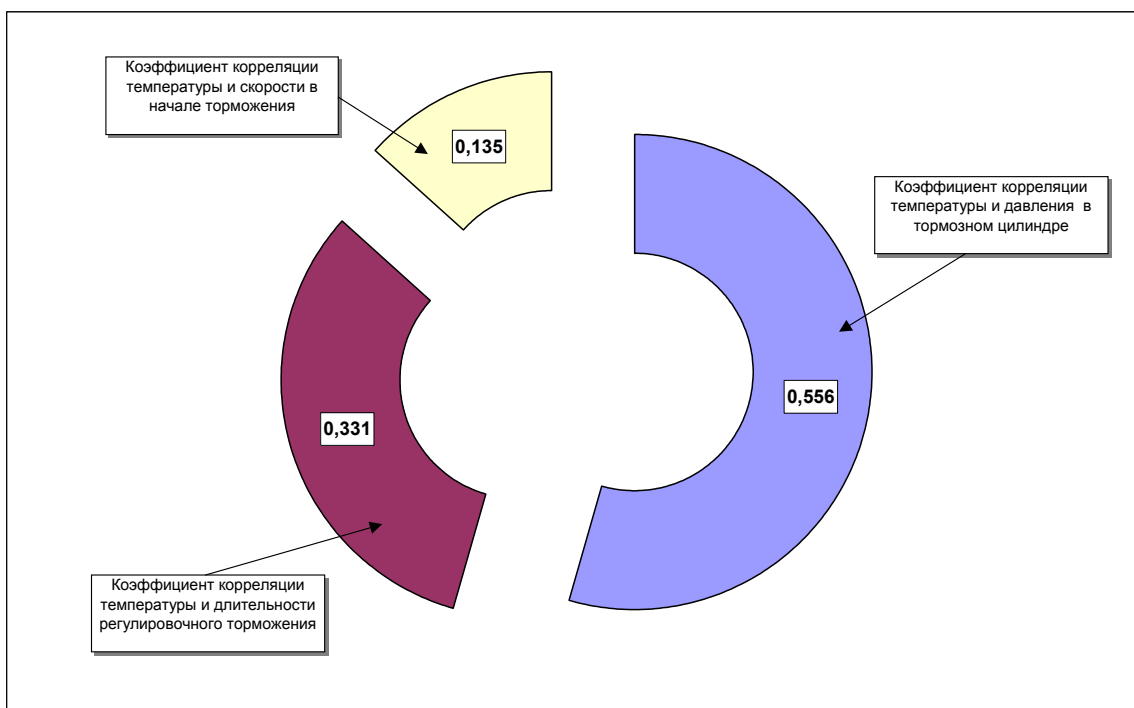


Рис. 10. Коэффициенты корреляции температуры и параметров регулировочных торможений (давления в тормозном цилиндре, длительности торможения и скорости в начале торможения)

Максимальная температура на выходе из накладки составила 343.9 °С при давлении в тормозном цилиндре 0.39 МПа и длительности торможения 49.78 с (рис. 11), в процессе тор-

можения скорость движения была снижена со 121 км/ч до 60 км/ч. Максимальная температура на входе в накладку не превысила 170 °С.

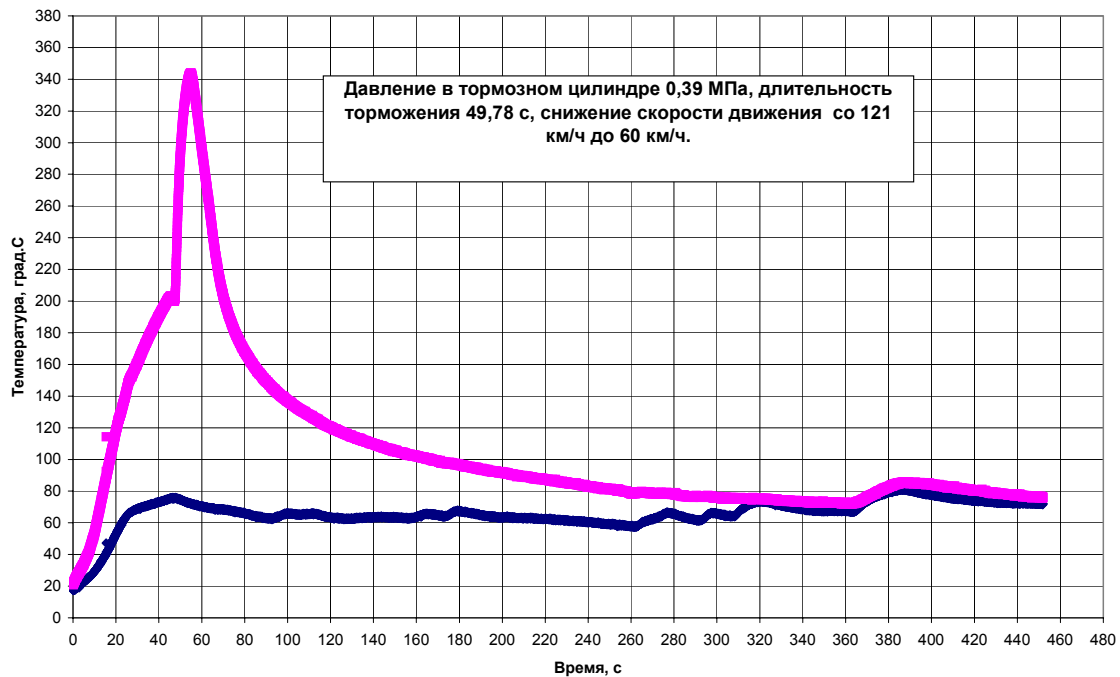


Рис. 11. Максимальная температура тормозного диска на выходе из накладки

Вероятность превышения температуры тормозного диска на выходе из накладки составила:

- > 225 °C – 0.039;
- > 250 °C – 0.017;
- > 275 °C – 0.0064;
- > 300 °C – 0.0022;
- > 325 °C – 0.000652;
- > 350 °C – 0.000174.

Особенностью распределения температуры в диске под накладкой является ее изменения от минимального на входе в накладку до максимального на выходе из накладки (рис. 12), причем температура тем больше, чем выше давление в тормозном цилиндре и длительность торможения. Анализ изменения температуры при последовательных регулировочных торможениях показал, что температура в диске увеличивается при последующих увеличениях глубины разрядки тормозной магистрали (повышении давления в тормозном цилиндре) (рис. 12 и 13).

В качестве иллюстрации на рис. 14...16 представлен энергетический спектр (°C) процесса изменения скорости при регулировочных торможениях при движении пассажирского поезда на маршруте «Киев – Днепропетровск».

Средняя скорость снижения температуры в диске, в предположении о линейном законе изменения температуры между регулировочными торможениями, составила 2.05 °C/мин.

На основании выполненных исследований установлено:

1) движение пассажирского поезда по маршруту «Днепропетровск – Киев – Днепропетровск» осуществляется в диапазоне скоростей 80-135 км/ч, причем математическое ожидание скорости, при доверительной вероятности 0.95, составляет (103.3...105.3) км/ч, а дисперсия – 14.6 км/ч;

2) количество регулировочных торможений имеет неоднозначный характер и может изменяться в широких пределах в одном направлении (от 19 до 43 торможений);

3) наиболее частым видом регулировочного торможения является торможение третьей ступенью (изменение давления в тормозном цилиндре от 0.21 МПа до 0.3 МПа), однако имеет место полное служебное торможения без остановки поезда (общее количество таких торможений составило 24);

4) математическое ожидание давления в тормозном цилиндре при регулировочных торможениях, при доверительной вероятности 0.95, составило (0.223...0.248) МПа, дисперсия – 0.0575 МПа, а длительность торможения соответственно (21.75...26.3) с и 13.87 с;

5) наибольшей интенсивностью регулировочных торможений характеризуются начальная и конечная периоды движения, причем наибольшая интенсивность зафиксирована на участке «Пятихатки – Днепропетровск» (0.7 торм./мин);

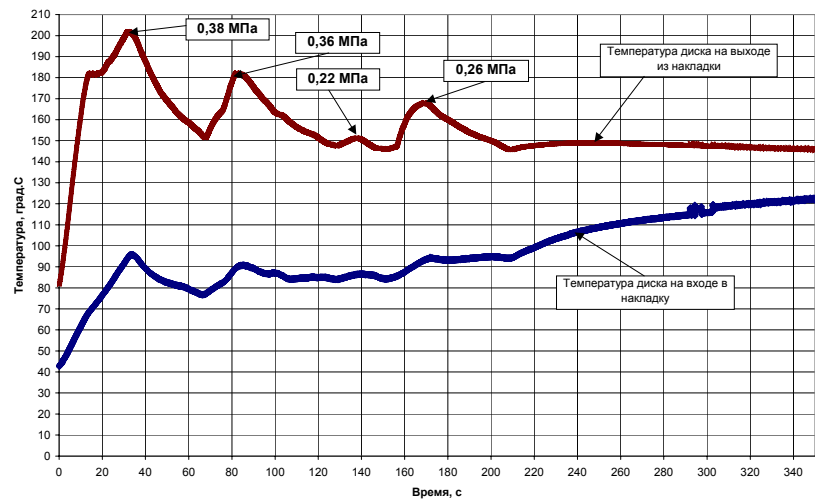


Рис. 12. Изменение температуры диска при последовательных регулировочных торможениях от высшей ступени к нижней

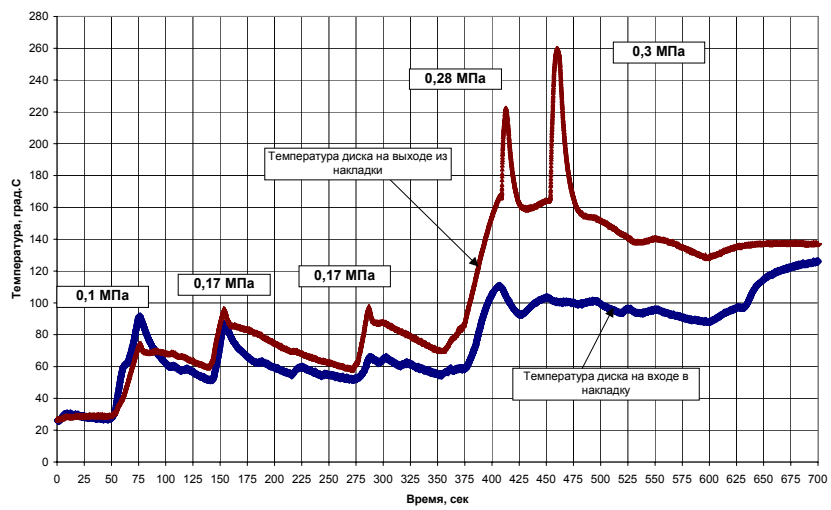


Рис. 13. Изменение температуры диска при последовательных регулировочных торможениях от низшей ступени к высшей

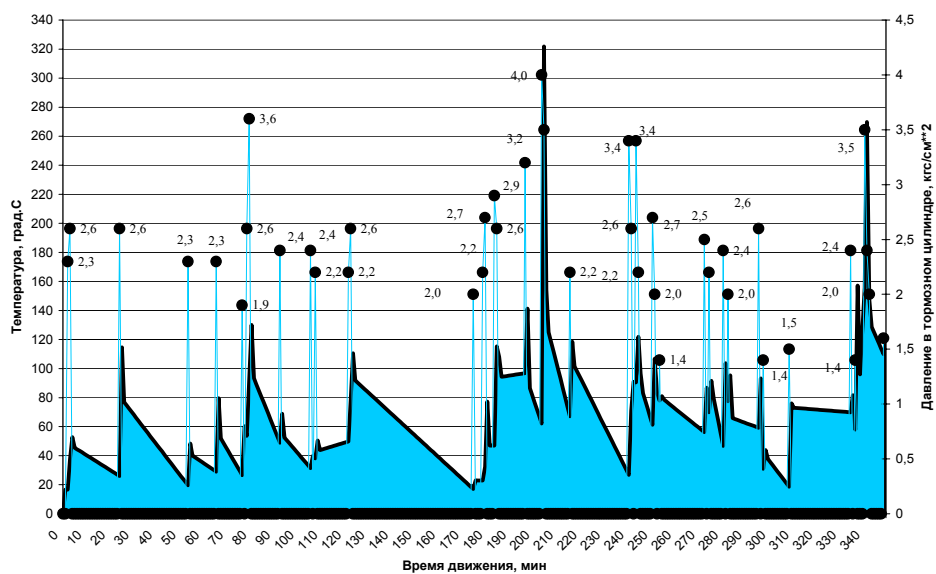


Рис. 14. Энергетический спектр регулировочных торможений при изменению давления в тормозном цилиндре

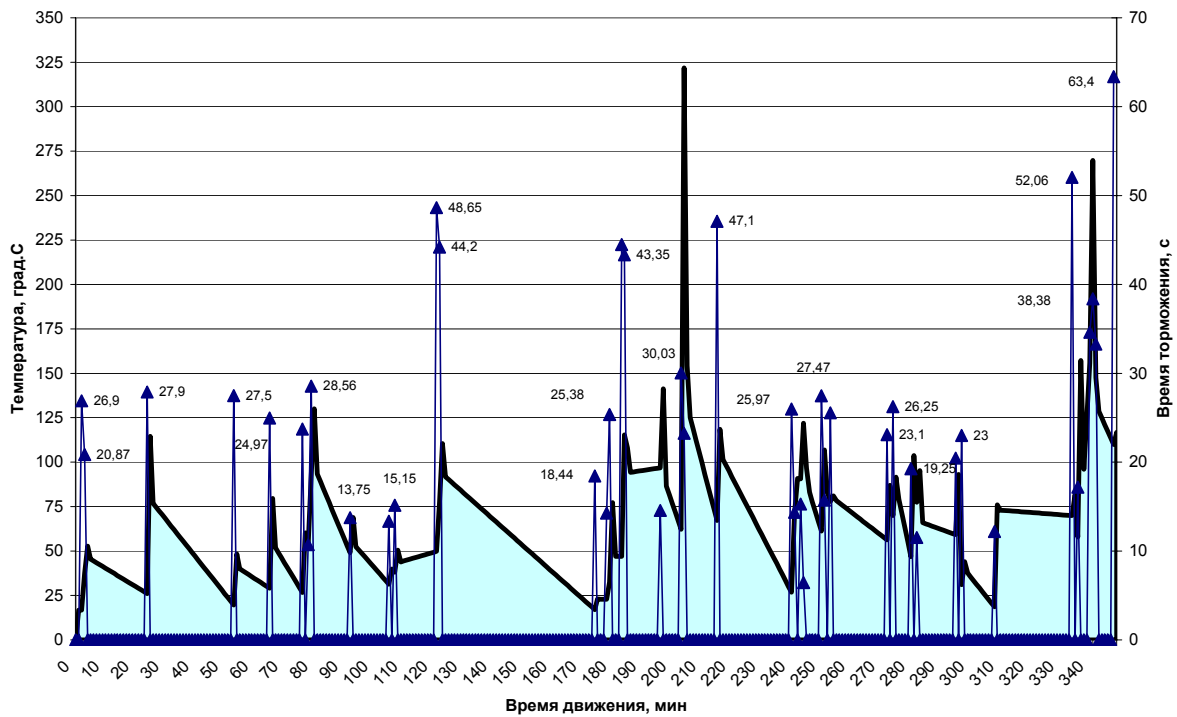


Рис. 15. Энергетический спектр регулировочных торможений при изменении длительности регулировочного торможения

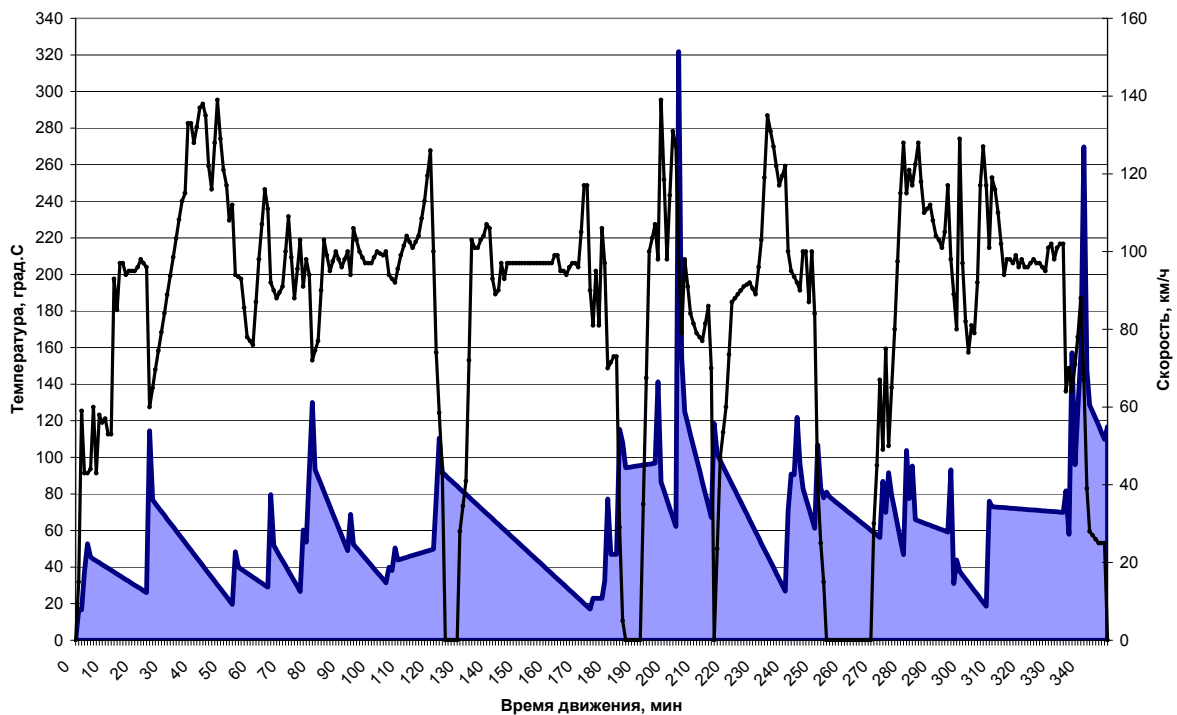


Рис. 16. Энергетический спектр регулировочных торможений при изменении скорости движения по маршруту «Киев – Днепропетровск»

б) величина температуры диска в значительной степени зависит от давления в тормозном цилиндре, реализуемого в процессе регулировочного торможения, и длительности торможения, коэффициенты корреляции составили

соответственно 0.556 и 0.331;

7) максимальная температура в диске (более 250 °C) возникает при давлении в тормозном цилиндре более 0.35 МПа;

8) максимальная температура в диске соста-

вила 343.8 °С при давлении в тормозном цилиндре 0.4 МПа, что меньше допустимой величины 375 °С (Памятка МСЖД 541-3 ОР);

9) вероятность превышения температуры в диске на выходе из накладки величины 350 °С при движении по маршруту «Днепропетровск – Киев – Днепропетровск» составляет 0.000174;

10) максимальная температура диска на входе в накладку не превысила 170 °С;

11) математическое ожидание величины температуры диска на выходе из накладки, при доверительной вероятности 0.95, составило 91.8...114.4 °С;

12) математическое ожидание величины температуры диска на входе в накладку, при доверительной вероятности 0.95, составило 53.8...65.5 °С;

13) средняя скорость уменьшения температуры между регулировочными торможениями составила 2.05 °С/мин;

14) температура в тормозном диске возрастает при проведении последовательных регулировочных торможениях от низшей ступени торможения к более высокой.

Выводы

1. Из результатов проведенных исследований вытекает, что графики движения пассажирских поездов №№ 165/166 по маршруту «Днепропетровск – Киев – Днепропетровск» не оказывают существенного влияния на температуру нагрева тормозных дисков, вероятность превышения максимальной температуры под накладкой более 300 °С составляет 0.0022, максимальная температура вне зоны накладки не превышает 170 °С.

2. Для уменьшения температуры в тормозном диске рекомендуется последовательные регулировочные торможения проводить от высшей ступени торможения к низшей, а также использовать такие виды торможения как рекуперативное или реостатное.

3. Разработанная методика может быть использована для исследования нагрева поверхности железнодорожного колеса при торможении вагона с колодочным тормозом.

Следует отметить, что полученные значения температур могут быть несколько завышенными, так как пассажирский поезд состоял из вагонов с различными тормозными системами, два из которых имели дисковые тормоза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985.

Поступила в редакцию 11.11.2007.

М. І. КАПЦА (ДІПТ)

ОРГАНІЗАЦІЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УТРИМУВАННЯ ТЕПЛОВОЗІВ СЕРІЇ ТГМ4 НА ПРИКЛАДІ ВАТ «МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

Метою роботи є визначення раціональної системи утримування гідромеханічної передачі тепловозів серії ТГМ4 для наперед встановленої надійності парку локомотивів при мінімальних витратах коштів та трудомісткості.

Целью работы являются определения рациональной системы содержания гидромеханической передачи тепловозов серии ТГМ4 для заведомо установленной надежности парка локомотивов при минимальных затратах средств и трудоемкости.

The purpose of work is determination of the rational system of maintenance of the hydromechanical transmission of diesel locomotives of a series ТГМ4 for the beforehand set reliability of locomotive fleet with minimum expenses of funds and labour capacity.

В свій час на підставі математичного моделювання процесів ремонту із залученням методів випадкових процесів, теорії надійності, методів оптимізації і функціонального аналізу були створені теоретичні основи кількісного опису моделей відновлення (ремонт) рухомого складу [1]. А розроблений аксіоматичний підхід до побудови математичних моделей ремонту рухомого складу дозволяє більш повно кількісно оцінювати вплив планових ремонтів на надійність локомотивів [2, 3]. Дану оцінку можна робити не тільки в умовах експлуатації, але і на стадії проектування.

Вишуканість математичного апарату, який застосовується в даній області досліджень, не компенсує відсутність врахування технології відновлювальних робіт. Автору не відомі дослідження з врахуванням технології при вирішенні задач з вибору раціональних систем утримування. Добре відомий той факт, що поєднуючи ті чи інші об'єми ремонтів, ми домагаємось відповідної економії ресурсів, однак у моделях розрахунку раціональної системи планових відновлень така ситуація не знаходила належного відображення. А розрив між теоретичними дослідженнями і практикою, що намітився в останні тридцять років, на наш погляд, обумовлений у першу чергу відсутністю математичних моделей, що враховують технологію відновлювальних робіт [4].

На цей час система планово-попереджувального ремонту (ППР) та обслуговування тепловозів ТГМ4 (ТГМ4А) в депо промислових підприємств передбачає планування та облік об'ємів відновлювальних робіт, виконання тех-

нічного обслуговування та періодичних ремонтів у визначені терміни, що виражені через кількість календарних днів, відпрацьованих кожним тепловозом.

Структура системи ППР тепловозів ТГМ4 (ТГМ4А) передбачає:

- чергування в певній послідовності технічного обслуговування та періодичних ремонтів;
- довготривалість ремонтних циклів та міжремонтних пробігів;
- періодичність технічного обслуговування.

В роботі [5] наведено визначення ремонтного циклу, як найменшого інтервалу часу, що повторюється, у визначеній послідовності та у відповідності до вимог нормативно-технічної документації на всі встановлені види ремонтів та обслуговування.

Розглядаючи тепловоз як технічний об'єкт його складові доцільно систематизувати за конструктивними особливостями, функціональному призначенню та технології відновлювальних робіт.

Це обґрунтовується ще і тим, що кожна деталь або агрегат мають свої тільки їм властиві характеристики надійності, міжремонтні періоди, що і потребує абсолютно різних витрат коштів та часу на їх відновлення.

Такий підхід дозволяє провести декомпозицію основних складових тепловоза, тобто представити його у наступному вигляді: механічна частина, гідромеханічна передача, дизель, допоміжне обладнання, пневматичне обладнання,

електричне обладнання, контрольно-вимірвальні прилади.

Збір та опрацювання статистичної інформації проводився безперервно, починаючи з серпня 1997 року і до травня 2007 року. Під спостереженнями знаходилися 52 тепловози серії ТГМ4, що експлуатуються на ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь».

Кількість спостережень, що дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків достовірністю ($\alpha = 0,9...0,95$) приймати рішення, встановлено у відповідності з [6]. Під час спостережень фіксувались об'єми ремонтів та обслуговувань, вивчались потоки появи відмов та способи їх усунення. Кожна відмова характеризувалася напрацюванням, вартістю виконаних робіт, трудомісткістю та часом простою в ремонті.

У відповідності до прийнятої схеми групування основних складових тепловоза ТГМ4, виконаний інженерний аналіз отриманої інформації по відмовах, що представлений у вигляді табл. 1.

Для детального розгляду побудови системи утримування зупинимося на уніфікованій гідромеханічній передачі (УГП), на долю якої приходить 20 % відмов від тепловоза в цілому.

По самій гідропередачі, як окремо взятій складовій тепловоза, відмови розподіляються наступним чином (табл. 2).

На основі табл. 2 складемо класифікатор несправностей гідропередачі, приклад якого представлений табл. 3.

На основі отриманої статистичної інформації про відмови складових гідропередачі будемо характеристики надійності у вигляді *H*-характеристик, які представлені у вигляді коефіцієнтів табл. 4.

Для побудови технолого-економічної карти УГП необхідна інформація, а саме: час на усунення відмови, трудомісткість операції та її вартість була надана ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» і зразок представлений у вигляді табл. 5.

Таблиця 1

Розподіл відмов по складовим тепловоза ТГМ4

№	Назва складових тепловоза	Кількість відмов у %
1	Механічна частина	10,6
2	Гідромеханічна передача	20,0
3	Дизель	39,2
4	Допоміжне обладнання	6,3
5	Пневматичне обладнання	10,4
6	Контрольно – вимірвальні прилади	3,6
7	Електричне обладнання	9,9
	Всього	100

Таблиця 2

Розподіл відмов у % по вузлам та системам УГП

№	Назва (системи) вузла	%
1	Корпус УГП	5
2	Приводний вал	5
3	Головний вал та гідроапарати	10
4	Вал відбору потужності	15
5	Вторинний вал та вал реверсу	8
6	Роздаточний вал	6
7	Допоміжне обладнання	30
8	Система управління	15
9	Привод реверсу та режимів	6
	Всього	100

Класифікатор несправностей (Корпус УГП)

№	Назва елемента	Код несправності	Несправність	у % до загальної кількості несправностей
1	Кріплення УГП до рами тепловоза	101	Послаблення	10
2	Розйом корпусу УГП	102	Нещільність	50
3	Прокладка люка УГП	103	Зношування	20
4	Прокладка фланця маслопроводу	104	Зношування	20
	Всього			100

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів H -характеристик елементів УГП тепловозів ТГМ4

Елемент	$a, 1/доба^2$	$b, 1/добу$	c
ω_1	$0,567 \cdot 10^{-5}$	$-0,707 \cdot 10^{-5}$	$0,194 \cdot 10^{-2}$
ω_2	$0,283 \cdot 10^{-4}$	$-0,109 \cdot 10^{-4}$	$0,333 \cdot 10^{-2}$
ω_3	$0,113 \cdot 10^{-4}$	$0,228 \cdot 10^{-5}$	$0,388 \cdot 10^{-2}$
....
....
ω_{100}	$0,234 \cdot 10^{-4}$	$0,159 \cdot 10^{-4}$	$-0,127 \cdot 10^{-1}$

Таблиця 5

Перелік робіт по усуненню несправностей (Корпус УГП)

Несправність	Перелік робіт	Час, відведений на усунення несправності, год	Трудомісткість операції по усуненню несправності, люд год	Вартість операції, грн	Робота в ТЕК, Θ	Елемент ω (матриця) A
101	Затягнути гайки кріплення	0,5	0,5	2,98	Θ_{11}	ω_1
102	Зняти корпус. Зачистити площину розйому. Нанести герметик. Встановити корпус.	16	32	230,72	Θ_{12}	ω_{64}
103	Зняти люк. Виготовити та замінити прокладку. Встановити люк.	1,5	1,5	8,94	Θ_{13}	ω_2
104	Від'єднати фланець. Змінити прокладку. Закріпити фланець.	1,5	1,5	8,94	Θ_{14}	ω_3

Інтенсивність відмов знайдемо із виразу

$$\bar{\lambda} = \frac{\alpha}{M_{инв}},$$

де α – відсоток несправних локомотивів депо;
 $M_{\text{інв}}$ – інвентарний парк локомотивів депо.

Вартість оплати праці на виконання технологічних операцій та їх трудомісткість без врахування матеріалів для технічного обслуговування (ТОЗ) та поточних ремонтів (ПР) гідропередачі тепловоза ТГМ4 взято на основі даних ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь», що станом на вересень місяць 2007 року складає

$$C_{\text{ТОЗ}} = 69,24 \text{ грн}; C_{\text{ПР1}} = 119,78 \text{ грн};$$

$$C_{\text{ПР2}} = 632,76 \text{ грн}; C_{\text{ПР3}} = 1228,0 \text{ грн}$$

$$T_{\text{ТОЗ}} = 8,9 \text{ люд} \cdot \text{год}; T_{\text{ПР1}} = 15,2 \text{ люд} \cdot \text{год};$$

$$T_{\text{ПР2}} = 80,3 \text{ люд} \cdot \text{год}; T_{\text{ПР3}} = 153,5 \text{ люд} \cdot \text{год}.$$

З урахуванням циклічності виконання ремонтів згідно з наказом № 310 (рис. 1,а) визначимо вартість робіт за шість років, тобто до капітального ремонту (КР), що складе 9724,5 грн. А для існуючої на ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» системи утримування тепловозів ТГМ4 (рис. 1,б) вартість робіт складе 8916,42 грн.

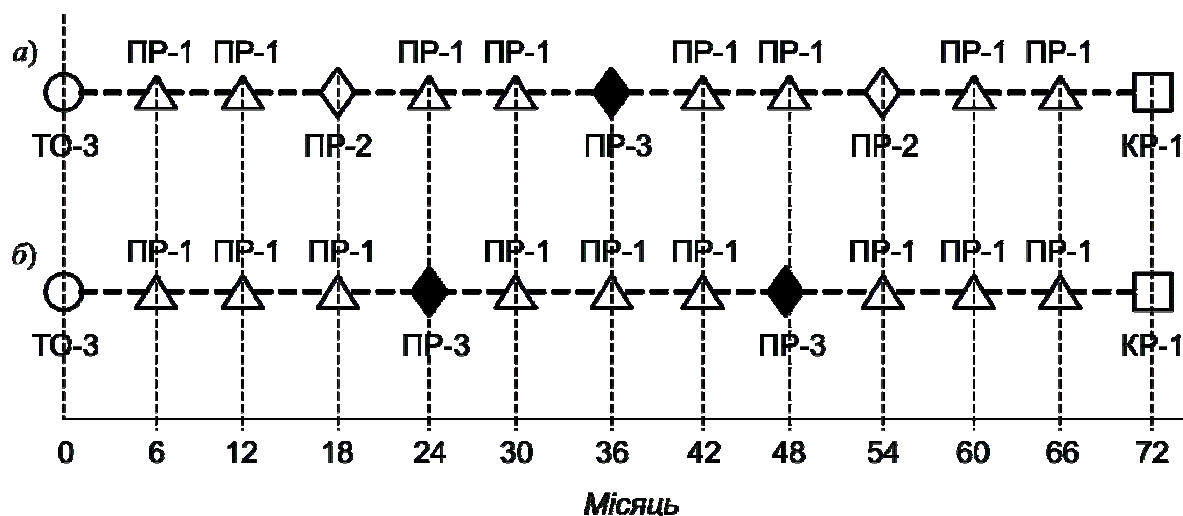


Рис. 1. Циклічність ремонтів:
 а) за наказом № 310 ; б) існуюча на ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь»

Для запропонованої системи утримування (рис. 2) вартість робіт складе 7734,5 грн. Тобто за шість років реалізації системи утримування, порівнюючи запроповану систему утримування та за наказом № 310, заощаджуємо кошти лише на одній гідропередачі 1990 грн.

Для інвентарного парку тепловозів ТГМ4 в 52 одиниці це складе 103480 грн. заощаджених

коштів за шість років. Якщо проаналізувати циклічність, отриману в результаті розрахунків, то можна стверджувати про певну закономірність повторюваності об'ємів виконуваних робіт через строго регламентовані проміжки часу, що і є раціональною системою утримування гідропередачі для даної серії локомотива та певних умов експлуатації.

$$k, x(k), V(k), C(V(k)), slambda(x(k), T), ydel-z$$

- 1, 206.8726052 {w₄₁, w₂₉, w₄₂, w₁₈, w₂₆, w₂₇, w₁, w₂₈, w₂₅, w₂₀}, 24.55, .3913800936 .1186720686
- 2, 240.8726052 {w₁₂, w₁₄, w₄₉, w₄₀, w₂₅}, 38.94, .3850660406 .2635833159
- 3, 272.8726052 {w₂₀, w₃₀, w₄₄, w₃, w₂₆, w₁₉, w₅₀, w₅₁, w₁₀, w₂₅}, 55.92, .3856213441 .4376034740
- 4, 312.8726052 {w₂₀, w₄, w₄₂, w₂₇, w₄₁, w₁, w₁₃, w₄₈, w₁₆, w₁₈, w₃₆, w₂₅, w₂₉}, 52.34, .3856112109 .5489454722

Рис. 2. Приклад визначення раціональної системи утримування УГП тепловозів серії ТГМ4 в умовах ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь»:

k – порядковий номер відновлення; $x(k)$ – доба відновлення; $V(k)$ – обсяги відновлювальних робіт;
 $(x(k), T)$ – інтенсивність відмов; $ydel - z$ – питомі витрати коштів на одиницю напрацювання

5, 344.8726052 { $w_{20}, w_{26}, w_{43}, w_{28}, w_{45}, w_{34}, w_{37}, w_{38}, w_2, w_{25}$ }, 48.85, .3874183349 .6396564896

40, 1888.872605 { $w_{18}, w_3, w_{25}, w_{26}, w_{10}, w_4, w_{49}, w_{19}, w_{41}, w_{22}, w_{42}, w_{50}, w_{30}, w_{29}, w_{40}, w_{20}, w_{51}, w_{44}$ }, 111.03,
.3884569500 2.100448696

41, 1948.872605 { $w_{28}, w_{14}, w_{18}, w_{25}, w_{12}, w_{26}, w_{36}, w_{27}, w_{49}, w_{15}, w_{32}, w_{41}, w_{42}, w_1, w_{13}, w_{29}, w_{20}$ }, 106.64,
.3883281227 2.090500933

42, 1990.872605 { $w_{18}, w_{48}, w_{40}, w_{25}, w_{23}, w_8, w_{26}, w_{17}, w_{30}, w_{27}, w_{41}, w_{44}, w_{33}, w_{42}, w_1, w_7, w_{29}, w_3, w_{20}$ }, 125.49,
.3873941282 2.109431809

43, 2064.872605 { $w_{18}, w_{50}, w_{25}, w_{49}, w_{28}, w_{26}, w_{16}, w_{27}, w_{51}, w_{41}, w_{42}, w_{10}, w_1, w_{12}, w_{19}, w_{29}, w_4, w_{20}, w_{14}$ }, 100.43,
.3874003632 2.082472299

44, 2096.872605 { $w_{43}, w_{34}, w_{25}, w_{36}, w_{26}, w_{40}, w_{37}, w_{35}, w_{38}, w_{45}, w_2, w_{20}$ }, 67.47, .3882503506 2.082868549

45, 2128.872605 { $w_{13}, w_{30}, w_{41}, w_5, w_{25}, w_{28}, w_{26}, w_{44}, w_{18}, w_3, w_{39}, w_1, w_{29}, w_{27}, w_{42}, w_{24}, w_{20}$ }, 99.81,
.3890647438 2.098444026

46, 2186.872605 { $w_{42}, w_{14}, w_{29}, w_{25}, w_{18}, w_{26}, w_{49}, w_{41}, w_{48}, w_{40}, w_{27}, w_1, w_{31}, w_{20}, w_{12}$ }, 81.69, .3892730825
2.080144033

Рис. 2 (продовження).

В запропонованій системі утримування відсоток несправних локомотивів α не перевищує 15 %, що є запорукою вчасного та якісного виконання технологічного процесу комбінату при мінімальних витратах коштів та трудомісткості.

Така система стане попереджуючим фактором появи аварійних відновлень, які відволікають значні грошові та трудові ресурси на їх усунення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Босов А. А. Теоретические основы и методика расчета плановых восстановлений локомотивов и вагонов: Дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1986. – 283 с.
2. Босов А. А. Математическое моделирование в задачах рационального содержания транспортных средств / А. А. Босов, М. И. Капица // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. – Луганськ, 2000, № 7 (29). – С.54-59.

3. Капица М. И. Уточнения аксиом теории восстановления / М. И. Капица, А. А. Босов // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2006, № 8 (102). – С. 78-84.
4. Босов А. А. Учет технологии ремонта при построении системы содержания локомотивов / А. А. Босов, М. И. Капица, Н. А. Мухина // Тр. V-й науч.-практ. конф. «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – М.: МИИТ, 2001. – С. IX-6–IX-8.
5. Хохлов Е. А. Эксплуатация и организация ремонта локомотивов промышленного транспорта / Е. А. Хохлов, Д. Б. Тверской. – М.: Транспорт, 1978. – 200 с.
6. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. – Л.: АН СССР «Наука», 1968. – 123 с.

Надійшла до редколегії 12.03.2008.

ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ

В даній роботі подані методика організації руху денно-нічних поїздів, різні види кільцювання пасажирського рухомого складу, їх недоліки та переваги.

В настоящей работе приведены методика организации движения денно-ночных поездов, разные виды кольцевания пассажирских составов, их недостатки и преимущества.

In the paper the procedure of organization of traffic of day-and-night trains, various kinds of looping of passenger train sets, their drawbacks and advantages are presented.

ВСТУП

В останні роки в Україні не вистачає необхідної кількості пасажирських вагонів для перевезення перспективної кількості пасажирів. Збільшити кількість вагонів в робочому парку можна кількома способами:

1. Закупляти пасажирські вагони в основному новому поколінню.
2. Відновити існуючий парк пасажирських вагонів за рахунок подовження їм терміну служби капітально-відновлювальним ремонтом.
3. Удосконалити організацію руху пасажирських поїздів, завдяки якій кількість пасажирських вагонів, задіяних на перевезеннях, скорочується.

В даній роботі розглянуті дослідження стосовно оптимізації руху пасажирських поїздів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Дослідити можливість впровадження в Україні денно-нічних поїздів та нових видів кільцювання пасажирського рухомого складу.

РЕЗУЛЬТАТИ

1. Організація денно-нічних поїздів. На початку 2007 року науковцями Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту одночасно з Головним пасажирським управлінням Укрзалізниці незалежно друг від друга було запропоновано впровадження денно-нічних поїздів. Укрзалізниця у 2007 році впровадила рух цих поїздів на напрямках Київ – Одеса та Київ – Львів.

Мета організації денно-нічних поїздів – часткова ліквідація дефіциту пасажирських вагонів за рахунок підвищення ефективності викорис-

тання рухомого складу, що обслуговує поїзди на напрямках Київ – Дніпропетровськ, Київ – Одеса, Київ – Харків, Київ – Львів. Ці поїзди мають спільну проблему – вони простоюють в Києві близько 15-16 годин і у русі знаходяться всього 8-9 годин. В результаті на кожному напрямку задіяні два рухомих склади. Для істотного підвищення ефективності та перевезення додаткової кількості пасажирів на цих напрямках було запропоновано рух денно-нічних поїздів, рухомий склад яких обертається за одну добу замість двох.

Розглянемо нову технологію руху на прикладі поїзду 79/80 Дніпропетровськ-Київ (рис. 1). З Дніпропетровська поїзд виходить за графіком нічного у 22 год. 45 хв. і прибуває у Київ о 6 год. 54 хв. Через 2 год. 20 хв. поїзд слідує до Дніпропетровська за графіком денного. При цьому скорочується час у русі. Після екіпування рухомого складу № 1 у депо за новою технологією поїзд подається на колії пасажирської станції Дніпропетровськ і за графіком нічного відправляється до Києва о 22 год. 45 хв. Одночасно за графіком нічного поїзда із Києва відправляється рухомий склад № 2 і прибуває у Дніпропетровськ, де його екіпувають, ремонтують і відправляють до Києва за графіком денного.

Таким чином, два рухомих склади виконують вдвічі більшу роботу і додатково перевозять пасажирів на дуже напруженому напрямку.

Економічні розрахунки графіку руху виконуються за таким сценарієм:

1. Поїзд подається на колії пасажирської станції Дніпропетровськ – $t_{\text{под}} = 0,17$ год;

2. Посадка пасажирів у поїзд – $t_{\text{пос}} = 0,33$ год;
3. Рух у напрямку Києва – $t_1 = 8,23$ год;
4. Висадка пасажирів – $t_{\text{вис}} = 0,25$ год;
5. Подача поїзда на колії відстою – $t_{\text{уб}} = 0,20$ год;
6. Прибирання поїзда в Києві на путях відстою – $t_{\text{пр}} = 2,00-2,20$ год;
7. Подача поїзда на колії станції Київ-пас. – $t_{\text{под}} = 0,20$ год;
8. Посадка пасажирів у поїзд – $t_{\text{пос}} = 0,33$ год;
9. Рух денного поїзда до Дніпропетровська – $t_2 = 7,00$ год;
10. Висадка пасажирів – $t_{\text{вис}} = 0,25$ год;
11. Подача поїзда на екіпірування – $t_{\text{уб}} = 0,17$ год;
12. Екіпірування поїзда в депо Дніпропетровськ – $t_{\text{уб}} = 5,00$ год;

Загальний час оберт рухомого складу № 1 дорівнює:

$$T = t_{\text{под}} + t_{\text{пос}} + t_1 + t_{\text{вис}} + t_{\text{уб}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{под}} + t_{\text{пос}} + t_2 + t_{\text{вис}} + t_{\text{уб}} + t_{\text{уб}} = 0,17 + 0,33 + 8,23 + 0,25 + 0,20 + 2,20 + 0,20 + 0,33 + 6,67 + 0,25 + 0,17 + 5,00 = 24,00 \text{ год.}$$

Для рухомого складу № 2 розрахунки такі ж самі, але починаються з міста Києва:

$$T = 0,25 + 0,20 + 2,20 + 0,20 + 0,33 + 6,67 + 0,25 + 0,17 + 5,00 + 0,17 + 0,33 + 8,23 = 24,00 \text{ год.}$$

Нижче побудовано графік руху обох рухомих складів на один оберт денно-нічного пасажирського поїзду № 79/80 Дніпропетровськ – Київ основного та альтернативного. Графік руху обох поїздів представлено на рис. 1.

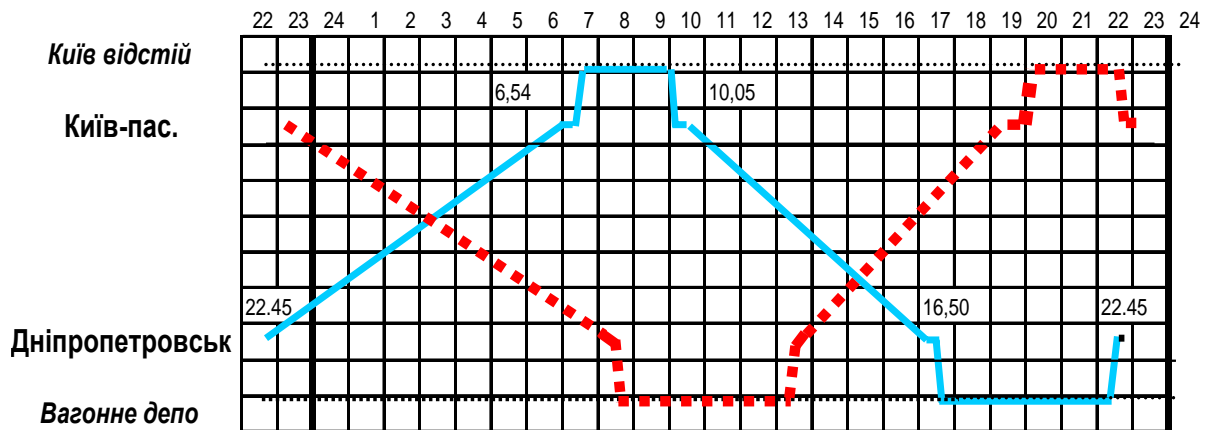


Рис. 1. Графік руху денно-нічного поїзда Дніпропетровськ – Київ за один оберт (поїзд № 1 – суцільна лінія та поїзд № 2 – пунктир)

Запропоновані поїзди мають не тільки переваги, а і недоліки, до яких слід віднести:

1. Відсутність вільного часу у графіку та неможливість компенсувати запізнення у разі деяких негараздів.

2. Необхідність проведення додаткових поточних ремонтів, на які потрібен час у стислому графіку.

Для уникнення другого недоліку запропоновано з суботи на неділю, коли основний потік пасажирів спливає, відправлення обох поїздів

за графіком існуючого поїзду Дніпропетровськ – Київ № 79/80. Завдяки такій операції поїзди кожного тижня міняються графіком і раз на два тижні один з рухомих складів попадає у вагонне депо Дніпропетровськ для проведення додаткового поточного ремонту та санітарної обробки.

На рис. 2 представлено графік руху обох поїздів Дніпропетровськ – Київ на протязі одного тижня та зміна рухомих складів графіком у неділю.

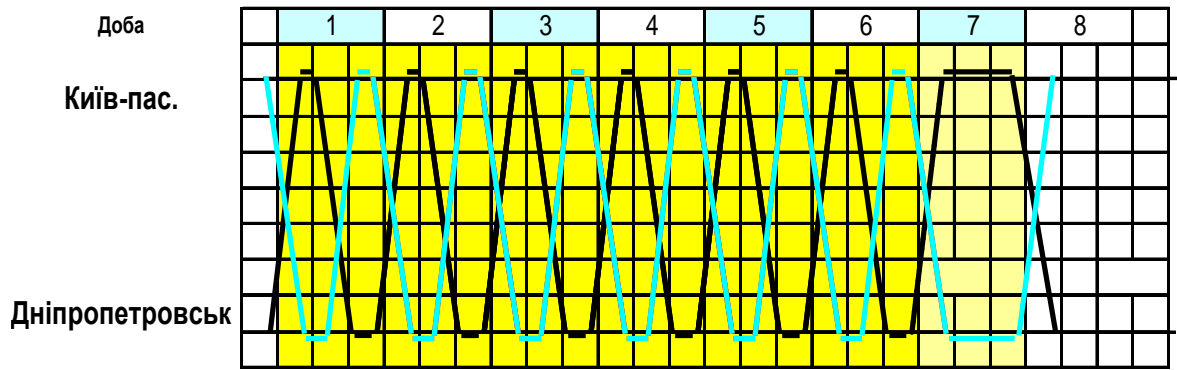


Рис. 2. Графік руху денно-нічного поїзда Дніпропетровськ – Київ за один тиждень (поїзд № 1 – темного кольору та поїзд № 2 – світлого кольору)

2. Кільцювання пасажирських поїздів
2.1. Види кільцювання пасажирського рухомого складу

Можна визначити кілька варіантів кільцю-

вання пасажирських поїздів (рис. 3-6):

1) Робота рухомого складу на два напрямки руху;

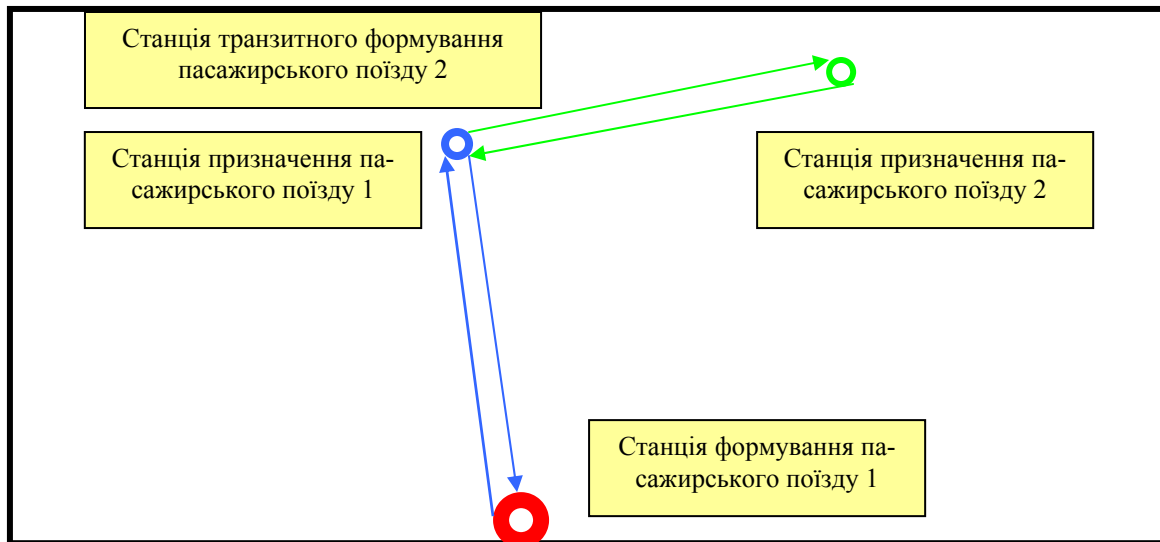


Рис. 3. Обслуговування одним рухомим складом двох напрямків за кільцевою схемою

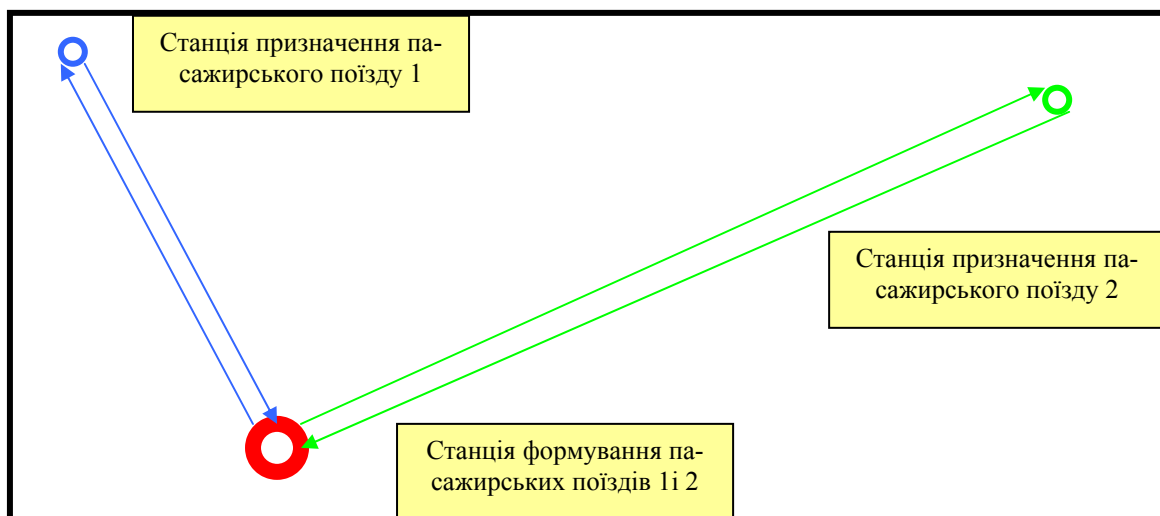


Рис. 4. Обслуговування одним рухомим складом двох напрямків за маятковою схемою

Не слід плутати кільцювання пасажирських поїздів за рис. 5 з організацією групового поїзду.

2) Робота рухомого складу на три напрямки руху;

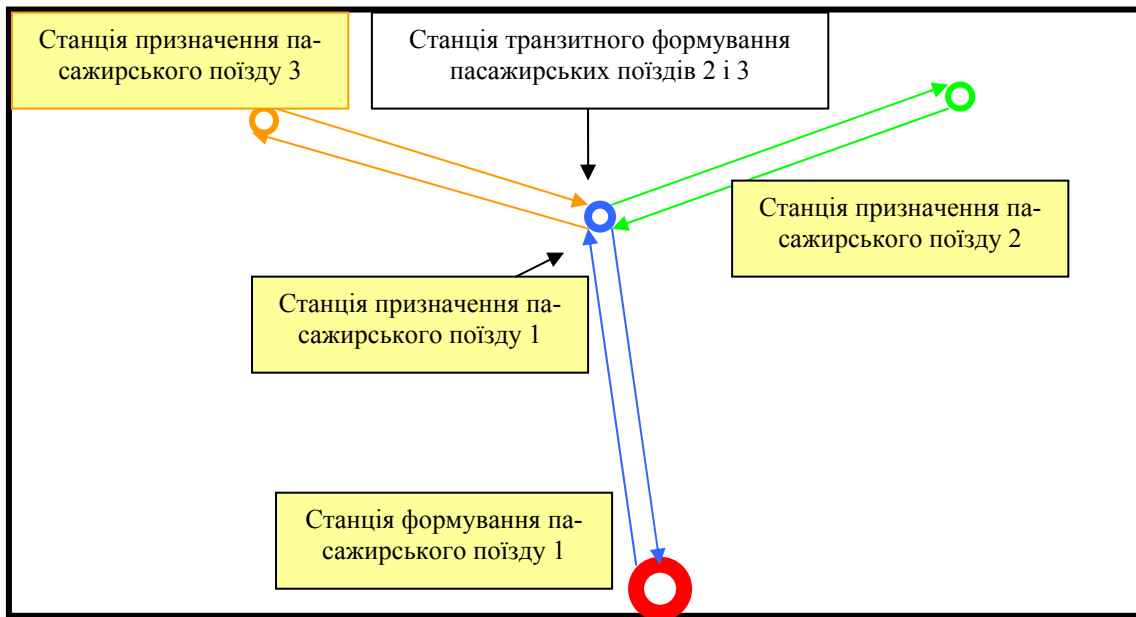


Рис. 5. Обслуговування одним рухомим складом трьох напрямків за маятниковою схемою

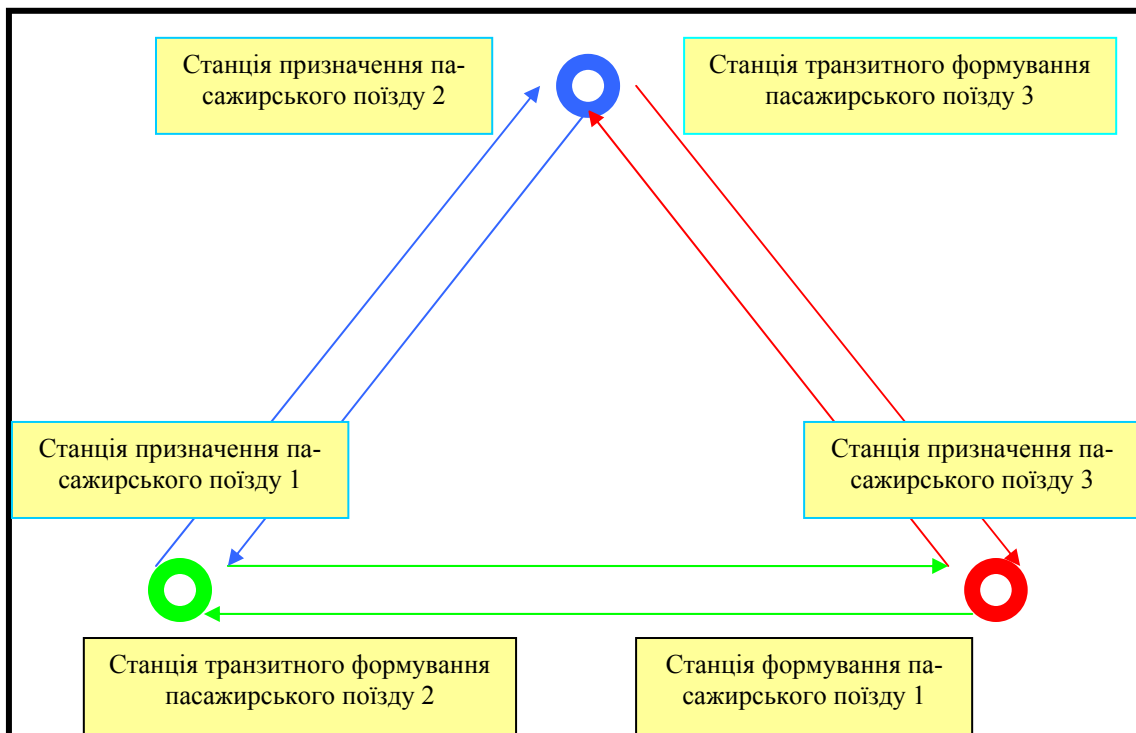


Рис. 6. Обслуговування одним рухомим складом трьох напрямків за кільцевою схемою

В службовому розкладі руху пасажирських поїздів іноді зустрічається вираз: «рухомий

склад в одному оберті з поїздом...» Ця фраза означає, що один рухомий склад обслуговує

одночасно поїзди двох напрямків і викликано кільцювання тим, що останнім часом пасажирських вагонів не вистачає і один рухомий склад закріплюють за двома поїздами в одному загальному оберті. Підв'язувати рухомий склад можна, якщо загальний термін простою обох поїздів на станціях формування та оберту становить не менш як 24 год. А якщо ще додати термін на компенсацію запізнення поїздів та різні непередбачені обставини (до 1-2 год.), то час, який поїзд простоює на кінцевих станціях маршруту, мусить бути не менш як 25-26 год. При кільцюванні поїздів можна зекономити тільки рівно одну добу.

Для простого кільцювання рухомого складу необхідно:

1. Маршрути поїздів, які слід обслуговувати одним рухомим складом, як правило, мусять починатися на одній станції.

2. Ця станція, як правило, мусить бути пунктом формування обох поїздів.

3. Поїзди обох напрямків мусять мати однакову композицію поїзду.

4. Категорія та класність пасажирських вагонів мусять бути однаковими.

5. Маса пасажирського поїзду (по кількості вагонів та довжині пасажирських колій) по обох напрямках не повинна перевищувати максимальних значень. Іноді можливі обґрунтовані відхилення від обмежень 2-5, але це буває дуже рідко.

2.2. Обслуговування одним рухомим складом двох напрямків за кільцевою схемою (рис. 3). Кільцювання за такою схемою проаналізуємо на прикладі руху поїзду Дніпропетровськ – Київ № 79/80, що курсує в одному оберті з пасажирським поїздом Київ – Феодосія № 214/213. Слід визнати, що таке кільцювання вже існує у службовому розкладі і може послужити прикладом неефективного кільцювання, оскільки разом у Дніпропетровську та в Києві (після кільцювання) рухомий склад простоює більш як 22 години.

Друга помилка неефективного кільцювання полягає у тому, що за кільцюваними поїздами різної категорії та з різними періодами курсування, один з яких курсує цілий рік, а другий – тільки влітку.

Можливість організації руху таких поїздів перевіряється в такій послідовності. Спочатку вводяться усі дані, що стосуються розкладу поїздів – час відправлення та прибуття на кінцеві станції обох маршрутів, що передбачається підв'язати в один загальний оберт. Далі вводяться нормативний час для подачі поїзда на

пасажирську технічну станцію або екіпірувальний пункт, термін екіпірування, подачі на колії пасажирської станції для відправлення на усіх кінцевих станціях. Потім поїзди, що передбачено підв'язати в один загальний оберт, порівнюються за класністю, категорією і композицією. Для ідентичних поїздів розраховується термін простою поїзда на станції формування та обох кінцевих станціях оберту як різниця між загальним обертотом кожного поїзда окремо та часом на рух, подачу, екіпірування і подачу на колії пасажирської станції. Після цього довжина рухомого складу порівнюється з довжиною пасажирських колій на усіх станціях напрямків обслуговування.

Далі відбувається основна перевірка загального часу відстою обох поїздів, що прогнозується обробляти одним рухомим складом в загальному оберті. Якщо цей час $t_{\text{цикл}}$ більше ніж 25-26 год. (термін обґрунтовується), то поїзди можна обслуговувати одним рухомим складом.

2.3. Обслуговування одним рухомим складом двох напрямків за маятниковою схемою (рис. 4). За такою схемою у діючому розкладі за кільцювання багатьох поїздів. Як приклад можна представити кільцювання швидких поїздів № 67/68 Сімферополь – Москва та № 90/89 Сімферополь – Дніпропетровськ одним рухомим складом формування ЛВЧД-11. Таке кільцювання скоротило час простою рухомого складу у Сімферополі, проте термін простою у Дніпропетровську залишився рівним близько 15 годин.

2.4. Обслуговування одним рухомим складом трьох напрямків за маятниковою схемою (рис. 5). Така схема кільцювання пасажирських поїздів практично не використовується на залізницях, але вона має право на життя в умовах дефіциту рухомого складу та інвестицій.

Наприклад, швидкий фірмовий поїзд «Дніпро» № 79/80 Дніпропетровськ – Київ знаходиться у Києві близько 16 годин. За умови дефіциту пасажирських вагонів цей рухомий склад можна використати на інших напрямках навіть без зміни службового розкладу руху поїздів. Пропонується в місті Києві розділити рухомий склад поїзда «Дніпро» на дві частини по 8 вагонів у кожній (за умови виключення вагонів СВ) та направити одну з них за маршрутом поїзда 825/826 Київ – Вінниця, а другу за маршрутом поїзда 808/807 Київ – Шостка (рис. 7). В схемі поїзда Дніпропетровськ – Київ додатково слід замінити купейний вагон на вагон з радіовузлом.

За такою схемою використання рухомого складу поїзда Дніпропетровськ – Київ можна обслуговувати одночасно три пасажирських напрямки замість одного та зекономити один електропоїзд підвищеної комфортності з десяти вагонів, який курсує між Києвом та Вінницею

та один електропоїзд підвищеної комфортності з десяти вагонів Київ – Шостка.

У той же час ці електропоїзди можна використати на інших напрямках замість звичайних пасажирських вагонів, яких в Україні не вистає.

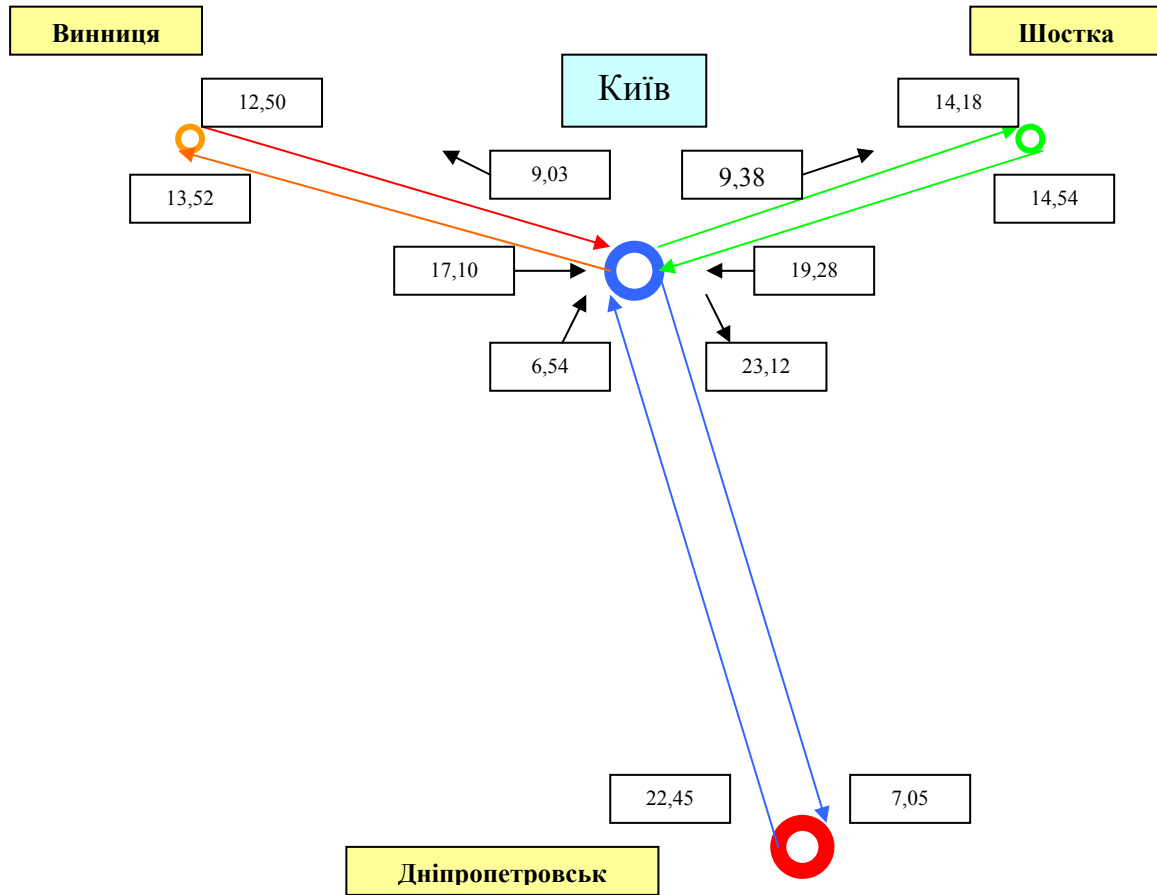


Рис. 7. Схема закріплення рухомого складу поїзда Дніпропетровськ – Київ за новими маршрутами

2.5. Обслуговування одним рухомим складом трьох напрямків за кільцевою схемою (рис. 6). Одним рухомим складом можна обслуговувати одночасно три напрямки руху. Як приклад наведено організацію пасажирських перевезень одним рухомим складом на ділянках Дніпропетровськ – Одеса, Одеса – Київ, Київ – Дніпропетровськ та в протилежному напрямку другим рухомим складом. При цьому на ділянках Дніпропетровськ – Одеса та Київ – Дніпропетровськ для поїздів № 63/64 і № 79/80 зберігається існуючий розклад

руху поїздів, а на ділянці Одеса – Київ додатково організується рух денного поїзду. Для перевезення пасажирів по трьох напрямках в обидві сторони задіяні чотири рухомих склади, тобто кількість їх залишилася, але всі вони повинні належати Дніпропетровському пасажирському вагонному депо.

На рис. 8 показана схема кільцювання рухомого складу одночасно на трьох напрямках.

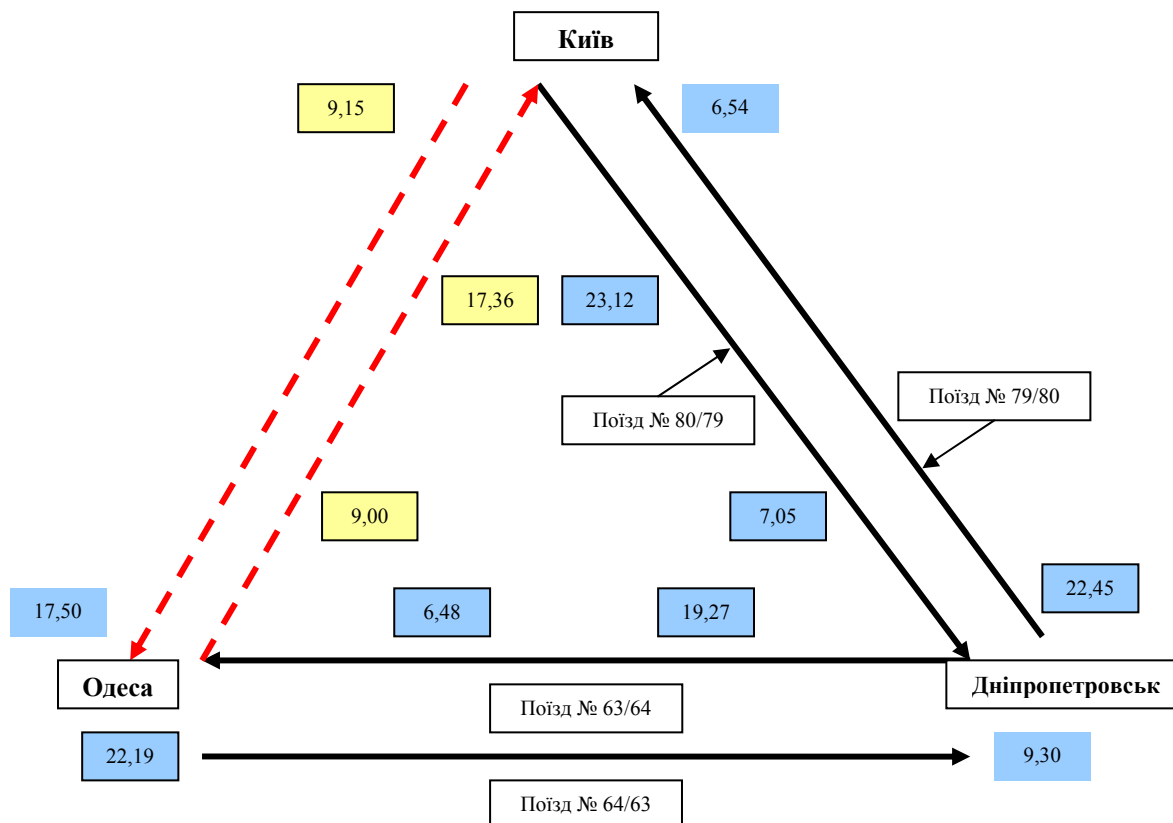


Рис. 8. Схема кільцювання рухомого складу одночасно на трьох напрямках: Дніпропетровськ – Одеса; Одеса – Київ; Київ – Дніпропетровськ

Таке кільцювання пасажирських поїздів поки ще не виконувалося в Україні, але має свої переваги. Такий спосіб доцільно використовувати, якщо потрібно на напружених напрямках перевести додаткову кількість пасажирів, не використовуючи додатковий рухомий склад. Як правило, в ці напрямки слід включати Київ та два обласних міста, між якими вже існує організований пасажирський рух і потрібно додатково перевезти пасажирів у столицю з одного з обласних міст.

ВИСНОВКИ

На підставі проведених досліджень можна констатувати, що організація денно-нічних поїздів та кільцювання деяких пасажирських поїздів,

за наведеними вище схемами, дозволяють економити дефіцитний рухомий склад, а також підвищити ефективність пасажирських перевезень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Розробка концепції пасажирського руху на залізницях України в 2008 – 2015 роках / Звіт про науково-дослідну роботу. Дніпропет. нац. ун-т залізн. трансп., 2007.

Надійшла до редколегії 26.03.2008.

П. Д. АНДРИЕНКО (ОАО НИИ «Преобразователь»), А. О. КАПЛИЕНКО (Запорожский национальный технический университет)

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Розроблена модель ТП постійного струму, з подальшим проведенням на цій моделі дослідження електромагнітних процесів на підстанції в режимі рекуперації з пристроями поглинання енергії, для включення яких використовуються безконтактні вимикачі. Моделювання дозволило оцінити характер електромагнітних процесів, які відбуваються на ТП при роботі поглинаючого пристрою з безконтактними вимикачами, і провести оптимізацію процесів.

Разработана модель ТП постоянного тока, с последующим проведением на этой модели исследования электромагнитных процессов на подстанции в режиме рекуперации с устройствами поглощения энергии, для включения которых используются бесконтактные выключатели. Моделирование позволило оценить характер электромагнитных процессов, происходящих на ТП при работе поглощающего устройства с бесконтактными выключателями, и провести оптимизацию процессов.

The model of direct current traction substation, with the subsequent carrying out on this model the research of electromagnetic processes on the substation in a mode of recuperation with energy absorption devices for inclusion of which contactless switches are used is developed. The modeling has allowed to estimate character of electromagnetic processes occurring on the traction substation at work of the absorbing device with contactless switches and to optimize the processes.

Введение

В настоящее время сети городского и пригородного пассажирского электрического транспорта для питания тягового привода и иных потребителей энергии на подвижном составе используют системы электроснабжения от тяговых подстанций (ТП) постоянного тока 3300 В.

В связи с развитием железнодорожного электротранспорта, в настоящее время, все актуальнее становится задача экономии электроэнергии, что стало возможным благодаря такому процессу, как рекуперация. Рекуперация в системе электроснабжения постоянного тока осуществляется, когда кинетическая энергия подвижного состава в процессе торможения преобразуется в электрическую и с помощью специального инвертора передается непосредственно в питающую сеть. Этот экологически чистый процесс экономит энергию, которая в противном случае в обычных режимах торможения теряется. Но при рекуперации может возникнуть избыток электрической энергии, которую некому потребить. Этот избыток энергии возникает, когда на участке железной дороги находится рекуперирующий ЭПС, но нет потребляющего ЭПС или потребляющий ЭПС не может использовать всю энергию рекупера-

ции. В таком случае избыток электрической энергии поглощается на ТП специальными гасящими устройствами, включение которых осуществляют быстродействующей коммутационной аппаратурой.

Однако выключатели постоянного тока за последнее время мало изменились, и используемые сейчас для их включения контактные выключатели имеют ряд недостатков: ограниченный ресурс переключений; низкую частоту коммутаций; искрообразование, которое вызывает сильные высокочастотные электромагнитные помехи; требуют проведения регламентных работ и регулярной замены в течение срока службы.

Нововведением последних лет являются бесконтактные полупроводниковые выключатели, которые позволили бы не только повысить надежность подстанционной аппаратуры, но и снизить затраты на ремонт и обслуживание контактных выключателей.

На сегодняшний день существует острая необходимость в модернизации ТП постоянного тока. Поэтому актуальной задачей является исследование электромагнитных процессов на подстанциях при различных режимах их работы. Решение этой задачи может быть осуществлено с помощью разработанной авторами модели ТП.

Постановка задач исследования

Целью статьи является разработка модели ТП постоянного тока, с использованием бесконтактных выключателей для устройств гашения избыточной энергии для проведения на этой модели исследования электромагнитных процессов на подстанции в режиме рекуперации без потребления рекуперированной энергии на линии.

Материалы исследования

Авторами была рассмотрена схема ТП постоянного тока (рис. 1), где контактные выключатели

постоянного тока, которые используются для включения гасящих резисторов при избытке энергии рекуперации, были заменены на бесконтактные.

При моделировании использовались данные типовой тяговой подстанции мощностью 3 МВт [1], в схеме которой контактная аппаратура резисторов поглощения избыточной энергии рекуперации, была заменена на бесконтактную. Принимаем, что на линии находится электропоезд ЭР-2Т [2], который перешел в режим рекуперативного торможения.

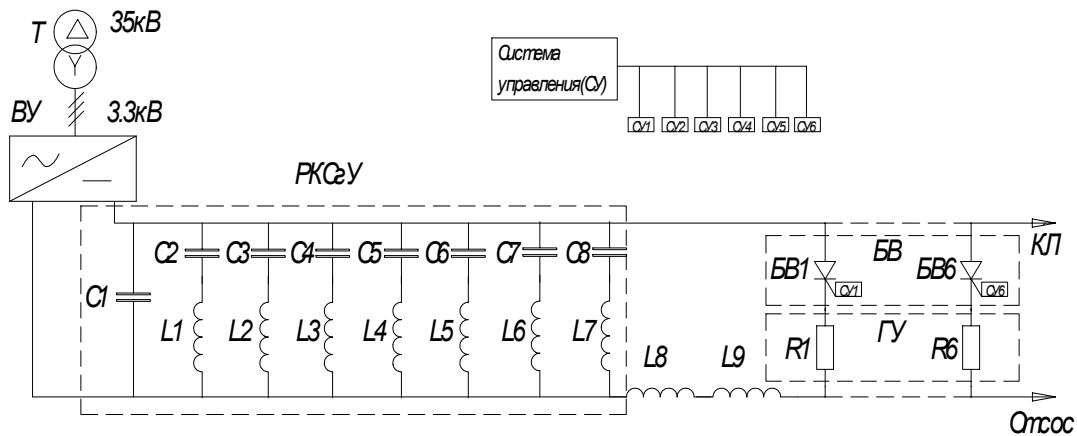


Рис. 1. Схема ТП постоянного тока с бесконтактными выключателями для устройств поглощения избыточной энергии рекуперации

Обозначение элементов схемы:

Т – понижающий трансформатор напряжения;

ВУ – выпрямительное устройство;

РКСГУ – резонансные контуры сглаживающего устройства;

L8, L9 – реакторы для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения;

БВ – бесконтактные выключатели;

ГУ – гасящее устройство.

Для проведения исследований электромагнитных процессов в предложенной авторами схеме была разработана имитационная модель, показанная на рис. 2. Исследование проводилось с помощью программного пакета Matlab 2006 при применении библиотеки SimPowerSystem [3-4].

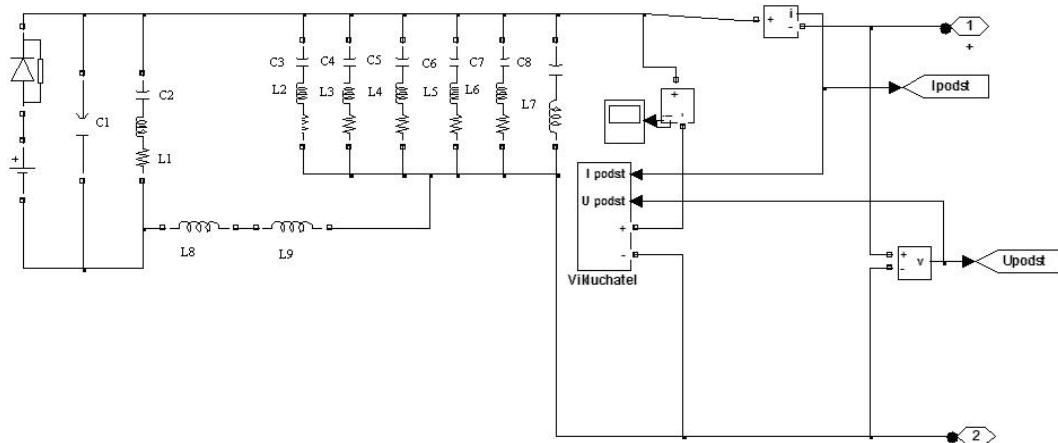


Рис. 2. Модель усовершенствованной схемы ТП постоянного тока

Vykluchatel – блок, содержащий 6 секций выключателей и систему управления их включением.

В данной модели блок с названием Vikluchatel представляет собой имитационную мо-

дель шести секций бесконтактных выключателей (S1-S6) с системой управления включением-выключением гасящих резисторов (Sistema Upravlenia), представленную на рис. 3.

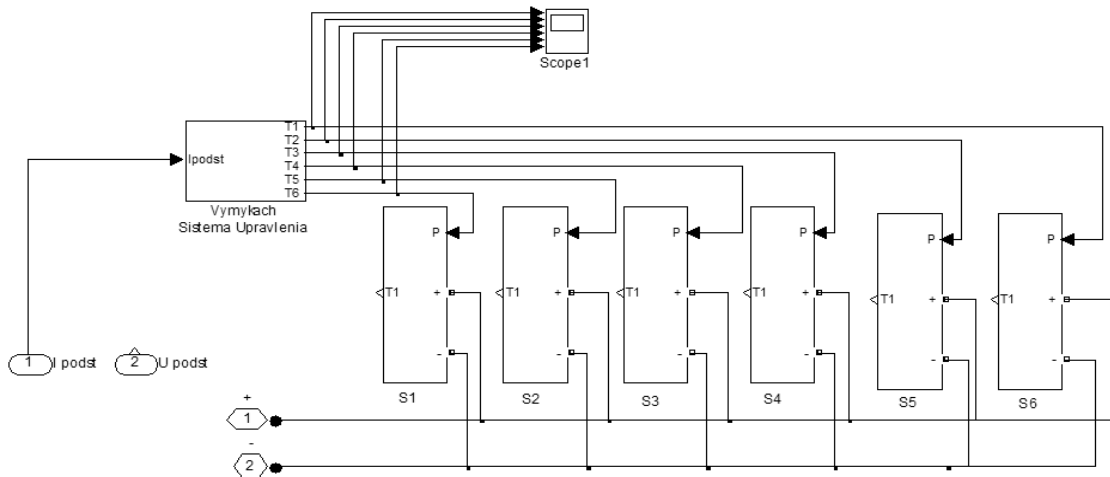


Рис. 3. Имитационная модель секций бесконтактных выключателей с системой управления

Система управления применяется при моделировании и обеспечивает ограничение максимально допустимого уровня напряжения, равного 4 кВ, на фидере ТП. Алгоритм системы управления состоит в том, что при увеличении (уменьшении) тока рекуперации от электроподвижного состава, происходит подключение (отключение) ступени гасящего устройства (в данном исследовании применено 6 ступеней) при достижении порогового значения напряжения.

На разработанной модели было проведено исследование аварийного режима работы ТП, а именно – рассмотрено перенапряжение, которое происходит при рекуперации энергии элект-

роподвижным составом без потребления рекуперированной энергии на линии рис. 4. Этот аварийный режим возникает, когда на участке тяговой сети нет ЭПС, который может использовать энергию рекуперации или в том случае, когда энергия рекуперации настолько велика, что ЭПС не может потребить ее полностью. Из графика видно, что даже при токе рекуперации около 200 А (что составляет 12 % от возможного тока рекуперации электропоезда), напряжение на фидере подстанции поднимается до 9 кВ, что недопустимо и является аварийным режимом. Для предотвращения подобных аварийных режимов на ТП и применяются гасящие резисторы.

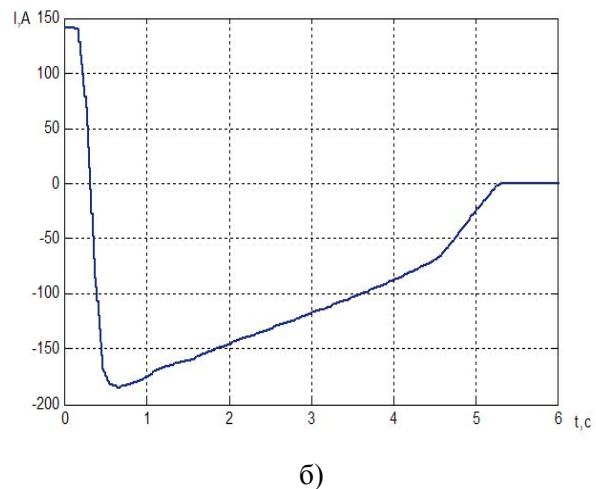
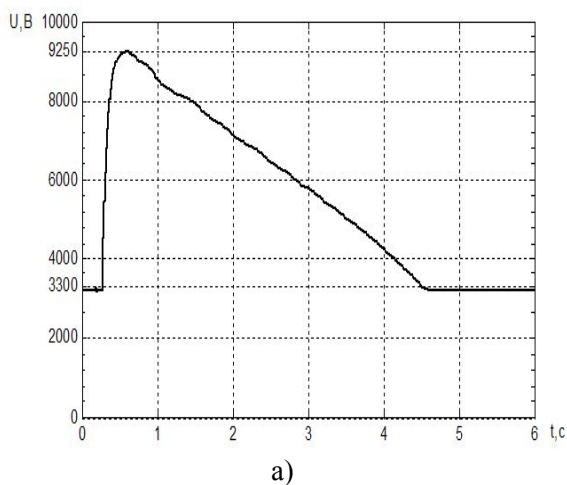


Рис. 4. Характер электромагнитных процессов на фидере ТП при избытке энергии рекуперации: а) – напряжение; б) – ток

Авторами было проведено моделирование схемы ТП с применением быстродействующего бесконтактного выключателя. Результаты моделирования работы подстанции с рекуперир-

рующим составом на линии при отсутствии потребителей рекуперированной энергии и наличии устройств поглощения избыточной энергии приведены на рис. 5.

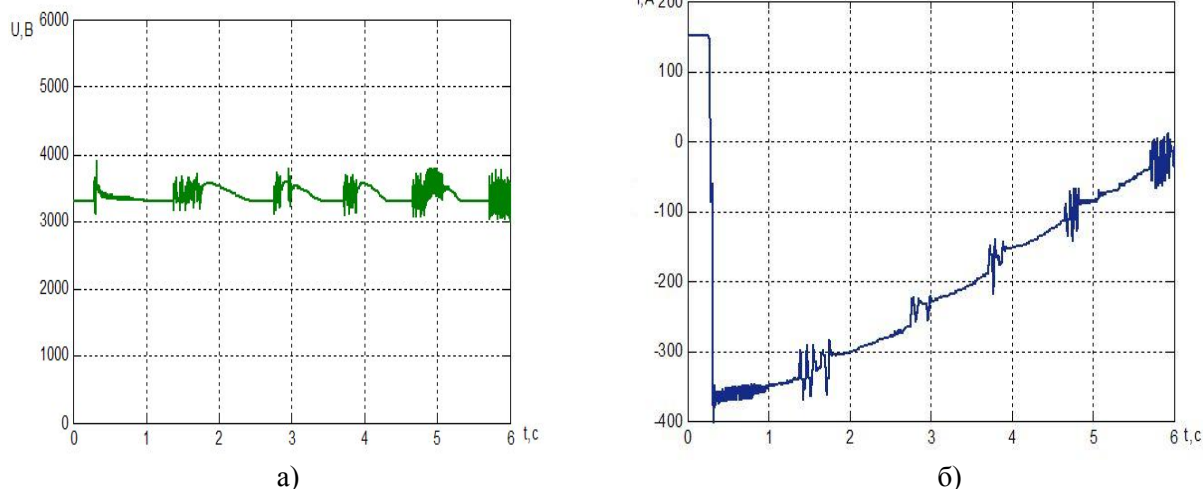


Рис. 5. Характер электромагнитных процессов на фидере ТП при включении гасящих резисторов: а) – напряжение; б) – ток

Как видно из графика, максимальное напряжение на фидере подстанции поддерживается системой управления бесконтактных выключателей гасящего устройства в допустимых пределах, не превышая 4 кВ. По мере уменьшения тока рекуперации и, соответственно, скорости ЭПС системой управления отключаются гасящие резисторы, что позволяет удерживать напряжение на фидере подстанции в заданных пределах. Из графиков на рис. 5 видно, что в процессе работы гасящего устройства с бесконтактными выключателями, возникают пульсации. Данные пульсации возникают в моменты отключения-включения системой управления последующего гасящего резистора. Пульсации происходят с частотой до 3 кГц и амплитудой напряжения до 600 В, а тока – до 50 А. Поэтому, в дальнейшем задачей авторов будет доработка алгоритмов работы системы управления, а также оптимизация каждой секции гасящего устройства для обеспечения наименьшего уровня пульсаций при работе бесконтактного выключателя. Отметим, что пульсации напряжения и тока, происходящие в моменты работы поглощающих устройств, за счет повышенной частоты модуляции, существенно ниже, чем при использовании контактной аппаратуры.

Выводы

Разработана имитационная модель ТП постоянного тока (с применением бесконтактных

выключателей вместо контактных), предназначенная для исследования электромеханических процессов в тяговой сети. Также был разработан алгоритм работы для управляющего модуля срабатывания выключателей гасящих резисторов. Проведенное моделирование позволило увидеть характер электромагнитных процессов происходящих при включении гасящих резисторов в системе ТП-ЭПС, в режиме рекуперации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бей Ю. М. Тяговые подстанции: Учеб. для вузов ж. д. транспорта / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1986. – 320 с.
2. Андриенко П.Д. Исследование динамики серийного электродвигателя с различными импульсными схемами регулирования. Электротехника та електроенергетика / П. Д. Андриенко, А. О. Каплиенко, С. І. Шило, І. Ю. Немудрий. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2007, № 1/2007.
3. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2002. – 304 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2001. – 319 с.

Поступила в редколлегию 11.02.2008.

М. КАНЕВСКИ, А. РОЙЕК, А. БЯЛОНЬ (Научно-технический центр железнодорожного транспорта, Отделение электроэнергетики, Варшава, Польша)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК ТИПОВ 2С120-2С-3, YС120-2СS150 И YС150-2СS150

У статті наведено опис дослідження контактної підвіски, проведене на РКР з 1994 р. з метою визначення оптимальної конструкції контактної підвіски для великих швидкостей руху. Зроблено опис тестувань модернізованої контактної підвіски типу 2С120-2С-3 і нових підвісок типу YС150-2СS150 та YС120-2С150. Дослідженнями доведено, що модернізована контактна підвіска і нові контактні підвіски мають гарну взаємодію з токоприймачами до швидкостей 200 км/год.

В статье описано исследование контактной подвески, проведенное на РКР с 1994 г. с целью определения оптимальной конструкции контактной подвески для больших скоростей движения. Описаны испытания модернизированной контактной подвески типа 2С120-2С-3 и новых подвесок типа YС150-2СS150 и YС120-2С150. Исследованиями доказано, что модернизированная контактная подвеска и новые контактные подвески проявляют хорошее взаимодействие с токоприемниками до скоростей 200 км/ч.

The paper presents the OCL tests that have been carried out from the year 1994 in the PKP's infrastructure, and which aim at construction of an OCL adapted for high speeds. Described were following OCL 2С120-2С-3 (modernised) and new type YС150-2СS150 and YС120-2С150. The tests showed that new OCL (of YС150-2СS150 and YС120-2С150 type) also enable to run with a speed of 200 km/h. It should be noted that probably the speed of 200 km/h is not a limit speed for these OCL types.

1. ВВЕДЕНИЕ

Западноевропейские страны приняли значительные меры для повышения скорости движения пассажирских поездов. В Польше тоже уделяется большое внимание данному вопросу.

В последнее время (сентябрь 2006 г.) в Германии на новопроложенном участке Hanover-München достигнут рекорд скорости движения локомотива, равный 357 км/ч. Измерительный поезд был веден электровозом *Eurosprinter*. Локомотив был оборудован токоприемником *Stemmann-Technik GmbH* типа DSA250 с углеродными накладками. В апреле 2007 г. TGV обогнал свой рекорд и достиг максимальной скорости движения 574,8 км/ч. Опытные поездки состоялись на участке Paryż – Strasbourg. Полная мощность данного состава составляла 19,68 МВт. С контактной сетью работал токоприемник типа CX фирмы *Faiveley*. Рекорд скорости ПКП составляет 250,1 км/ч, который был установлен в 1994 г. во время испытаний ETR 460 *Pendolino* на участке Warszawa – Zawiercie. Во время испытаний работал токоприемник WBL 85 фирмы *Schunk*.

В Польше существуют три типа контактной сети, с которыми может работать токоприемник со скоростями 200...250 км/ч. Это сети типа 2С120-2С-3, YС120-2СS150 и YС150-2СS150.

2. КОНТАКТНАЯ СЕТЬ 2С120-2С-3

Сеть проектировалась и строилась в 70-тые годы (2С120-2С) и последовательно модернизировалась в 1999 г. (2С120-2С-3). Состоит она из двух несущих тросов сечением 120 мм² и двух контактных проводов сечением 100 мм². Несущие тросы и контактные провода были изготовлены из меди CuETP. Основные механические параметры контактной сети приведены на рис. 1. Контактная сеть 2С120-2С-3 цепная, четырехпроводная с интегрированной системой несущих тросов и характеризуется следующими расчетными параметрами: минимальная эластичность: $e_{min} = 3,14$ мм/даН, эластичность под опорой: $e_s = 3,87$ мм/даН, максимальная эластичность: $e_{max} = 4,30$ мм/даН, коэффициент неравномерности эластичности $u = 15.5\%$ ¹, скорость расхождения механической волны 393 км/ч.

Во время испытаний сети 2С120-2С-3 [1] измерялись следующие параметры: подъем контактных проводов, качество взаимодействия токоприемника с контактной сетью путем измерения контактных зазоров, скорость движения, проследованный путь и время проезда. Подъем контактных проводов как функция скорости движения приведен на рис. 2., а подъ-

¹ $u = (e_{max} - e_{min}) / (e_{min} + e_{max})$

ем в 2/3 пролета как функция времени приведен на рис. 3. Максимальное значение подъема составляло 94 мм при скорости движения 235 км/ч. Результат взаимодействия токоприемника с контактной сетью при скорости движения до 250 км/ч положительный. В контактной сети 2С120-2С при скоростях движения 190 км/ч и выше появлялись проблемы с качеством взаимодействия контактной сети с токоприемником в анкерных пролетах и воздушных стрелках. Проблемы были устранены во время модернизации сети 2С120-2С-3. Во время испытаний измерялся нагрев в 8 точках медных контактных вставок токоприемника при скорости движения 200 км/ч и потреблении тока около 2700 А. Перегрев составлял максимально 91 °С. Конечный результат испытаний для сети С120-2С-3 положительный при скорости движения до 200 км/ч.

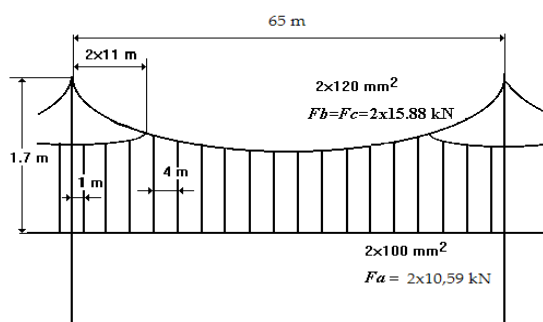


Рис. 1. Модернизированная контактная подвеска типа 2С120-2С-3

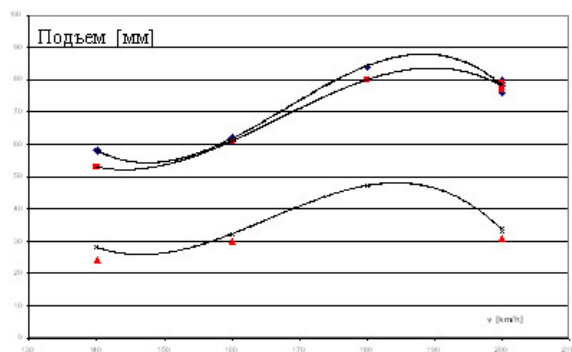


Рис. 2. Подъем проводов контактной подвески 2С120-2С-3 как функция скорости движения

3. КОНТАКТНЫЕ СЕТИ YС120-2СS150 И YС120-2СS150

Новые типы контактных сетей YС120-2СS150 и YС120-2СS150 – это трехпроводные сети цепного типа. Состоят они из 2 контактных проводов сечением 150 мм² каждый, изготовленных из низколегированной меди с до-

бавкой серебра 0,1 % и несущего троса сечением 120 мм² или 150 мм². Данные сети имеют эластичную подвеску под опорой, изготовленную из троса сечением 35 мм². Несущие тросы изготовлены из катодной меди.

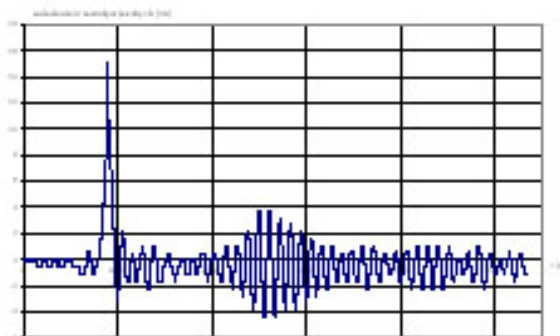


Рис. 3. Подъем проводов контактной сети 2С120-2С как функция времени, измеренный в 2/3 пролета при скорости движения 235 км/ч

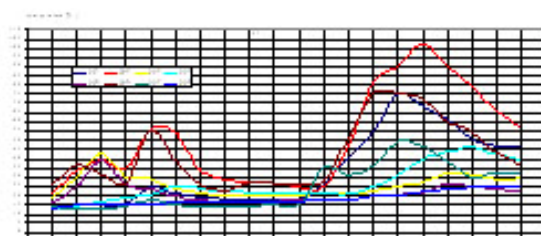


Рис. 4. Перегрев в медных контактных вставках токоприемника DSA200 при скорости движения 200 км/ч и потреблении максимального тока 2679 А

Основные параметры новых сетей представлены на рис. 5 и 6. Остальные расчетные параметры следующие:

- минимальная эластичность: $e_{min} = 2,84$ мм/даН для YС120-2СS150 и $e_{min} = 2,56$ мм/даН для YС150-2СS150,
- максимальная эластичность: $e_{max} = 3,83$ мм/даН для YС120-2СS150 и $e_{max} = 3,63$ мм/даН для YС150-2СS150,
- коэффициент неравномерности эластичности: 15 % для YС120-2СS150 и 17,2 % для YС150-2СS150,
- скорость расхождения механической волны $v_c = 369$ км/ч,
- токовая нагрузка: $I = 2500$ А для поездов со скоростью движения $v_b = 200$ км/ч, с последовательностью 10 мин, при скорости ветра $v = 0,6$ м/с и принятым лимитом повышения температуры для CuETP $\Delta\theta_d = 80$ °С, а для CuAg0,1 $\Delta\theta_d = 110$ °С (для YС120-2СS150),
- токовая нагрузка: $I = 2730$ А для поездов со скоростью движения $v_b = 200$ км/ч, с последовательностью 10 мин, при скорости

ветра $v = 0,6$ м/с и принятым лимитом повышения температуры для CuETP $\Delta\theta_d = 80$ °C, а для CuAg0,1 $\Delta\theta_d = 110$ °C (для YC150-2CS150).

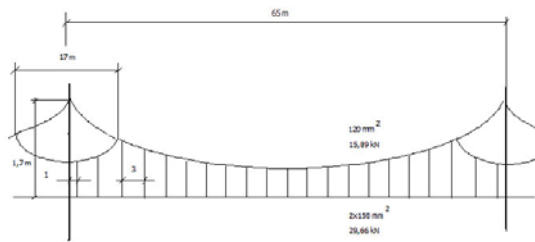


Рис. 5. Контактная подвеска типа YC120-2CS150

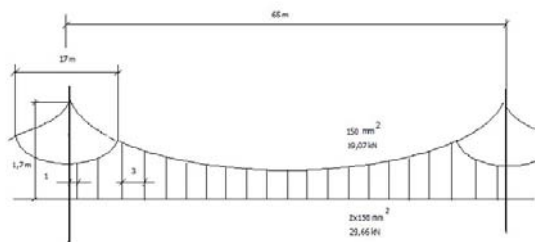


Рис. 6. Контактная подвеска типа YC150-2CS150

3.1. Статические испытания контактной сети

На участке Warszawa – Kutno был подвешен испытательный участок контактной сети длиной около 5 км. Разница высоты между очередными опорами составляет в среднем: 12 ± 10 мм для сети YC120-2CS150 и 14 ± 11 мм для сети YC150-2CS150. Отбой крайнего контактного провода составлял с -35 по $+32$ см. Измеренная под опорой минимальная эластичность контактной сети составляла в среднем 2,6 мм/даН для сети YC120-2CS150 и 2,7 мм/даН для сети YC150-2CS150. Максимальное значение, измеренное в половине пролета, составляло 3,7 мм/даН для сети YC120-2CS150 и 3,5 мм/даН для сети YC150-2CS150 (рис. 7). Коэффициент неравномерности эластичности составлял 17,5 % для сети YC120-2CS150 и 12,9% для сети YC150-2CS150. Выше приведенные параметры квалифицируют испытываемую контактную сеть для движения поездов со скоростью 200 км/ч.

3.2. Испытания взаимодействия токоприемника с контактной сетью

Во время динамических испытаний [3] токоприемника локомотива VUZ с контактными сетями YC120-2CS150 и YC150-2CS150:

- не обнаружались контактные зазоры между лыжей токоприемника и контактным проводом при скорости движения до 210 км/ч,

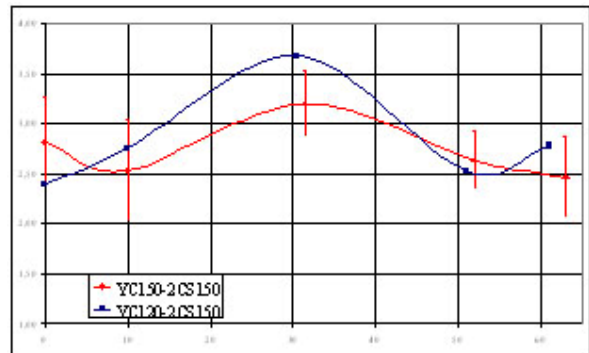


Рис. 7. Статическая эластичность контактных подвесок YC120-2CS150 и YC150-2CS150

- на основе анализа изображения взаимодействия токоприемника с контактной сетью обнаружено искрообразование во время испытаний между токоприемником и контактным проводом в районе совместной дорожки, под избранными опорами и в пролете,
- максимальная конвекция проводов контактной сети (рис. 8) при статичной силе токоприемника 109 Н и скорости движения 210 км/ч под опорой составляла 63 мм для сети YC120-2CS150 и 58 мм для сети YC150-2CS150,
- максимальные значения перемещения лыжи токоприемника при скорости 210 км/ч составляли 21 мм, т.е. 70 % полного диапазона работы лыжи,
- самое большое перемещение рамы токоприемника (120 мм) произошло во время проезда токоприемника под анкерным пролетом (рис. 9),
- вычисленная во время измерений на опытном участке касательная сила всегда была положительной.

3.3. Итоги

Из испытаний, проведенных в 1994 г., следует, что на ПКП существуют три типа контактной сети: 2С120-2С-3, YC120-2CS150 и YC150-2CS150, которые с положительным результатом прошли проведенные во внешних условиях испытания качества взаимодействия токоприемника с контактной сетью для скорости движения 200 км/ч. Из этого полагается, что данные сети положительно пройдут испытания для скорости движения до 250 км/ч.

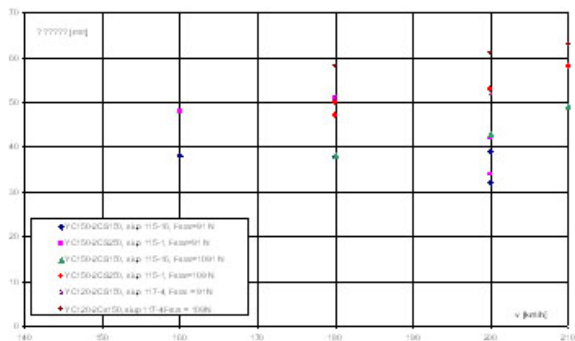


Рис.8. Подъем контактных проводов как функция скорости движения для YC120-2CS150 и YC150-2CS150

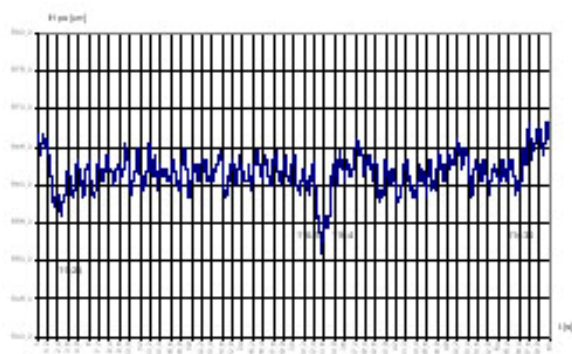


Рис. 9. Перемещение пункта контакта токоприемника и контактной сети на измерительном участке, $v = 210$ км/ч

Преимущество новых контактных сетей YC120-2CS150 и YC150-2CS150 над сетью 2C120-2C-3 заключается в том, что при таком же суммарном сечении они имеют на один контактный провод меньше. Благодаря этому они не такие сложные при монтаже, проще их содержание, а также у них больший срок службы. В новых сетях используются контактные провода, изготовленные из серебрянной меди

(CuAg0,1), что повышает температуру рекристаллизации до 160 °С. При этом существует возможность большей токовой нагрузки. Коэффициент трения контактного провода из серебрянной меди (CuAg0,1) и контактных вставок токоприемника из меди (CuETP) ниже на 25 % коэффициента трения контактного провода из меди (CuETP) и контактных вставок токоприемника из меди (CuETP) (это результаты лабораторных испытаний [3]).



Рис. 10. Испытательный поезд во время проведения испытаний около города Kutno (фото В. Маевского)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kaniewski M. Badania dynamiczne i eksploatacyjne odbieraka prądu typu DSA200. – Warszawa, maj 2000 r.
2. Kaniewski M. Badania sieci YC150-2CS150 i YC150-2CS150. – Warszawa, czerwiec 2007 r.
3. Kawecki A. Badania charakterystyk materiałowych przewodów jezdnych typu AC-100 z miedzi w gat. ETP oraz CuAg0,1 w symulacyjnych warunkach eksploatacyjnych / A. Kawecki, T. Knych, A. Mamala // 7th Int. Conf. MET 2005. – Warszawa, 2005 r.

Поступила в редколлегию 04.03.2008.

НОРМУВАННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ВЛАСНІ ПОТРЕБИ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Запропоновано методи визначення норм витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій постійного струму.

Предложены методы определения норм затрат электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций постоянного тока.

The methods of determination of electric energy consumption norms that can be used for forecasting the own needs of DC traction substations are offered in the paper.

Сучасний залізничний транспорт – це високотехнологічний механізм із значним споживанням енергоресурсів для забезпечення своєї господарської діяльності. Щорічно залізницями України споживається значна кількість дизпалива, електроенергії, газу, вугілля, мазуту топкового та інших видів паливно-енергетичних ресурсів. За сучасних умов, що передбачають поступове, але невпинне зростання дефіциту енергоресурсів, безперечно необхідно проводити реформування залізничного транспорту в цілому та галузі електроенергетики транспорту як найбільш перспективної з точки зору остаточної переорієнтації на неї транспорту.

Реформування транспорту неможливе без зміни енергетичної політики транспорту як невід'ємної частини енергетики України. З огляду на останні тенденції ринку електроенергії, основою енергетичної політики транспорту на найближчий період є перехід з енергомарнетного на енергозберігаючий шлях розвитку у всіх сферах енергоспоживання.

З метою зниження споживання паливно-енергетичних ресурсів та реалізації державної політики з енергозбереження на залізничному транспорті в червні 1996 р. фахівцями Укрзалізниці спільно з Харківською державною академією і Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту була розроблена та схвалена Техніко-економічною радою Укрзалізниці «Програма енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996-2010 рр.».

Починаючи з цього часу, робота з енергозбереження та ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів на Укрзалізниці перейшла в якісно іншу фазу. Щорічно розробляється та реалізується Програма енергозбереження та організаційно-технічні заходи з

економії паливно-енергетичних ресурсів. Річні обсяги економії споживання енергоресурсів від реалізації цих програм складають 1.5–3.4 % від загального споживання.

Є багато шляхів енергозбереження, а нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів (далі – ПЕР) є одним з них. Нормуванню підлягають всі витрати ПЕР на основні та допоміжні виробничі процеси, включаючи неминучі втрати енергії, незалежно від обсягів споживання цих ресурсів та джерел енергопостачання.

Нормування є дуже специфічним процесом, який має багато особливостей. На даному етапі реформування галузі у спеціалістів, професійна діяльність яких тим чи іншим чином пов'язана з нормуванням витрат ПЕР, виникає ще багато питань при розрахунках. Це викликано недосконалістю нормативно-технічної документації, наявністю так званих «білих плям» у різноманітних методичних вказівках по нормуванню витрат ПЕР. Метою даної статті є вирішення деяких питань, що виникають при проведенні робіт з нормування електроенергії на власні потреби тягових підстанцій.

Фактичні (звітні) втрати електроенергії визначають як різниця електроенергії, що надійшла в мережу, і електроенергії, відпущеної з мережі споживачам. Ці втрати містять у собі складові різної природи: втрати в елементах мережі, що мають чисто фізичний характер, витрата електроенергії на роботу устаткування, встановленого на підстанціях й забезпечуючого передачу електроенергії, погрішності фіксації електроенергії приладами її обліку й, нарешті, розкрадання електроенергії, несплату або неповну оплату показань лічильників і т.п.

Поділ витрат на складові може проводитися за різними критеріями: характеру витрат (по-

стійні, змінні), класам напруги, групам елементів, виробничим підрозділам і т.д. Для цілей нормування втрат доцільно використовувати укрупнену структуру втрат електроенергії, у

якої втрати розділені на складові, виходячи з їхньої фізичної природи й специфіки методів визначення їхніх кількісних значень (рис. 1).



Рис.1. Детальна структура звітних втрат електроенергії

Виходячи із цього критерію, фактичні втрати можуть бути розділені на чотири складові:

1) технічні втрати електроенергії, обумовлені фізичними процесами, що відбуваються при передачі електроенергії по електричних мере-

жах, що виражаються в перетворенні частини електроенергії в тепло в елементах мереж. Технічні втрати не можуть бути вимірні. Їх значення отримують розрахунковим шляхом на основі відомих законів електротехніки;

2) витрата електроенергії на власні потреби підстанцій, які необхідні для забезпечення роботи технологічного устаткування підстанцій і життєдіяльності обслуговуючого персоналу. Витрата електроенергії на власні потреби підстанцій реєструється лічильниками, установленими на трансформаторах власних потреб;

3) втрати електроенергії, обумовлені інструментальними похибками її виміру (інструментальні втрати). Ці втрати одержують розрахунковим шляхом на основі даних про метрологічні характеристики й режими роботи використовуваних приладів;

4) комерційні втрати, обумовлені розкраданнями електроенергії, невідповідністю показань лічильників оплаті за електроенергію побутовими споживачами й іншими причинами в сфері організації контролю за споживанням енергії. Комерційні втрати не мають самостійного математичного опису і, як наслідок, не можуть бути розраховані автономно. Їхнє значення визначають як різницю між фактичними (звітними) втратами й сумою перших трьох складових. Три перші складові укрупненої структури втрат обумовлені технологічними потребами процесу передачі електроенергії по мережах й інструментальному обліку її надходження й відпуску. Сума цих складових добре описується терміном технологічні втрати. Четверта складова – комерційні втрати – являє собою вплив «людського фактора» і містить у собі всі його прояви: свідомі розкрадання електроенергії деякими абонентами за допомогою зміни показань лічильників, споживання енергії повз лічильники, несплату або неповну оплату показань лічильників, визначення надходження й відпуску електроенергії по деяких точках обліку розрахунковим шляхом (при розбіжності границь балансової приналежності мереж і місць установки приладів обліку) і т.п.

Технічні втрати можна розділити на поелементні складові, витрата електроенергії на власні потреби підстанцій містить у собі 23 типи електроприймачів, похибки обліку включають складові, обумовлені вимірювальними трансформаторами струму, напруги й електричними лічильниками, комерційні втрати також можуть бути розділені на численні складові, що відрізняються причинами їхнього виникнення.

Можна побачити, що витрата електроенергії на власні потреби підстанцій обліковується у звітності в складі технічних втрат, а втрати, обумовлені похибками системи обліку електроенергії, – у складі комерційних втрат. Це є не доділком існуючої системи звітності, тому що не

забезпечує ясного уявлення про структуру втрат і доцільних напрямків робіт з їхнього зниження.

Критерії віднесення частини електроенергії до втрат можуть бути фізичного й економічного характеру. Деякі фахівці вважають, що втрати електроенергії на власні потреби підстанцій треба відносити до корисної відпустки, а інші складові – до втрат. Витрата на власні потреби підстанцій по характеру використання електроенергії дійсно нічим не відрізняється від її використання споживачами. Однак це не є підставою вважати її корисною відпусткою, під якою розуміють електроенергію, відпущену споживачам, а витрата електроенергії на власні потреби підстанцій є внутрішнім споживанням об'єкта. Крім того, при такому обґрунтуванні як аксіома передбачається, що витрата частини енергії в елементах мереж на доставку іншої її частини споживачам, на відміну від витрати на власні потреби підстанцій, не є корисною.

Суму технічних втрат, витрати електроенергії на власні потреби підстанцій і комерційних втрат (розкрадань) можна назвати фізичними втратами електроенергії. Ці складові дійсно пов'язані з фізикою розподілу енергії по мережі. При цьому перші дві складові фізичних втрат відносяться до технології передачі електроенергії по мережах, а третя – до технології контролю кількості переданої електроенергії.

До сих пір немає нормативного документу, який би нормував витрати електроенергії на власні потреби тягових підстанцій постійного струму Укрзалізниці. При проведенні розрахунків з визначення норми витрат електроенергії тягових підстанцій постійного струму використовували [1]. Крім деяких неузгоджень з умовами та схемами роботи тягових підстанцій залізничного транспорту (більша кількість споживачів власних потреб на тягових підстанціях у порівнянні з типовими підстанціями енергосистеми), в [1] повністю відсутній розділ для тягових підстанцій постійного струму. В залежності від проекту тягової підстанції до витрат на власні потреби додаються:

1. витрати електроенергії на вентиляцію напівпровідникового перетворюючого агрегату;
2. витрати електроенергії на обігрів РП-3,3 кВ;
3. витрати електроенергії на обігрів РП-10 кВ закритого типу.

Усі ці додаткові витрати, за думкою авторів, треба розраховувати наступними методами. Витрати електроенергії на вентиляцію напів-

провідникового агрегату – за методом встановленої потужності та коефіцієнта використання:

$$W_{\text{вент}} = P_{\text{вент}} \cdot k_{\text{в}}, \quad (1)$$

де:

$W_{\text{вент}}$ - витрати електроенергії на вентиляцію, кВт·год;

$P_{\text{вент}}$ - встановлена потужність електродвигунів вентиляції агрегату, кВт;

$k_{\text{в}}$ - коефіцієнт використання встановленої потужності, у даному випадку дорівнює 1, тому що двигуни вентиляції працюють цілодобово на протязі року на повну потужність.

Витрати електроенергії на обігрів приміщень РП-10 та 6 кВ треба розраховувати залежно від площі приміщення з урахуванням норм питомих витрат на обігрів приміщення ЗРП:

$$W_0 = A_{\text{пит2}} \cdot F, \quad (2)$$

де:

W_0 – витрати електроенергії на обігрів приміщень, кВт·год;

$A_{\text{пит2}}$ – норма питомих витрат на обігрів ЗРП, тис.кВт·год/м² за рік;

F – площа приміщень ЗРП.

Для прикладу проведемо розрахунок витрат електроенергії на власні потреби для реальної тягової підстанції Зелений Клин-110 Краснолиманської дистанції електропостачання Донецької залізниці згідно [1].

Обчислення нормативних витрат електроенергії на власні потреби тягової підстанції Зелений Клин-110 кВ Краснолиманської дистанції електропостачання Донецької залізниці

На тяговій підстанції Зелений Клин-110/35/10 кВ встановлено таке устаткування:

- трансформатори: типу ТДТН-40000-110/35/10 – 2 шт., типу ТМРУ-16000 – 2 шт.;

- вимикачі: типу МКП-110 – 3 шт., типу МКП-35 – 4 шт.;

- роз'єднувачі 110 кВ типу РЛНД3-110 – 10 шт.;

- відділювачі 110 кВ – 2 шт., короткозамки 110 кВ – 2 шт.;

- трансформатори власних потреб типу ТМ-320/10 – 1 шт., ТМ-250/10 – 1 шт.;

- розміри ОПК – 170 м² (площа виробничих та побутових приміщень будівлі двоповерхової тягової підстанції, де підтримується температура повітря +18...+21 °С), складаються з наступних складових:

– площа щитового приміщення – 78 м²;

– площа кабінету начальника підстанції – 7 м²;

– площа кімнати для харчування – 2.5 м²;

– приміщення для прання спецодягу – 10 м²;

– майстерня – 6 м²;

– приміщення для проведення занять та планування робіт – 15 м²;

– приміщення акумуляторної батареї – 22.5 м²;

– приміщення роздягальні та душової кімнати – 29 м²;

- площа ЗРП – 270 м², яка складається з площі РП-3,3 кВ – 175 м² та площі ЗРП-10 кВ – 95 м²;

- оперативний струм – постійний. Відповідно до розділу 7 [1] обчислюють складові значень нормативних витрат електроенергії на власні потреби підстанції:

Значення складових норм загальнопідстанційних витрат електроенергії приймають згідно з табл. А.1 додатку А:

- на обігрів, вентиляцію і освітлення приміщень ОПК:

$A_{\text{пит1}} \cdot F = 0.143 \cdot 170 = 24.31$ тис. кВт·год за рік;

- на зовнішнє освітлення – 3.0 тис. кВт·год за рік;

- інші витрати – 2.3 тис. кВт·год за рік.

Результати обчислення значень електроенергії $A_{\text{ЗП}}$ на місяці розрахункового періоду згідно з пунктом 7.1.2 цієї Інструкції подані у табл. 1.

Складові значень нормативних витрат електроенергії на охолодження трансформаторів типу ТДТН-40000-110/35/10 за рік обчислюють за формулами (2) і (1) [1], відповідно:

- трансформаторів з системою охолодження Д:

$A_{\text{Д}} = (7 \cdot 2 + 0.28 \cdot 2 \cdot 40) = 36.4$ тис. кВт·год за рік.

Результати обчислення значень нормативних витрат електроенергії на охолодження трансформаторів підстанції на

місяці розрахункового періоду подані у таблиці 2.

Таблиця 1

Нормативні значення загальнопідстанційних витрат електроенергії на місяці розрахункового періоду

Назва розрахункового періоду	Значення складових нормативних загальнопідстанційних витрат електроенергії, тис. кВт·год				Значення нормативних загальнопідстанційних витрат електроенергії, тис. кВт·год
	На обігрів, вентиляцію, освітлення приміщень ОПК	На обігрів ЗРП	На зовнішнє освітлення	Інші витрати електроенергії	
Січень	4.6189	1.026	0.36	0.196	6.2009
Лютий	4.18132	0.9288	0.33	0.177	5.61712
Березень	4.6189	1.026	0.3	0.196	6.1409
Квітень	0.89947	0.1998	0.21	0.189	1.49827
Травень	0	0	0.15	0.196	0.346
Червень	0	0	0.15	0.189	0.339
Липень	0	0	0.15	0.196	0.346
Серпень	0	0	0.15	0.196	0.346
Вересень	0	0	0.18	0.189	0.369
Жовтень	0.89947	0.1998	0.3	0.196	1.59527
Листопад	4.47304	0.9936	0.36	0.189	6.01564
Грудень	4.6189	1.026	0.36	0.196	6.2009
Рік	24.31	5.4	3	2.305	35.015

Таблиця 2

Значення нормативних витрат електроенергії на охолодження трансформаторів підстанції на місяці розрахункового періоду

Назва розрахункового періоду	Значення нормативних витрат електроенергії на охолодження трансформаторів, тис. кВт·год
Січень	3.094
Лютий	2.8028
Березень	3.094
Квітень	2.9848
Травень	3.094
Червень	2.9848
Липень	3.094
Серпень	3.094
Вересень	2.9848
Жовтень	3.094
Листопад	2.9848
Грудень	3.094
Рік	36.4

Складові значень нормативних витрат електроенергії на обігрів устаткування обчислюють за підрозділом 7.4 [1]:

- вимикачів 110 кВ дорівнює добутку норми витрат електроенергії за табл. А.2 додатку А на кількість вимикачів (3 шт.):

$$5.66 \cdot 3 = 16.98 \text{ тис. кВт·год за рік;}$$

- вимикачів 35 кВ дорівнює добутку норми витрат електроенергії за табл. А.2 додатку А на кількість вимикачів (4 шт.);

$$0.02 \cdot 4 = 0.08 \text{ тис. кВт·год за рік;}$$

- обігрів приводів відділювачів і короткозамикачів (4 шт.) прийнято згідно з нормою за пунктом 7.4.4 [1]:

$$4 \cdot 1.1 = 4.4 \text{ тис. кВт·год за рік.}$$

Результати обчислення значень нормативних витрат електроенергії на обігрів устаткування A_0 на місяці розрахункового періоду згідно з пунктом 7.4.7 [1] подані у табл. 3.

Значення складових норм витрат електроенергії на системи керування підстанцією приймають згідно з табл. А.6 додатку А:

Таблиця 3

Значення нормативних витрат електроенергії на обігрів устаткування на місяці розрахункового періоду

Назва розрахункового періоду	Значення нормативних витрат електроенергії на обігрів устаткування, тис. кВт·год
Січень	5.49376
Лютий	4.9358
Березень	0.2146
Квітень	0
Травень	0
Червень	0
Липень	0
Серпень	0
Вересень	0
Жовтень	0.17168
Листопад	5.1504
Грудень	5.49376
Рік	21.46

- на зарядно-підзарядні пристрої – 16.5 тис. кВт·год за рік;

- на вентиляцію приміщення акумуляторної – 8.4 тис. кВт·год за рік;

- на апаратуру зв'язку і телемеханіки – 8.7 тис. кВт·год за рік.

Результати обчислення значень нормативних витрат електроенергії на системи керування підстанцією $A_{\text{КЕР}}$ на місяці розрахункового періоду згідно з пунктом 7.7.3 цієї Інструкції подані у табл. 4.

Розрахунок втрат електроенергії в трансформаторах власних потреб за рік:

Вихідні дані для розрахунку втрат у трансформаторах власних потреб приведені в табл. 5. Припустимо, що в роботі був тільки трансформатор ТМ-320.

Втрати у ТВП обчислюються наступним чином. За формулами (9)...(11) обчислюється фактична потужність трансформатора по даним фактичного споживання активної та реактивної електроенергії за розрахунковий період.

$$P_{\Phi} = \frac{546200}{8760} = 62.35 \text{ кВт}$$

$$Q_{\Phi} = \frac{600000}{8760} = 68.49 \text{ квар}$$

Таблиця 4

Значення нормативних витрат електроенергії на системи керування підстанцією на місяці розрахункового періоду

Назва розрахункового періоду	Значення нормативних витрат електроенергії на системи керування підстанцією, тис. кВт·год
Січень	2.856
Лютий	2.5872
Березень	2.856
Квітень	2.7552
Травень	2.856
Червень	2.7552
Липень	2.856
Серпень	2.856
Вересень	2.7552
Жовтень	2.856
Листопад	2.7552
Грудень	2.856
Рік	33.6

Таблиця 5

Вихідні дані для розрахунку втрат у трансформаторах власних потреб

$S_{\text{н}}$, кВА	$P_{\text{хх}}$, кВт	$P_{\text{кз}}$, кВт	WP_{Φ} , кВт·год	WQ_{Φ} , квар·год	$T_{\text{н}}$, год	$T_{\text{р}}$, год
320	1.9	6.2	45520	50000	720	720

$$S_{\Phi} = \sqrt{62.35^2 + 68.49^2} = 92.62 \text{ кВА}$$

За формулою (12) обчислюється коефіцієнт завантаження трансформатору:

$$k_3 = \frac{92.62}{320} = 0.29$$

Втрати активної електроенергії в ТВП за рік обчислюються за формулою (13):

$$\Delta A_{\text{ТрВПС}} = 1.9 \times 8760 + 0.29^2 \times 6.2 \times 8760 = 21290 \text{ кВт·год} = 21.29 \text{ тис. кВт·год}$$

Результати обчислення втрат в ТВП на місяці розрахункового періоду наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Значення нормативних втрат електроенергії в трансформаторі власних потреб

Назва розрахункового періоду	Значення нормативних втрат електроенергії в трансформаторі власних потреб, тис. кВт·год
Січень	1.810
Лютий	1.639
Березень	1.810
Квітень	1.746
Травень	1.810
Червень	1.746
Липень	1.810
Серпень	1.810
Вересень	1.746
Жовтень	1.810
Листопад	1.746
Грудень	1.810
Рік	21.29

Витрати на вентиляцію НПА:

Для вентиляції на тяговій підстанції Зелений Клин на кожний агрегат встановлені елект-

родвигуни потужністю 5.5 кВт. Один ПВА та його вентиляція працюють цілодобово. Таким чином, витрати на вентиляцію НПА складають:

$$5.5 \cdot 24 \cdot 364 = 48.048 \text{ тис. кВт}\cdot\text{год за рік};$$

$$48.048 / 12 = 4.004 \text{ тис. кВт}\cdot\text{год за місяць}.$$

Результати обчислення значень нормативних витрат електроенергії на власні потреби підстанції на місяці (квартали) розрахункового періоду подані у таблиці 7.

Також при визначенні втрат в трансформаторах власних потреб за методикою [2], якщо прилади обліку встановлені з низької сторони трансформаторів власних потреб, трапляються випадки, при яких помилково не враховують навантаження фідерів СЦБ. Для пояснення наведено типову схему живлення фідерів СЦБ – рис. 2.

На рисунку, безперечно, видно, що при такій схемі обліку в розрахунок втрат в трансформаторах власних потреб необхідно включати електроенергію, спожиту споживачами СЦБ.

Після врахування цього пункту розрахунок проводять згідно [2].

Таблиця 7

Значення нормативних витрат електроенергії на власні потреби підстанції на місяці (квартали) розрахункового періоду

Назва розрахункового періоду	Значення складових нормативних витрат електроенергії на власні потреби, тис. кВт·год						Значення нормативних витрат електроенергії, тис. кВт·год
	$A_{ЗП}$	$A_{Д}$	$A_{О}$	$A_{КЕР}$	$A_{НПА}$	$\Delta A_{ГРВП\Sigma}$	$A_{ВПС}$
Січень	6.2009	3.094	5.494	2.856	4.097	1.81	23.5519
Лютий	5.61712	2.8028	4.936	2.587	3.711	1.639	21.29292
Березень	6.1409	3.094	0.215	2.856	4.097	1.81	18.2129
<i>I квартал</i>	<i>17.95892</i>	<i>8.991</i>	<i>10.644</i>	<i>8.299</i>	<i>11.905</i>	<i>5.259</i>	<i>63.05692</i>
Квітень	1.49827	2.9848	0	2.755	3.952	1.746	12.93607
Травень	0.346	3.094	0	2.856	4.097	1.81	12.203
Червень	0.339	2.9848	0	2.755	3.952	1.746	11.7768
<i>II квартал</i>	<i>2.18327</i>	<i>9.064</i>	<i>0</i>	<i>8.366</i>	<i>12.002</i>	<i>5.301</i>	<i>36.91627</i>
Липень	0.346	3.094	0	2.856	4.097	1.81	12.203
Серпень	0.346	3.094	0	2.856	4.097	1.81	12.203
Вересень	0.369	2.9848	0	2.755	3.952	1.746	11.8068
<i>III квартал</i>	<i>1.061</i>	<i>9.173</i>	<i>0</i>	<i>8.467</i>	<i>12.146</i>	<i>5.365</i>	<i>36.212</i>
Жовтень	1.59527	3.094	0.172	2.856	4.097	1.81	13.62427
Листопад	6.01564	2.9848	5.15	2.755	3.952	1.746	22.60344
Грудень	6.2009	3.094	5.494	2.856	4.097	1.81	23.5519
<i>IV квартал</i>	<i>13.81181</i>	<i>9.173</i>	<i>10.816</i>	<i>8.467</i>	<i>12.146</i>	<i>5.365</i>	<i>59.77881</i>
Рік	35.015	36.4	21.46	33.6	48.2	21.29	195.964

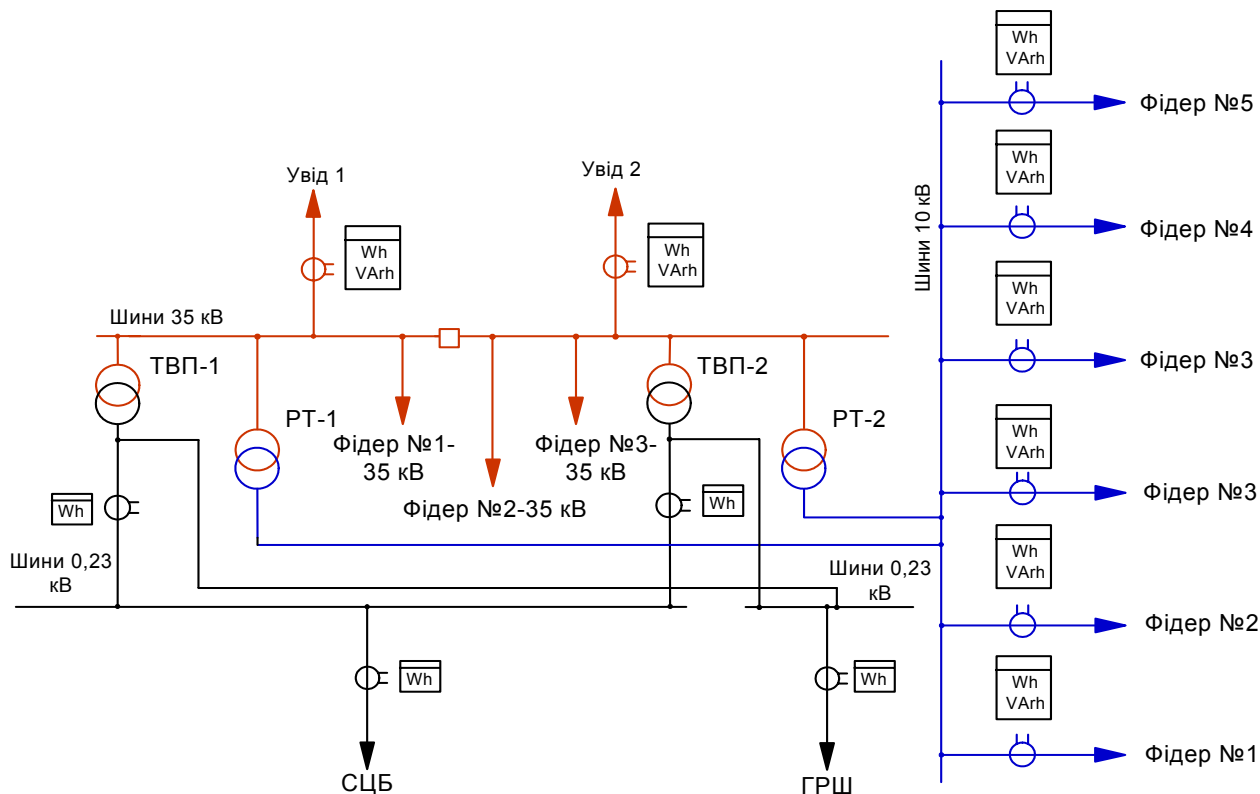


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення втрат у трансформаторах власних потреб

Висновки

1. Запропонована методика визначення витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій постійного струму.
2. Доведено, що при розрахунку втрат в трансформаторах власних потреб тягових підстанцій треба враховувати електроенергію, спожиту споживачами СЦБ.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Інструкція «Нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 35-750 кВ та розподільчих пунктів 6-10 кВ». –

К.: Міністерство палива та енергетики України, 2004.

2. Методика по визначенню втрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередач. – К.: Міністерство енергетики України, 1998. – 40 с.
3. Железко Ю. С. и др. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 278 с.
4. <http://www.necin.gov.ua/index.htm>. Матеріали офіційного сайту Національного агентства України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів.

Надійшла до редколегії 21.01.2008.

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ З РЕМОНТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТЕХНІКИ

Розглянуті шляхи підвищення коефіцієнту корисної дії електроприводів устаткування підприємств з ремонту залізничної техніки з урахуванням специфічних умов технологічних процесів.

Рассмотрены методы повышения коэффициента полезного действия электроприводов установок на предприятиях по ремонту железнодорожной техники с учетом специфических условий технологических процессов.

In this article the following problem has been considered: ways of efficiency increase for electric drives installed at the railway machinery repair enterprises taking into account the specific conditions of technological processes.

Енергозбереження як діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів – державна проблема.

Серед споживачів електричної енергії значну частку складають електродвигуни різного призначення, що споживають суттєву частку виробленої енергії. Загальна встановлена потужність асинхронних двигунів (АД) в Україні складає близько 40..50 млн кВт, у СНД – приблизно 550 млн кВт.

Значна кількість електроприводів встановлена на механізмах, які використовуються на підприємствах з ремонту залізничної техніки.

Більшість механізмів вказаних підприємств є типовими загальнопромисловими, а технологічні процеси в депо, на ремонтних заводах мають такий характер, при якому робота електроприводу відбувається у недовантаженому стані. Робота приводу у недовантаженому режимі призводить до величезних втрат.

Тому розробка рекомендацій з енергозбереження на підприємствах з ремонту залізничної техніки засобами електропривода є актуальною задачею.

Розглянемо енергетичні характеристики нерегульованого електроприводу токарних верстатів, в якому використовуються асинхронні двигуни.

Електромеханічні перетворювачі на базі нерегульованих асинхронних двигунів найбільш поширені у теперішній час на підприємствах з ремонту залізничної техніки.

Втрати потужності ΔP в електричній машині (ЕМ) поділяються на постійні K та змінні V :

$$\Delta P = K + V. \quad (1)$$

Постійні втрати в АД складаються з механічних – p_m , втрат у сталі статора p_{c1} і ротору p_{c2} , а також втрат у міді обмотки статора від протікання струму намагнічування I_μ :

$$K = p_m + p_{c1} + p_{c2} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1, \quad (2)$$

де 3 – кількість фаз АД;

r_1 – активний опір однієї фази обмотки статора;

I_μ – реактивна складова струму статора (струм намагнічування).

Змінні втрати в АД складаються з втрат в обмотках статора $p_{ел1}$ і ротору $p_{ел2}$ за винятком втрат від струму намагнічування:

$$\begin{aligned} V &= p_{ел1} + p_{ел2} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2' = \\ &= 3 \cdot I_2^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де I_2' , r_2' – струм і опір ротору, приведені до обмотки статора;

$$\sigma = \frac{I_2'}{I_1}. \quad (4)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} V &= 3 \cdot I_{2ном}^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_{ном}^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I_{2ном}} \right)^2 = \\ &= V_{ном} \left(\frac{I_2'}{I_{2ном}} \right)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

$$V_{ном} = 3 \cdot I_{2ном}^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_{ном}^2} \right), \quad (6)$$

де $V_{\text{НОМ}}$ – номінальні змінні втрати;

$$\sigma_{\text{НОМ}} = \frac{I'_{2\text{НОМ}}}{I_{1\text{НОМ}}} = 0.85 \dots 0.95.$$

Якщо позначити кратність струму (кратність навантаження) двигуна $\frac{I'_2}{I'_{2\text{НОМ}}}$ через X , то змінні втрати потужності можна записати:

$$V = V_{\text{НОМ}} \cdot X^2. \quad (7)$$

Повні втрати потужності в електромеханічному перетворювачі:

$$\Delta P = K + V_{\text{НОМ}} \cdot X^2 = V_{\text{НОМ}} (a + X^2), \quad (8)$$

де $a = \frac{K}{V_{\text{НОМ}}}$ – коефіцієнт втрат (для двигунів нормального виконання залежно від потужності і швидкості $a = 0.5 \dots 2$).

Втрати потужності і номінальному режимі ($X = 1$) визначаються за паспортними даними:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}}. \quad (9)$$

Постійні страти потужності:

$$K = \Delta P_{\text{НОМ}} - V_{\text{НОМ}}. \quad (10)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) електричного двигуна є відношенням повної механічної потужності на його валу до потужності, яка споживається двигуном із мережі. Приймаємо, що при роботі на природній характеристиці:

$$X = \left(\frac{I}{I_{\text{НОМ}}} \right) = \left(\frac{P}{P_{\text{НОМ}}} \right),$$

тоді ККД:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{НОМ}}} = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{X}{X + \left(\frac{V_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}} \right) (a + X^2)}, \quad (11)$$

Якщо при аналізі роботи АД, виявиться, що двигун, встановлений при виготовленні установок у конкретному технологічному процесі, є мало завантаженим, то доцільно зробити його заміну на двигун меншої потужності з метою забезпечення більш повного навантаження останнього.

Однією з причин недовантаження електроприводів металорізальних верстатів є велика різноманітність робіт, які виконуються в умовах дрібносерійного та індивідуального виробництва, характерного для підприємств з ремонту залізничної техніки, що приводить до значних витрат часу на допоміжні операції, коли двигуни відключені або працюють в режимі неробочого ходу. До таких допоміжних операцій відносяться вимірювання розмірів деталей, відвід, підвід та заміна інструменту і заготовки.

Таким чином, верстат у свої робочі періоди споживає певну середню потужність, яка менше номінальної. Завантаження електроприводів верстату враховують за допомогою коефіцієнту завантаження k_3 , який являє собою відношення середньої потужності до $P_{\text{НОМ}}$:

$$k_3 = \left(\frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{НОМ}}} \right).$$

Роботу електроприводу верстата у часі враховують коефіцієнтом включення k_B , який визначається як відношення сумарного часу роботи електроприводу верстата $\sum t_p$ за зміну до загального часу зміни, який визначається сумою робочого часу та сумарного часу простою електроприводу $\sum t_0$:

$$k_B = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + \sum t_0}.$$

Добуток коефіцієнту завантаження на коефіцієнт включення називають коефіцієнтом використання електродвигуна верстата $k_{\text{вик}}$:

$$k_{\text{вик}} = k_3 \cdot k_B = \frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{\sum t_p}{\sum t_p + \sum t_0} = \frac{W_{\text{роб}}}{W_{\text{НОМ}}},$$

де $W_{\text{роб}}$ – механічна енергія, яка фактично віддається електродвигуном;

$W_{\text{НОМ}}$ – енергія, яка була б віддана у випадку безперервної роботи електродвигуна з номінальною потужністю.

Значення коефіцієнтів завантаження, включення та використання на машинобудівних підприємствах не перевищують наступних значень:

$$k_3 = 0.2 \dots 0.26;$$

$$k_B = 0.56 \dots 0.57;$$

$$k_{\text{вик}} = 0.12 \dots 0.17.$$

Для ремонтних підприємств, якими є підприємства з ремонту залізничної техніки, вказані коефіцієнти мають ще менші значення.

Такі низькі значення експлуатаційних коефіцієнтів говорять про низькі завантаження електроприводів верстатів і великі витрати часу на простої і допоміжні операції.

Велике недовантаження електродвигунів металорізальних верстатів погіршує енергетичні показники, знижує коефіцієнт корисної дії верстату, збільшуючи невиробничі витрати електроенергії та знижуючи коефіцієнт потужності $\cos\phi$ установки.

Якщо мати на увазі токарні верстати, які використовуються при виготовленні деталей (болти, валики і т.п.) для ремонту залізничної техніки, то пропонується виділити окремі верстати для виготовлення деталей певного діаметру.

Ідея запропонувати заміну малонавантаженого двигуна на двигун меншої потужності виходить з того, що на заводах-виготовлювачах найчастіше встановлюються двигуни, розраховані на виготовлення деталей із найбільшим діаметром, але при виготовленні деталі із меншим діаметром ці двигуни виявляються малонавантаженими.

Досвід вказує, що на вказаних підприємствах на токарних верстатах в основному виготовлюють деталі з діаметром 10...50 мм.

Проведені з вищевикладеного дослідження показують, що якщо для виготовлення деталей з діаметром 50...36 мм застосувати двигун АИР90L2 потужністю 3 кВт, з діаметром 35...25 мм – двигун АИР80А2 потужністю 2.2 кВт, з діаметром 24...10 мм – двигун АИР80А2 потужністю 1.5 кВт, то економія електроенергії складає до 5% в порівнянні з варіантом, коли для виготовлення деталей у всьому інтервалі значень діаметрів 50...10 мм використовується тільки двигун АИР90L2.

Висновок: проведені дослідження показують, що заміна недовантажених електродвигунів токарних верстатів на підприємствах з ремонту залізничної техніки на двигуни меншої потужності дає економію електроенергії до 5%.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Капунцов Ю. Д. и др. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. – М.: Высш. школа, 1979. – 359 с.
2. Мамалыга В. М. Энергосбережение в системах электропривода. – К.: Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 86 с.
3. Маренич О. О. Шляхи електрозберігання на підприємствах залізничного транспорту засобами електроприводу: Магістерська дипл. робота. – Д.: ДНУЗТ, 2008.

Надійшла до редколегії 26.03.2008.

ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИСТРОЇВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ З РЕМОНТУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТЕХНІКИ

Розглянуті шляхи підвищення коефіцієнта потужності електроприводів устаткування підприємств з ремонту залізничної техніки з урахуванням специфічних умов технологічних процесів.

Рассмотрены методы повышения коэффициента мощности электроприводов установок на предприятиях по ремонту железнодорожной техники с учетом специфических условий технологических процессов.

In this article the following problem has been considered: ways of power factor increase for electric drives installed at the railway machinery repair enterprises with taking into account the specific conditions of technological processes.

В локомотивних, вагонних депо та інших підприємствах з ремонту залізничної техніки застосовуються електроприводи, в яких використовуються в основному трифазні асинхронні двигуни (АД) потужністю 2...5 кВт (токарні верстати, тельфери і т.п.). Розглянемо підвищення коефіцієнта потужності двигунів токарних верстатів, з урахуванням специфічних умов їх експлуатації на вказаних підприємствах.

Однією з причин недовантаження двигунів є велика різноманітність робіт, які виконуються в умовах дрібносерійного та індивідуального виробництва, характерного для технологічного процесу виготовлення деталей на токарних верстатах цих підприємств. Двигун верстату у своїй робочій періоді споживає певну середню потужність, яка менше номінальної.

Реально для підвищення коефіцієнта потужності при роботі верстату доцільно застосовувати обмеження неробочого ходу (НХ) асинхронного двигуна. Інші шляхи викликають значні витрати на додаткове обладнання.

Принцип дії одного з варіантів такого вимикача, запропонованого авторами, можна пояснити за допомогою електричної схеми (рис. 1), в якій використане реле часу.

Для пуску двигуна змикається автоматичний вимикач QF та натискається кнопка пуску $SB1$. При цьому отримує живлення котушка KM магнітного пускача, який вмикається та своїми головними контактами у колі статора підключає двигун до мережі живлення, а допоміжним контактом KM , включеним послідовно з нормально замкненим контактом KT реле часу, шунтує кнопку $SB1$. При цьому маємо на увазі, що пуск двигуна відбувається у режимі НХ. При замиканні головних контактів KM через котуш-

ку KC , по реле струму проходить струм НХ, який невеликий відносно номінального струму двигуна і при якому реле KC не спрацьовує. Через нормально замкнений контакт KC котушка реле часу KT отримує живлення і реле KT починає відраховувати час паузи t_n , тобто час, який вважається допустимим для роботи двигуна в режимі НХ.

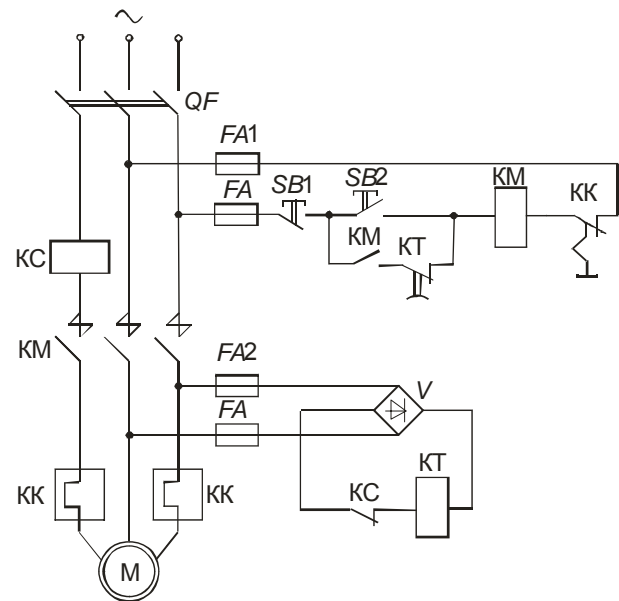


Рис. 1. Схема обмежувача неробочого ходу з використанням реле часу

Звернемо увагу, що t_n – це час витримки реле KT . Якщо навантаження двигуна, тобто процес різання, почався за час $t < t_n$, то струм у силовому колі двигуна збільшується, реле струму KC спрацьовує і розмикає свій контакт у колі котушки KT . Тобто реле KT знеструмлюється, його контакт KT у колі котушки KM залишається замкненим, головні контакти KM

залишаються замкненими, двигун отримує живлення від мережі.

Якщо за час $t > t_n$ навантаження двигуна з якоїсь причини не відбулося, реле часу KT через час $t > t_n$ спрацює, розриває свій контакт KT у колі котушки KM , двигун знеструмлюється.

Коло котушки KT (випрямляч V , сама котушка KT , запобіжники $FA2$) підключені до джерела живлення таким чином, що це коло отримує живлення тільки після замикання головних контактів KM . Якщо коло котушки KT підключити до мережі перед головними контактами KM , то після ввіткнення автомату QF і при не натисненні кнопки SBI протягом часу $t > t_n$, реле KT спрацює, розімкне свій контакт KT у колі котушки KM ще до моменту натиснення

кнопки. Тому після натиснення кнопки SBI у цьому випадку двигун не запуститься.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Мамалыга В. М. Энергосбережение в системах электропривода. – К.: Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 86 с.
2. ДСТУ 3886-99. Системи електроприводу. Метод аналізу та вибору. – К.: Держстандарт України, 2000. – 14 с.
3. Маренич О. О. Шляхи електрозберігання на підприємствах залізничного транспорту засобами електроприводу: Магістерська дипл. робота. – Д.: ДНУЗТ, 2008.

Надійшла до редколегії 26.03.2008.

А. И. ТЮРЮТИКОВ (Институт общей энергетики НАН Украины)

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С АНАЛИЗОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

У статті розглянуті проблемні питання створення системи моніторингу електричних мереж з урахуванням якості електричної енергії.

В статье рассмотрены проблемные вопросы создания системы мониторинга электрических сетей с учетом качества электрической энергии.

The problems of creation of monitoring system for electrical networks taking into account the quality of electric energy are considered in this article.

Введение

Актуальность бесперебойного снабжения электроэнергией промышленных и бытовых потребителей не требует обоснования, так как электроэнергия является кровеносной артерией всех потребителей. Актуальными являются задачи: а) поддержания работоспособного состояния энергосистемы, б) максимально возможная ее модернизации до уровня мировых (желательно и превосходящих) стандартов в минимально возможные сроки.

Данные задачи необходимо решать как на уровне генерирующих, так и на уровне распределительных (Облэнерго) компаний. Главной целью выполнения работ в Облэнерго является обеспечение надежного покрытия платежеспособного спроса потребителей при минимальных затратах ресурсов и максимизации прибыли.

Цели и задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить три основные, взаимосвязанные задачи, решение которых необходимо вести параллельно и согласованно:

1. Создание и внедрение технологии управления производственно-финансовой деятельностью, соответствующего программного и информационного обеспечения (ПИО), средств телемеханики и связи, включая решение крайне актуальной в настоящее время проблемы биллинга.

2. Разработка необходимого методического обеспечения, инструкций и регламентов, критериев принятия решений, обеспечивающих согласованную работу эксплуатационного, технического и управленческого персонала в рам-

ках технологии управления производственно-финансовой деятельностью компании.

3. Обучение персонала.

Одной из характеристик современного периода является значительное увеличение находящихся в эксплуатации электронных устройств: колоссальное количество персональных компьютеров, источников бесперебойного питания и другого электронного оборудования, в котором используются малогабаритные импульсные источники питания. Кроме того, получили широкое распространение такие мощные электронные устройства, как электронные регуляторы скорости, зарядно-выпрямительные устройства и др. Они представляют собой существенно нелинейную электрическую нагрузку и вызывают искажения синусоидальной формы кривых напряжения и тока, что приводит к возникновению гармонических «загрязнений» электрической сети. По этой причине в настоящее время электрические сети практически всех производственных предприятий и офисных зданий в той или иной степени далеки от идеального состояния.

Гармонические «загрязнения» электросетей могут приводить к целому ряду повреждений электротехнического оборудования и к нанесению значительного ущерба технологическим процессам. Основными возможными типами повреждений являются следующие:

1. Сгорание конденсаторов, используемых для улучшения $\cos \varphi$ электросети, а также в электролюминесцентных светильниках.

2. Сгорание нулевых проводов из-за того, что в них суммируются токи всех третьих гармоник, при этом ток нулевого провода может более чем в два раза превысить номинальное значение фазного тока.

3. Перегрев мощных силовых трансформаторов.
4. Перегрев электродвигателей.
5. Искажения электромеханических характеристик электродвигателей.
6. Ложное срабатывание устройств токовой релейной защиты, перегрев предохранителей, ложное срабатывание защиты от токов утечки.
7. Повреждение межобмоточной изоляции в трансформаторах и электродвигателях.
8. Перегрев питающих проводов и электрических кабелей.
9. Недостоверные показания измерительных приборов и некоторых датчиков обратной связи в системах автоматизации технологических процессов.

В ряде случаев при использовании электронных устройств высокой мощности гармоники, возникающие на одном производственном предприятии, могут передаваться к другим предприятиям через общие сети электропитания и именно там причинять вред.

Достоверность измерений и мониторинг электрических сетей

Только цифровые измерительные приборы с применением микропроцессоров способны в этих условиях осуществлять достоверные измерения (True RMS AC) токов, напряжений и мощностей. Для обеспечения надлежащей работы оборудования и предотвращения повреждений необходимо регулярно определять уровень гармоник в сети путем измерения следующих параметров: THD, TDD, K-Factor и гармонического спектра как для постоянно присутствующих гармоник, так и для гармоник с ограниченным временем действия.

Для решения данных задач необходим набор измерительных приборов, позволяющих выполнять измерения гармоник, осуществлять предупредительную сигнализацию, включать фильтры, отключать конденсаторы и осуществлять частичное отключение нагрузок.

Мировые лидеры в области систем мониторинга и управления электроэнергетикой – SIEMENS, ABB и DRANETZ используют для встраивания в поставляемые на рынок системы и подсистемы мониторинга и анализа качества электросетей и управления ресурсами энергоемких предприятий приборы компании SATEC. Данные системы внедрены более чем в 30 странах Центральной и Южной Америки, Европы и Дальнего Востока, в том числе в США, Аргентине, Мексике, Франции, России, Голландии, Испании, Турции, Польше, Филиппинах, Таи-

ланде, Казахстане и др. Производителями подобных систем являются также компании Power Measurement (PML), Circutor, Elontrol, Diris и Autometer.

Использование приборов и систем мониторинга электроэнергии позволяет экономить ресурсы и электроэнергию, прогнозировать аварийные ситуации и предотвращать повреждения дорогостоящего технологического оборудования. В ряде случаев за счет высокоэффективного двухуровневого мониторинга и управления качеством электрических сетей при сохранении потребляемой полезной мощности существенно снижаются расходы на приобретаемую электроэнергию.

Существенный экономический эффект, который обеспечивают системы за счет экономии ресурсов предприятий и увеличения срока безотказной работы дорогостоящего оборудования, приводит к тому, что практически эти системы окупаются в течение года эксплуатации.

Автоматизированные системы контроля и управления электроэнергией (АСКУЭ) позволяют осуществлять оперативный мониторинг, анализ качества электроэнергии и управление энергоресурсами по широкому комплексу параметров. В частности, имеется возможность динамично измерять и корректировать коэффициент мощности путем автоматического подключения конденсаторных батарей и экономить таким образом стоимость потребляемой электрической энергии. Сокращение расходов на электроэнергию достигается также и за счет оптимизации структуры сети путем оперативного отключения ненагруженных трансформаторов и подстанций.

Измерение высших гармоник непосредственно на конденсаторных батареях и в трансформаторах дает возможность при достижении ими опасных значений, которые могут привести к выходу из строя этого оборудования, своевременно автоматически отключать опасные источники от сети или включать защитно-фильтрующие устройства и предотвращать выход оборудования из строя. Такой же эффект достигается и при опасных значениях помех, всплесков и провалов напряжения в сети.

Измерение линейных напряжений и потерь в электрических линиях позволяет оптимизировать эти напряжения в зависимости от длин линий и величин нагрузок, кроме того, учет суточных тарифов электроэнергии позволяет с целью сокращения расходов оптимизировать суточный график подключения нагрузки.

В качестве примера внедрения систем мониторинга остановимся на нескольких областях:

Металлургические комбинаты:

Внедрение программно-аппаратного комплекса для учета энергопотребления на базе многотарифных счетчиков позволило перейти к автоматическому учету расхода электроэнергии комбината и внутризаводских подразделений.

Такой автоматический учет позволяет:

1. Повысить точность определения фактических расходов электроэнергии на 1 и более процентов.
2. Ввести более экономичную многотарифную систему оплаты электроэнергии для общезаводского потребления и крупных нагрузок.
3. Создать условия и все необходимые средства для внедрения системы автоматизированного управления комбинатом, позволяющей управлять включением-отключением различных нагрузок.

В результате внедрения АСКУЭ достигается экономия затрат на потребляемую электроэнергию металлургического комбината за счет указанных факторов, а именно, более точного измерения фактических расходов электроэнергии, использования дешевых тарифов ночных часов и уменьшения потребления в часы периодов пиковой нагрузки.

Промышленная эксплуатация АСКУЭ показала, что внедрение программно-аппаратного комплекса позволило уменьшить затраты комбинатов на электроэнергию более чем на 6 %.

Железные дороги:

Внедрение системы управления конденсаторными батареями по низкому напряжению в зависимости от изменения $\cos \phi$, измеряемого на высокой стороне, позволяет осуществлять мониторинг и анализ качества энергосистемы железной дороги и управление энергоресурсами, коррекцию коэффициента мощности, а также достичь экономии потребляемой электрической энергии за счет оптимизации структуры сети путем оперативного отключения ненагруженных подстанций.

Система позволяет прогнозировать аварийные ситуации, связанные с недопустимыми величинами помех, всплесков и провалов напряжения и гармонических составляющих, а также своевременно предотвращать повреждения дорогостоящего технологического оборудования.

Экономический эффект, обеспечиваемый данной системой, работающей в режиме реального времени, складывается из экономии ресурсов на приобретение электроэнергии и сни-

жения расходов на ремонт дорогостоящего оборудования за счет увеличения срока его безотказной работы. Оперативный анализ результатов мониторинга позволяет заблаговременно планировать и своевременно обновлять оборудование и реконструировать производство.

Как показывает опыт проектирования и внедрения подобных систем, эти системы дают не менее 12...15 % экономии средств, затрачиваемых на оплату электроэнергии, и окупаются в течение года эксплуатации.

Предприятия легкой промышленности, судостроительные заводы и другие предприятия машиностроительной промышленности:

Внедрение систем мониторинга электроэнергии позволит обеспечить:

- централизованный контроль в реальном масштабе времени оперативных параметров распределительной электрической сети, измеряемых в различных стратегически важных точках производства;
- контроль качества электрической энергии, поставляемой потребителям, и ее учет;
- управление энергоресурсами потребителя;
- коррекцию коэффициента мощности и оптимизацию структуры сети путем оперативного отключения ненагруженных подстанций;
- прогнозирование аварийных ситуаций, связанных с недопустимыми величинами помех, всплесков и провалов напряжения и гармонических составляющих;
- оперативное отключение дорогостоящего технологического оборудования при опасности возникновения аварийных ситуаций;
- выделение участков энергосистемы и единиц оборудования, страдающих от чрезмерных потерь;
- своевременное оповещение об авариях в распределительной электрической сети и выходе из строя единиц оборудования;
- анализ динамики потребления каждой отдельной единицей оборудования;
- баланс обмена электрической энергией с другими энергосистемами в реальном масштабе времени.

Возможно также существенное снижение расходов на приобретаемую электроэнергию при сохранении потребляемой полезной мощности.

Необходимо также отметить специфическую область применения систем мониторинга электроэнергии, а именно – предотвращение пожаров.

Большинство пожаров в зданиях различного назначения начинается с возгораний в электро-системах этих зданий: электрошитах, электропроводке и в установках флюоресцентного освещения. В связи с возрастанием в последние годы энергопотребления для промышленных и бытовых целей наблюдается существенное увеличение количества таких пожаров во всем мире.

Исследования, проведенные международной организацией инженеров-электриков IEEE, позволили установить следующие основные причины таких возгораний:

- избыточный ток в нулевом проводе (перегрузка нейтрали);
- сторание конденсаторов во флюоресцентных лампах и в установках для повышения коэффициента мощности;
- перегрев питающих проводов;
- перегрев силовых трансформаторов.

Перечисленные события, являющиеся причинами пожаров, происходят из-за перегрузки компонентов электрооборудования токами и напряжениями основной и высших гармоник, на которые эти компоненты (кабели, конденсаторы) не рассчитаны.

Микропроцессорные приборы мониторинга качества электроэнергии позволяют прогнозировать аварийные ситуации, связанные с указанным влиянием высших гармоник и других факторов в электрических сетях, сигнализировать и отключать дорогостоящее технологическое оборудование при опасности аварийной ситуации.

Такие приборы и системы на их основе могут быть использованы для предотвращения большинства случаев возгораний и пожаров,

связанных с высшими гармониками в электросети и в электрооборудовании.

Выводы

В настоящее время уровень технических и программных средств в электроэнергетике Украины не позволяет организовать эффективную эксплуатацию существующих мощностей, актуальной является задача разработки и внедрения современных средств управления отраслью с использованием подсистем автоматического управления и систем автоматизированного биллинга.

Как одно из звеньев комплексной системы управления отраслью, системы мониторинга электроэнергии, работая в режиме реального времени, дают экономический эффект, который складывается из сокращения расходов на приобретение электроэнергии и расходов на ремонт дорогостоящего оборудования за счет увеличения срока его безотказной работы. Анализ результатов работы системы позволяет заблаговременно спланировать и своевременно обновить оборудование, а также реконструировать производство для обеспечения энергоэкономической эффективности и соблюдения нормированных уровней качества электрической энергии.

Внедрение компьютеризированной автоматической системы управления электросетями позволяет избежать аварийных ситуаций, вызванных неправильными действиями обслуживающего персонала, и резко сократить время ликвидации аварий и восстановления нормального послеаварийного режима.

Поступила в редколлегию 04.03.2008.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВЕЛИЧИНУ МАКСИМАЛЬНОГО НЕБЕЗПЕЧНОГО РОЗМІРУ ШИРИНИ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ

У даній публікації доведено, що при розрахунку максимально небезпечної ширини рейкової колії необхідно враховувати як люфти, так і наявність допусків при виготовленні елементів рейкових скріплень.

В данной публикации доказано, что при расчете максимально опасной ширины рельсовой колеи необходимо учитывать как люфты, так и наличие допусков при изготовлении элементов рельсовых скреплений.

In the given publication it is proved that in calculations of maximum dangerous width of a rail track it is necessary to consider both plays and presence of tolerances at manufacturing the elements of rail fastenings.

Як досліджено авторами роботи [1], максимальне небезпечне значення ширини рейкової колії залежить від наступних факторів:

- конструкції ходових частин рухомого складу, яка оцінюється за допомогою графіків-паспортів бічного впливу коліс на головку рейки;

- величини вертикального колісного навантаження;

- конструкції колії(дерев'яні або залізобетонні шпали, конструкції рейкових скріплень);

- величини та напряму непогашених прискорень, які залежать від улаштування колії в кривих ділянках та стану колії;

- особливостей деформації колісних пар під навантаженням;

- початкових люфтів, які залежать від конструкції скріплень, матеріалу шпал та допусків, які застосовуються при виготовленні частин елементів рейкового скріплення. Наприклад: для нової рейки Р-65, враховуючи допуски по підшві (150^{+1.0}_{-1.5}), допуски по пазу підкладки (151⁺²) та допуск по отворах підкладки (30^{+1.5}_{-0.5}) можна казати про початкові люфти при виготовленні до 3,5 мм [2];

- пропущеного тоннажу по колії, від якого залежить величина люфтів, які виникають за рахунок зносу всіх елементів рейкових скріплень та зносу підшви рейки;

В роботі [1] була отримана узагальнююча формула для визначення величини максимального небезпечно значення ширини рейкової колії з урахуванням усіх перелічених факторів:

$$S_{\max}^{\text{неб}} = W - F \cdot V^2 - \alpha_{\text{нп}} \cdot J,$$

де

$$W = D - E - G,$$

$$D = S_{\max}^{\Phi} - a_2 - a_1 - \varepsilon_{\text{л}},$$

$$E = a_3 [P_{\text{ст}} + 0,75 \cdot \text{Ж}_{\text{рес}} \cdot A],$$

$$G = \frac{a_3 \cdot a_4 \cdot (r_{\text{к}} + r_{\text{ш}})}{S_1},$$

$$F = 0,75 \cdot a_3 \cdot \text{Ж}_{\text{рес}} \cdot B,$$

$$J = M + C.$$

Параметри, які залежать від конструкції рухомого складу, приймаються по графіках-паспортах дій бічних сил (a, b) та рамних сил (a_4, b_4) або визначаються за формулами

$$a_1 = \frac{a}{2500}; b_1 = \frac{b}{2500}; a_2 = 5,75 \cdot a \cdot 10^{-4};$$

$$b_2 = 5,75 \cdot b \cdot 10^{-4}; a_3 = 4,375 \cdot a \cdot 10^{-3}; b_3 = 1,225 \cdot 10^{-4};$$

S_{\max}^{Φ} – постійна складова, яка залежить від типу рухомого складу (для локомотивів $S_{\max}^{\Phi} = 1556$ мм; для вагонів $S_{\max}^{\Phi} = 1557$ мм);

A та B – коефіцієнти для визначення величини прогину ресор екіпажів з одноступінчастим ресорним підвішуванням;

$\text{Ж}_{\text{рес}}$ – приведена до одного колеса жорсткість ресорного комплексу, кг/мм;

$r_{\text{к}}$ – радіус колеса, виміряний по середньому колу кочення, м;

$r_{\text{ш}}$ – радіус шийки осі, м;

S_1 – відстань між осями рейок ($S_1 = 1,585$ м);

M та C – похідні коефіцієнти, які визначаються за формулами.

Формула отримана згідно розрахункової схеми, яка наведена на рис. 1.

Таблиця 1 (продовження)

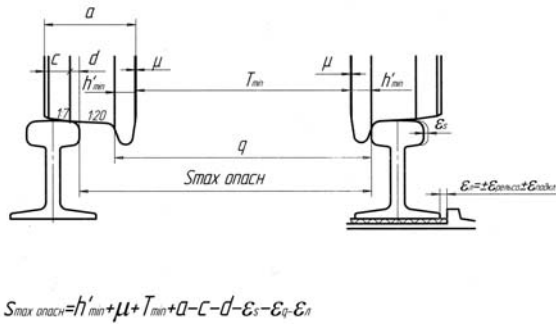


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення максимальної небезпечної ширини рейкової колії

Результати розрахунків наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Величина небезпечної ширини рейкової колії при *max* та *min* швидкостях руху

Тип локомотива вагона	$S_{\text{небезпечmax}}$, мм (при V_{max})	$S_{\text{небезпечmin}}$, мм (при V_{min})
1	2	3
4-х осний вантажний вагон на візках (ЦНИИ-Х-3)	1547.19	1546.83
4-х осний вантажний вагон на візках (ЦНИИ-Х-3-0)	1546.61	1546.33
6-ти осний вантажний вагон без розбігу осей (КВЗ-1М)	1548.14	1547.85

1	2	3
6-ти осний вантажний вагон з розбігом осей (УВЗ-9-М)	1544.81	1543.33
пасажирський вагон (ЦМВ)	1550.88	1549.48
пасажирський вагон на візках (КВЗ-ЦНИИ)	1550.73	1549.33
ВЛ-80	1547.40	1546.35
ВЛ-60	1547.90	1546.80
ТЭП-60	1548.92	1548.37

Для остаточного визначення прогнозної оцінки максимальної небезпечної величини ширини рейкової колії необхідно визначити закони розподілу випадкової величини люфту при напрацюванні пропущеного тоннажу від початку експлуатації конструкції ($T = 0$) до нормативного значення ($T = T_{\text{норм}}$).

Таким чином очікуємо отримати дві прогнозні оцінки для $T_1 = 0.5T_{\text{норм}}$ та $T_2 = T_{\text{норм}}$, тобто для першої половини терміну експлуатації та другої половини, залежно від конструкції колії та рухомого складу, який експлуатується на даній ділянці.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Белорусов О. І. Визначення небезпечного максимального розміру ширини рейкової колії / О. І. Белорусов, В. В. Новіков // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2006. – С.137-141.
2. Яковлев В. О. Практичні рекомендації щодо проведення вхідного контролю матеріалів верхньої будови колії / В. О. Яковлев, К. В. Мойсенко, В. В. Говоруха та ін. – Д.: Дніпроп. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Арт-Прес, 2003. – 196 с.

Надійшла до редколегії 17.12.2007.

НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ ҐРУНТОУЩІЛЬНЮЮЧИХ МАШИН І ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ БУДОВИ КОЛІЇ

Наведені напрямки поєднання робочих органів ґрунтоущільнюючих машин і технологій їх застосування для прискорення ефективного ущільнення ґрунту основи колії.

Приведены направления объединения рабочих органов ґрунтоуплотняющих машин и технологий их применения для ускорения эффективного уплотнения ґрунта основания пути.

The directions of combining the working members of soil-compressing machines and technologies of their application for speeding up the effective compression of soil in the foundation of track are presented.

Постановка проблеми. Ґрунтоущільнюючі машини (ГУМ), що використовуються на сучасному рівні будівництва чи реконструкції будови колії, здебільшого мають робочі органи (РО) традиційного типу з простим чи рельєфним профілем робочої поверхні. Як правило, такі РО мають віброконтур з постійним вектором вібрації і регульованою змушуючою силою, що інтенсифікує ущільнення ґрунту.

Технологічно ГУМ застосовуються у традиційній послідовності (легкі, середні, важкі ГУМ) по мірі ущільнення ґрунту та у залежності від його фізико-механічних властивостей (для незв'язних чи слабкозв'язних ґрунтів – ГУМ вібраційної дії; для зв'язних – ГУМ статичної, віброударної і ударної дії).

При роботі таких ГУМ їх РО обмежені у своїй силовій дії на ґрунт його фізико-механічними властивостями і здатністю вислизати з-під РО при невиконанні умов балансу робочих напружень на межі контакту «РО – ґрунт» та міцності ґрунту.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження питань, що зазначені вище, знайшло своє відображення в ряді робіт [1 – 8]. Але вивчення питань, пов'язаних зі зміною профілю робочої поверхні РО ГУМ, вектором змушуючої сили і її величиною, раціональним поєднанням у одній ГУМ РО різних типів, та створенням умов для інтенсифікації ущільнення ґрунту є актуальним, оскільки безпосередньо пов'язане з підвищенням продуктивності роботи ГУМ, їх ефективним використанням і економією енергоресурсів.

Мета роботи – обґрунтування умов прискореного ущільнення ґрунту шляхом блокування його розсування з-під РО ГУМ під час прискоро-

реного ущільнення, та зменшення кількості ГУМ у технологічному процесі.

Основний матеріал. Досягнення поставленої мети забезпечується наступною послідовністю викладення матеріалу: встановлення критеріїв вибору параметрів РО ГУМ і оцінки результатів досліджень; пропозиції щодо принципів рішень РО і ГУМ; схеми РО і ГУМ; ескізи технічних рішень РО ГУМ і ГУМ; висновки і напрямки подальших досліджень.

При знаходженні раціональних і оптимальних рішень враховані критерії: максимальна продуктивність при максимальному об'ємі щільної зони ґрунту, названої ядром ущільнення (ЯУ); оптимальна витрата енергоносіїв; мінімум вартості робіт у межах заданого часу при обмеженнях: за потужністю двигуна; за швидкістю пересування на заданій ділянці ущільнення; за габаритними розмірами РО ГУМ.

Для ефективного виконання процесу ущільнення ґрунту необхідно, щоб РО ГУМ (коток, плита) адаптувалися до необхідних технологічних умов виконання робіт, а саме оперативно змінювали свою масу, розміри, профіль поверхні для того, щоб ефективність ущільнення ґрунту за один прохід РО була максимально можливою для ґрунту у даному його стані. Таким чином, конструкцію РО ГУМ з гладенькою поверхнею можна взяти за основу для порівняння і на цій основі поділити її на складові у вигляді, наприклад, набірною РО з дисків, секцій і т.ін., що мають різний профіль, а також закласти у конструкцію РО з еластичним каркасом можливість зміни внутрішнього тиску у кожному елементі або його жорсткості. Залежно від розміру елементів РО порівняно з шириною ущільнюваної смуги ґрунту їх можна використовувати як самостійні РО, так і об'єдна-

вши декілька елементів у один РО. Схеми варіантів виконання таких РО і можливі форми ЯУ показані на рис. 1 та наведені у табл. 1.

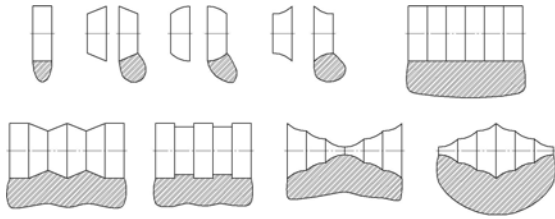


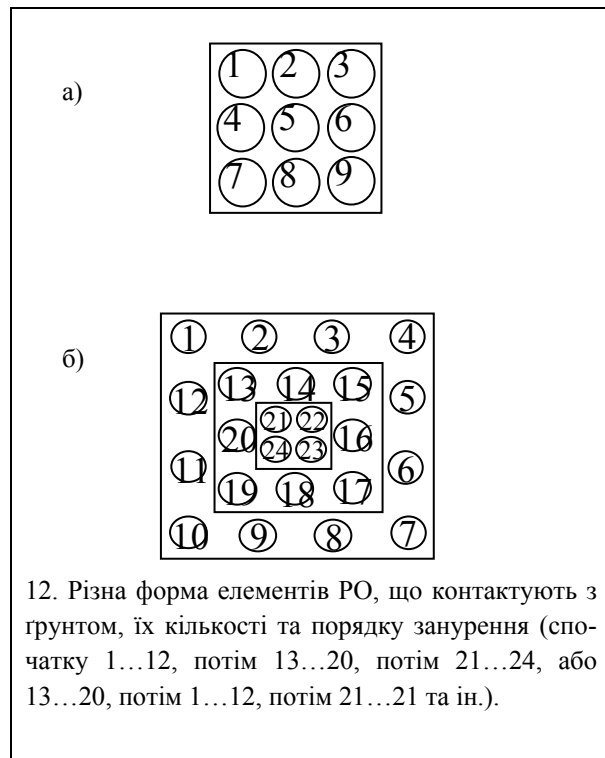
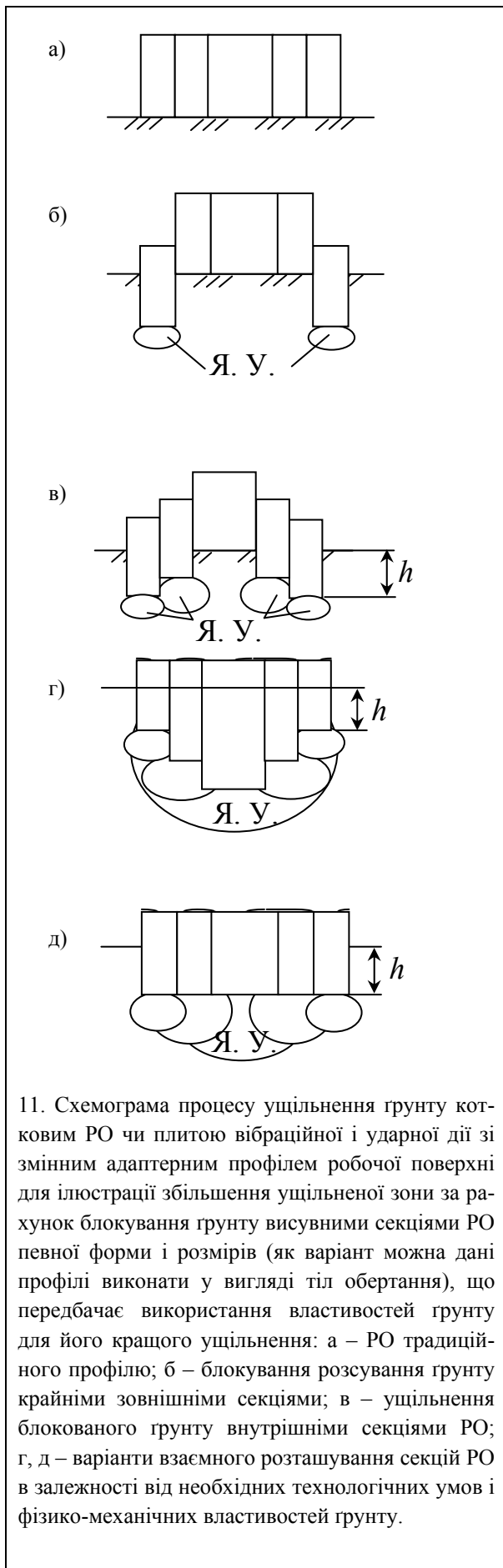
Рис. 1. Схеми елементів РО ГУМ та їх взаємне розташування залежно від спрямованості ущільнення

Таблиця 1

Варіанти поєднання РО ГУМ для прискорення ефективного ущільнення ґрунту

<p>1. Попереднє ущільнення ґрунту, довантаження котка віброплитою. Три етапи ущільнення за один прохід за рахунок реалізації змушуючих сил окремими РО.</p>
<p>2. Ущільнення верхнього шару ґрунту, довантаження гладенького котка віброплитою, кулачковим котком чи віброкотком.</p>
<p>3. Зміна площі контакту РО з ґрунтом шляхом поступового вибіркового виводу з контакту з ґрунтом його елементів і (або) використання в них вібрації.</p>
<p>4. Відсутність неущільнених зон після проходу трамбуючої машини за рахунок перекриття зон трамбування шляхом: – встановлення третьої плити; – розміщення плит з перекриттям смуг ущільнення; – регулювання і співставного вибору сили удару плит, їх габаритних розмірів, площі поверхні контакту РО з ґрунтом (телескопічна плита, плита з висувними секціями); збільшення сили удару за рахунок надання початкового прискорення; надання кожній плиті амплітуди і частоти.</p>

<p>5. Вигладжування поверхні за рахунок віброплити; віброкотка, котка статичної дії, що приєднані до трамбуючої машини, їх використання при останньому проході.</p>
<p>6. Блокування ґрунту від його зсуву в сторони за рахунок: – форми поверхні РО; – розташування РО; – порядку роботи РО.</p>
<p>7. Поступове наближення тиску РО на ґрунт до межі міцності ґрунту шляхом зміни площі РО. Автоматична зміна площі контакту РО з ґрунтом в залежності від щільності ґрунту на проміжних стадіях ущільнення.</p>
<p>8. Збільшення ширини ущільнюваної смуги і зменшення кількості проходів за рахунок зчеплення декількох віброплит, схожих за характеристиками. Автоматична зміна швидкості руху віброплити залежно від щільності ґрунту.</p>
<p>9. Зменшення кількості проходів ГУМ за рахунок багаторазового зворотно-поступального руху середнього вальця між крайніми вальцями зі швидкістю $v_2 \gg v_1$.</p>
<p>10. Відсутність руйнування ґрунту при виході з нього кулачків за рахунок керування моментом входу-виходу елементів РО з котка у масив ґрунту (із застосуванням імпульсу).</p>



При укочуванні свіжовідсипаного ґрунту важким двовальцевим котком з гладенькими вальцями доцільно попередньо ущільнити ґрунт віброплитою, що має адаптерну робочу поверхню відповідної форми (рис. 2). Враховуючи те, що зв'язні ґрунти ущільнюються вібруванням на невелику глибину і схильні до розсування у бічні сторони під дією важкого котка у разі його використання на першій стадії ущільнення розпушеного ґрунту, віброплита відіграватиме роль легкого котка, але буде ефективніше діяти на ґрунт і матиме можливість змінювати величину і вектор змушуючої сили за технологічною необхідністю. Внаслідок цього ущільнювальний шар ґрунту набуватиме достатньої міцності і не руйнуватиметься під дією вальця 2 чи 3 важкого котка. Віброплита 1 встановлюється на шарнірно з'єднану з котком раму 4 з приводом від гідроциліндрів 5.

Можливість реалізації ущільнення за один прохід за рахунок поетапного підвищення змушуючих сил окремих РО ГУМ досягається використанням регульованих віброконтурів. Також віброплита є довантаженням до котка і може бути використана при роботах у стислих умовах.

Відомо, що при ущільненні ґрунту кулачковим котком поверхня ущільнювального верхнього шару залишається дещо розпушеною.

Для усунення цього недоліку, доущільнення і вигладжування шару ґрунту можна встановити на ГУМ віброплиту 1 (рис. 3). При виконанні

робіт, де розвороти ГУМ на ділянці неможливі, наприклад, недостатня ширина насипу, віброплиту 1 можна використати як опору, навколо якої, виважившись, ГУМ зможе повернутися на необхідний кут, залишаючись на місці (наприклад, за рахунок опорно-поворотного круга (ОПК), встановленого на ГУМ). Також, якщо ґрунт грудкуватий або мерзлий, доцільно використовувати віброконтур, розміщений усередині кулачкового вальця, а якщо ґрунт пухкий – то можна використати вібрацію для створення додаткової до статичної змушуючої сили.

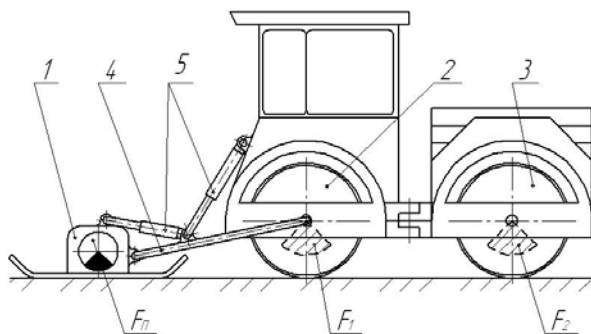


Рис. 2. Гладеньковальцевий коток з віброплитою

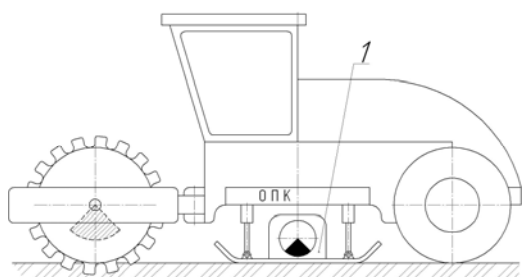


Рис. 3. Кулачковий коток з опорною віброплитою

З метою створення універсального котка з вальцями різного типу, з точки зору регулювання значень контактної тиску РО на ґрунт у широких межах, може бути запропонована схема ГУМ з чотирма вальцями (рис. 4). Як результат – матимемо можливість ефективного ущільнення ґрунту на різних стадіях за рахунок вибіркового виводу з контакту із ґрунтом вальців 1, 2, 3, або їх пар 1–3, 2–3 (рис. 4), і використанням на певних стадіях і режимах встановлених у них віброконтурів з урахуванням набутої міцності ґрунту на певному етапі його ущільнення.

При ущільненні ґрунту тракторними трамбівками з падаючими плитами неминуче утворюється недоущільнена зона шару ґрунту, що знаходиться між боковими внутрішніми площинами плит. Цю задачу можна вирішити за рахунок встановлення третьої плити 1 (рис. 5, а) або розміщення плит таким чином,

щоб одна плита перекривала смугу ущільнення іншої (рис. 5, б).

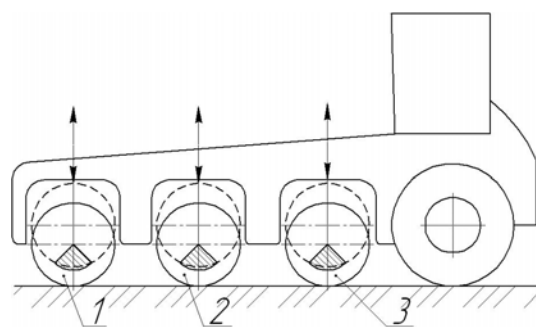


Рис. 4. ГУМ з трьома вальцями, що підіймаються

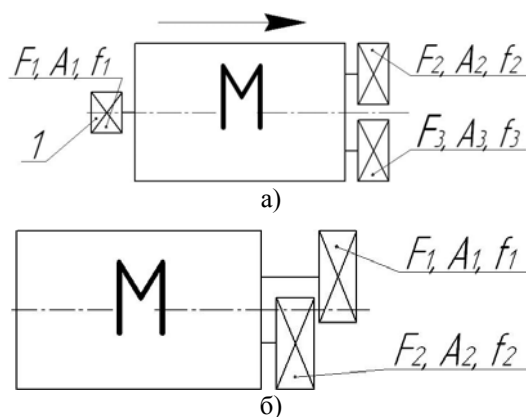


Рис. 5. Розміщення трамбуючих плит тракторної трамбівки (плити умовно показані перекресленими по діагоналях прямокутниками, а машина тягач – прямокутником з буквою «М»)

Причому сила удару першої плити менша сили другої і третьої, що дорівнюють одна одній (рис. 5, а), і габаритні розміри плит повинні бути зменшені відповідно. Також можливе регулювання площі контакту поверхні плит з ґрунтом, наприклад, шляхом встановлення телескопічної плити або плити з висувними секціями. При цьому можна отримати збільшення сили удару за рахунок надання початкового прискорення для кожної з плит зі своєю індивідуальною амплітудою A і частотою ударів f (рис. 5). З іншого боку, проблема вирішується шляхом причеплення до трактора-тягача віброплити (рис. 6, а), або віброкотка (рис. 6, б). Вони не тільки додатково ущільнюють шар ґрунту, але і здійснюють його вигладжування.

При зміні напрямку руху ГУМ можна ефективно ущільнювати як зв'язні, так і незв'язні ґрунти різного ступеня розпушення.

Для ущільнення всієї ширини насипу разом із відкосами можуть бути створені порівняно великі і специфічні для кожного з профілю до-

роги ГУМ коткового типу (рис. 7, а) і трамбуєчі, вібраційні чи комбіновані плити (рис. 7, б). Таким чином, створюються умови для блокування ґрунту від його зсуву з-під РО у сторони за рахунок форми поверхні РО та їх розташування.

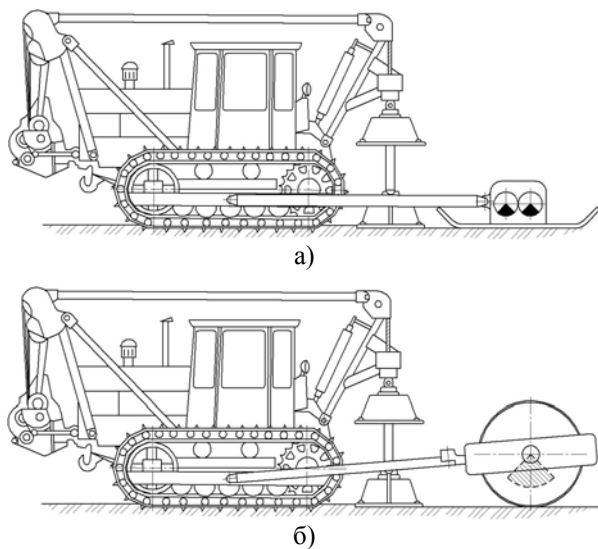


Рис. 6. ГУМ комбінованої дії

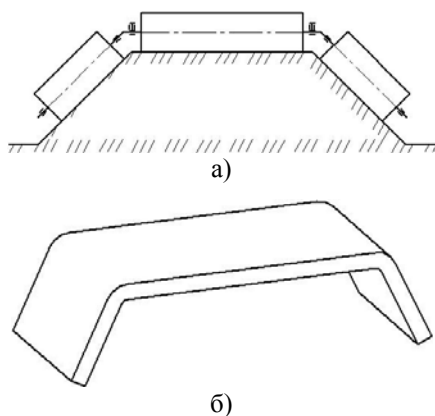


Рис. 7. Схеми РО ГУМ, що ущільнюють всю ширину насипу за один прохід

Можливість регулювання контактної тиску РО віброплити на ґрунт досягається телескопічним виконанням її поверхні (рис. 8), а саме: при постійній масі віброплити, коли площа контакту її РО максимальна, контактний тиск на ґрунт при цьому буде мінімальний. І навпаки, при мінімальній площі контакту РО, контактний тиск – максимальний. Таким чином, ефективне ущільнення ґрунту забезпечується за рахунок автоматичної зміни площі контакту РО з ґрунтом в залежності від щільності ґрунту на проміжних стадіях його ущільнення.

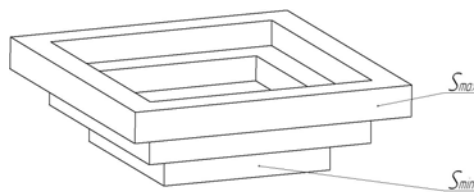


Рис. 8. Телескопічна плита

Щоб зменшити кількість проходів ГУМ по ущільнювальній ділянці, для досягнення необхідної щільності ґрунту може бути використана ГУМ з трьома РО коткового типу зі зворотно-поступальним рухом одного чи декількох з них, відносно бази ГУМ у подовжньому чи поперечному напрямках (рис. 9). Це досягається шляхом багаторазового походження одним з РО (наприклад, середнім) ділянки ущільнення, що знаходиться між іншими РО ГУМ. Тобто його кутова швидкість повинна бути набагато більша, ніж кутова швидкість останніх і кратна їй. У ролі РО ГУМ можуть виступати як вібраційні гладенькі і кулачкові вальці, так і пневмокоlesa.

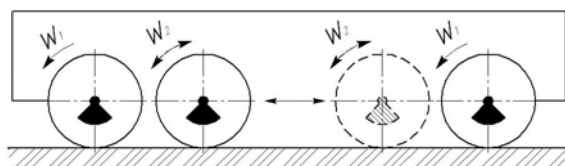


Рис. 9. ГУМ зі зворотно-поступальним рухом середнього вальця

Для збільшення ЯУ може бути використана плита з висувними секціями-плитами (рис. 10). Спочатку у ґрунт занурюються крайні секції, з наступним по черговим попарним опусканням інших секцій, закінчуючи середньою. Таким чином, рухаючись до середини, ущільнювальний ґрунт знаходиться між протилежними плитами-секціями, які не дають йому розходитись у сторони з-під РО, і, як наслідок, ґрунт рухається максимальним об'ємом до центру ЯУ в ущільнену зону відповідним найкоротшим шляхом, ущільнюючись і формуючи ЯУ, а також виступає передаточною ланкою між РО і неущільненим ґрунтом.

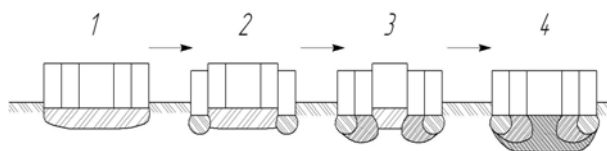


Рис. 10. Плита з висувними секціями-плитами

Цього ефекту досягає і плита із висувними секціями різної форми і взаємним їх розташуванням. Секції можуть рухатись одна відносно іншої у різних комбінаціях, в залежності від

бажаного отримання форми і об'єму ЯУ. Варіант такої плити представлений на рис. 11. На початковому етапі плита ущільнює ґрунт тільки своєю опорною площиною, без висування секцій. Потім занурюються у ґрунт ряди секцій, що знаходяться по зовнішньому периметру, і з наступним зануренням рядів секцій наступного порівняно меншого периметру, і до найменшого. Внаслідок таких операцій утворюється скоцентоване ЯУ.

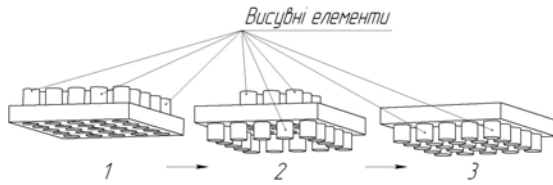


Рис. 11. Плита із висувними секціями різної форми

З метою поєднання ефекту ударної дії на ґрунт і укочування, запропонована схема вальця з падаючими секціями (рис. 12, а).

Під час руху вальця у певний момент часу відносно нього переміщається секція і ударяє по ґрунту. Потім валець найжджає на секцію і втискає її своєю масою ще глибше у ґрунт. Таким чином відбувається ущільнення. Одним із недоліків цієї конструкції є те, що такий ефект можливий тільки при одному напрямку обертання вальця. Для усунення вказаного недоліку передбачена можливість перезакріплення рухомих секцій залежно від напрямку руху, а у певних технологічних умовах рухомі секції закріплюються з обох сторін і РО працює як коток статичної дії.

Щоб досягти руху кулачка 1 кулачкового котка вертикально вниз з постійним контактом його робочої поверхні з ґрунтом, запропонована схема вальця з рухомими кулачками (рис. 12, б). При цьому форма кулачків у межах одного РО така, що не руйнує вже ущільнений ґрунт.

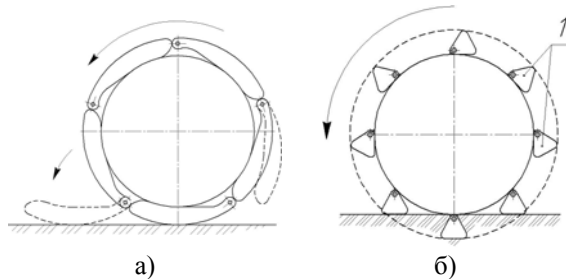


Рис. 12. Валець з падаючими секціями (а) та з рухомими кулачками (б)

З частковим вирішенням проблеми руйнування ґрунту при виході з нього кулачка кулачкового котка і додаванням переваг гратчастого

вальця запропонована схема гратчастого вальця з вбудованим у нього кулачковим вальцем (рис. 13).

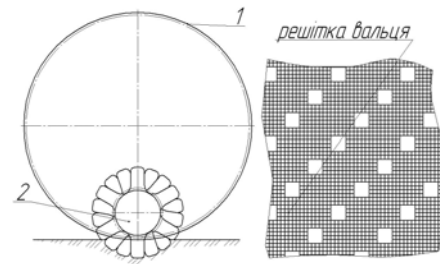


Рис. 13. Гратчастий валець з вбудованим у нього кулачковим вальцем

Кулачковий 1 і гратчастий 2 вальці з'єднані між собою зубчатим зачепленням, що забезпечує рівномірний відносний рух. У решітці гратчастого вальця є отвори для проходження через них кулачків, і в результаті відбувається взаємне їх очищення від налиплого ґрунту. Оскільки кожний із вальців привідний і кулачковий валець має можливість вивішуватись, то можливе використання як самого гратчастого вальця, так і його поєднання із кулачковим, що розширює область застосування запропонованого комбінованого вальця.

Схеми РО ГУМ коткового типу з різним виконанням збудників вібрації представлені на рис. 14.

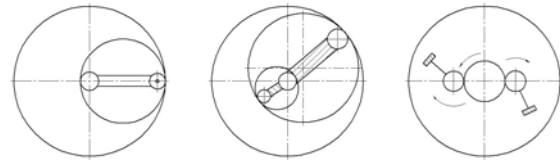


Рис. 14. Схеми вальців з різним виконанням збудників вібрації

Ущільнення ґрунту за рахунок динамічної дії падаючих мас, що знаходяться усередині вальця, має місце у наступних схемах вальців (рис. 15).

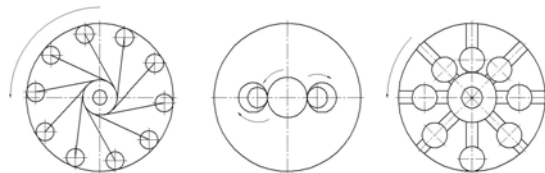


Рис. 15. Схеми вальців з падаючими масами

Валець з фасонною внутрішньою поверхнею (рис. 16, а) діє на ґрунт за рахунок перекочування і з імпульсними ударами по його внутрішній поверхні вбудованого елемента.

Перетворення енергії обертання ексцентрика у енергію поступального руху кулачка показане на принциповій схемі вальця (рис. 16, б).

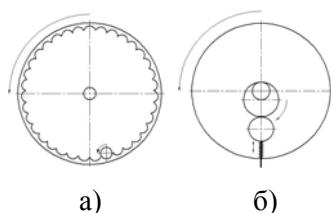


Рис. 16. Валець з фасонною внутрішньою поверхнею (а) та з висувним кулачком (б)

У загальному випадку певна група РО ГУМ коткового і плоского типу, які утримували б ґрунт від розсування з-під робочих поверхонь, можуть бути сформовані на основі РО ГУМ традиційної форми шляхом встановлення на їх робочих поверхнях змінних елементів (рис. 17).

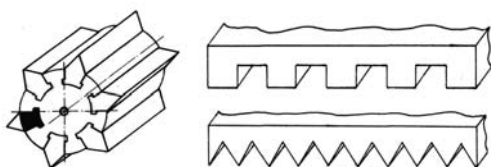


Рис. 17. РО ГУМ зі змінними елементами

При цьому змінні елементи можуть бути виконані таким чином, щоб робоча поверхня РО ГУМ, на якій вони будуть встановлені, залишалася незмінною, або іншої зручної для монтажу-демонтажу форми при проектуванні РО ГУМ нового покоління.

Складовими елементами РО ГУМ у загальному випадку можуть бути: форма основної поверхні (циліндрична, профільна, багатогранна, плоска, комбінована); форма змінних елементів (кулачки, пластини, комбіновані); спосіб встановлення змінних елементів (постійно, бандажі суцільні і роз'ємні, висувні, секцій-вставки, комбіновані) (рис. 18).

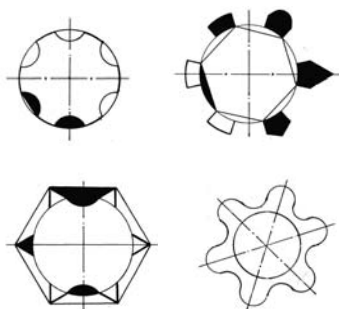


Рис. 18. Складові елементи РО ГУМ (змінні елементи основних поверхонь і їх виступаючих частин затушовані чи представлені принципово у вигляді окремих зразків з можливістю різних варіантів їх поєднання

Висновки і перспективи досліджень. Таким чином, обґрунтовані умови прискореного ущільнення ґрунту шляхом блокування його розсування з-під РО ГУМ під час прискореного ущільнення, та зменшення кількості ГУМ у технологічному процесі.

Подальші дослідження спрямовані на можливість створення необхідного профілю РО на основі бажаного ЯУ і структурної формули РО ГУМ. При цьому, замінивши у РО елементи відповідними математичними моделями, можна отримати загальну математичну модель РО ГУМ, а також профіль РО ГУМ, виходячи із заданих енерговитрат і технологічних вимог.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Савельев С. В. Обоснование режимных параметров вибрационного гидрошинного катка для уплотнения грунтов. – Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / СибАДИ. – Омск, 2004. – 19 с.
2. Бурхович М. П. Підвищення експлуатаційної ефективності пневматичних шин машин для земляних та дорожніх робіт. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Полтавський нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава, 2007. – 21 с.
3. Манакін Є. А. Підвищення ефективності ущільнення горілих порід вибором раціональних параметрів вібраційного катка. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / ПДАБА. – Д., 2007. – 20 с.
4. Главацкий К. Ц. Моделирование взаимодействия с грунтом каткового рабочего органа / К. Ц. Главацкий, В. М. Богомаз, Ю. Р. Бредихин // Подъемно-транспортная техника, 2006. – № 3. – С. 72-80.
5. Главацкий К. Ц. Зависимость угла поворота центра тяжести дебаланса от параметров грунтоуплотняющего катка при стабильных режимах работы / К. Ц. Главацкий, В. Н. Богомаз, В. Н. Проскурня, А. М. Храмов // Подъемно-транспортная техника, 2007. – №1. – С. 37-43.
6. Главацкий К. Ц. Влияние параметров грунтоуплотняющего катка при переходных режимах работы на угловое положение дебаланса его виброконтура / К. Ц. Главацкий, В. Н. Богомаз, В. Н. Проскурня, В. Э. Черкудинов // Подъемно-транспортная техника, 2007. – № 2. – С. 40-49.
7. Богомаз В. М. Моделирование взаимодействия рабочего органа уплотняющей машины с грунтом / В. М. Богомаз, К. Ц. Главацкий // Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-та. – Вып. 38. – Харьков: ХНАДУ, 2007. – С. 164-170.
8. Главацкий К. Ц. Направления модернизации катков статического и динамического действия для уплотнения строения пути / К. Ц. Главацкий, В. Н. Богомаз // Вісн. Дніпроп. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 17. – Д.: ДНУЗТ, 2007. – С. 80-85.

Надійшла до редколегії 29.02.2008.

ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ПОТРІБНОГО ГАБАРИТНОГО РОЗШИРЕННЯ МІЖКОЛІЙЯ В КРИВИХ

Розглядається можливість визначення потрібного габаритного розширення не за таблицями, а за формулами.

Рассматривается возможность определения требуемого габаритного уширения не по таблицам, а по формулам.

The possibility of determination of the required clearance widening by not on tables but on formulas is under consideration.

Як відомо, на двоколійних та багатоколійних ділянках залізниць у кривих доводиться збільшувати міжколійну відстань [1].

Пов'язано це з тим, що при вписуванні рухомого складу в криві його середня частина зсувається відносно осі колії всередину кривої, а кінці – назовні. Крім того, нахил рухомого складу, який відбувається у зв'язку з підвищенням зовнішньої рейки, також зменшує габаритну відстань між одиницями рухомого складу.

Застосування стандарту [1] в автоматизованих системах проектування призводить до необхідності програмного аналізу великої кількості таблиць і у разі зміни деяких нормативів проектування, а особливо ширини колії чи га-

бариту рухомого складу, робить непридатними такі таблиці для вирішення задачі. У той же час відомо, що чим більша кількість якихось зовнішніх чисел використовується в програмі, тим більша вірогідність похибки в розрахунках. Також у стандарті не передбачені проектні норми для підвищених швидкостей руху.

Розглянемо за аналогією з [2] можливість теоретичного розрахунку потрібних габаритних розширень.

У зв'язку з нахилом рухомого складу в кривій на сусідніх коліях на кути α_1 та α_2 (рис. 1) верхня частина рухомого складу нахиляється всередину кривої.

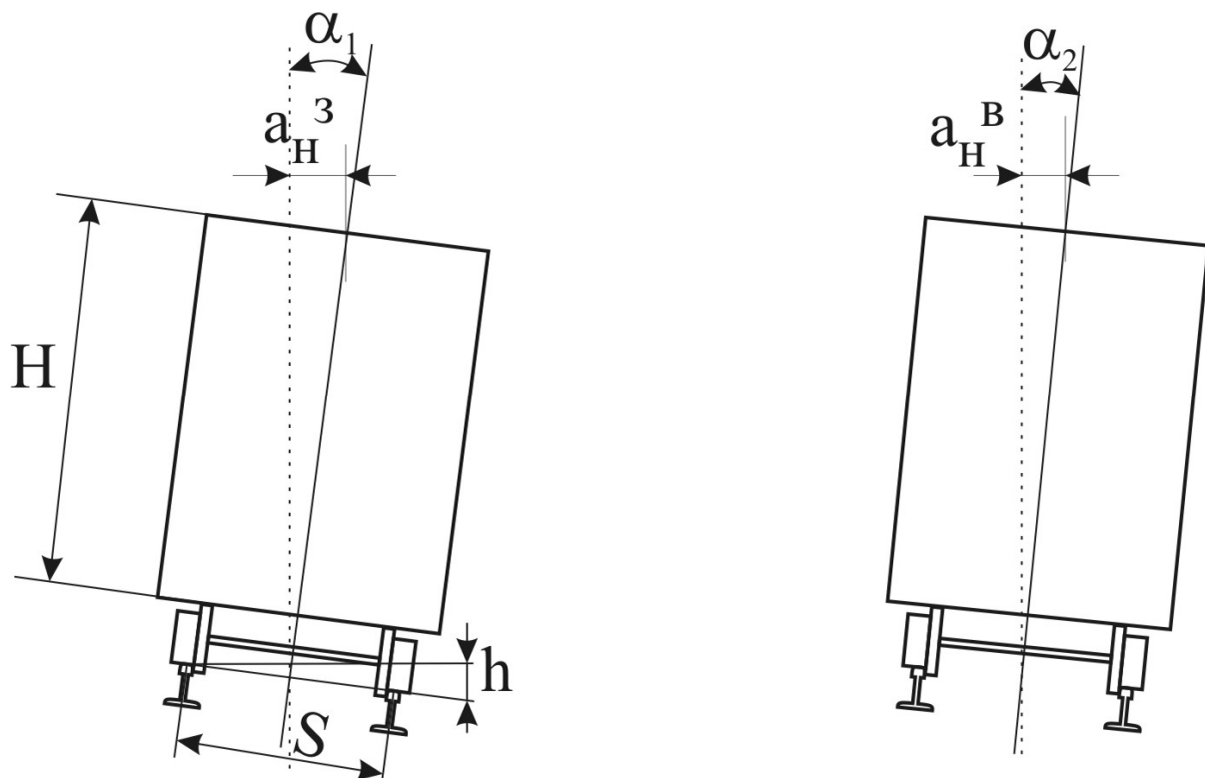


Рис. 1. Розширення, пов'язане з нахилом рухомого складу

У результаті таких нахилів рухомий склад відхиляється від осі колії. Оскільки в загальному випадку підвищення зовнішньої рейки на зовнішній та внутрішній коліях відрізняються, це призводить до того, що зміщення рухомого складу всередину кривої буде різним. Нас цікавить випадок, коли зміщення від нахилу на зовнішній кривій буде більшим за відповідне зміщення на внутрішній кривій. У цьому випадку потрібне додаткове розширення міжколій.

Згідно з рис. 1, з достатньою точністю зміщення від нахилу a_n для кожної з колій можна визначити за такою формулою:

$$a_n = \frac{h \cdot H}{S}, \quad (1)$$

де h – підвищення зовнішньої рейки;
 H – висота габариту рухомого складу;
 S – відстань між осями рейок.

Відповідне потрібне габаритне розширення Δa_n буде визначатися як різниця між зміщеннями від нахилу для зовнішньої та внутрішньої колій. У випадку, якщо нахил на зовнішній колії буде меншим за нахил на внутрішній колії, Δa_n приймається рівним нулю.

У стандарті [1] розрізняють експлуатаційні та проектні норми. Експлуатаційні норми вима-

гають меншого розширення, оскільки вони розраховуються для наявного стану колій і повинні змінюватися зі зміною підвищень зовнішньої рейки на коліях. Експлуатаційні норми дозволяється використовувати як тимчасові для зменшення вартості робіт з їх впровадження.

У випадку застосування експлуатаційних норм для розрахунків беруться підвищення, які встановлені для кожної з колій відповідно до швидкостей, які плануються на цих коліях.

Проектні ж норми розглядають найгірший випадок: нульове підвищення на внутрішній колії і максимальне підвищення – на зовнішній.

Максимальне підвищення визначається, виходячи з встановленої максимальної швидкості та допуску на непогашене прискорення.

Слід зазначити, що при підвищенні швидкості руху поїздів на якихось напрямках слід обов'язково перевіряти міжколійні відстані на габаритність, оскільки нові швидкості будуть вимагати нових підвищень зовнішньої рейки. У той же час в стандарті [1] практично не розглядалися швидкості руху на рівні 140...160 км/год, і неврахування цього фактора може призводити до порушень безпеки руху.

Визначимо тепер потрібне габаритне розширення, яке виникає в плані (рис. 2).

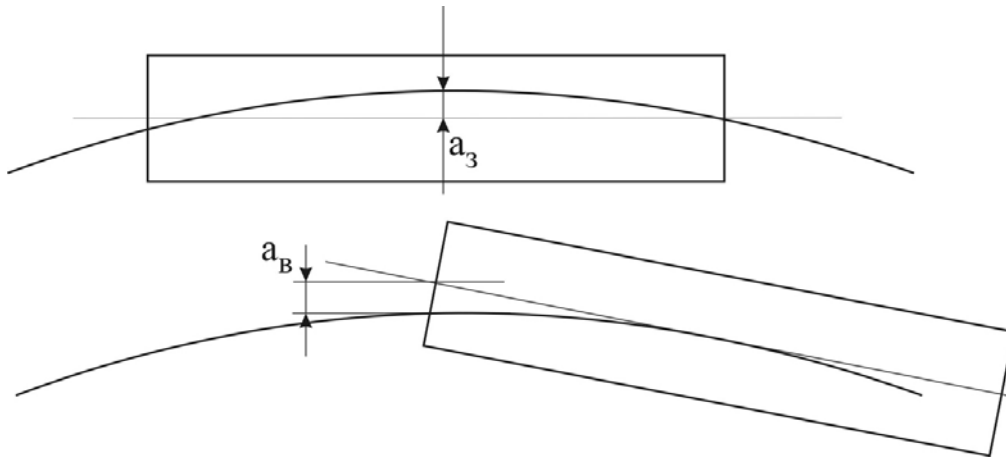


Рис. 2. Зменшення габариту в горизонтальній площині

Це габаритне розширення в найгіршому випадку буде складатися зі зміщення середини вагона всередину кривої на зовнішній кривій a_3 та зміщення кінця вагона назовні кривої на внутрішній кривій a_B .

З достатньою точністю можна вважати, що колія на протязі вагону є колом. Тоді ці зміщення можна визначити, згідно з рис. 3, за такою формулою:

$$z = R - \sqrt{R^2 - b^2}. \quad (2)$$

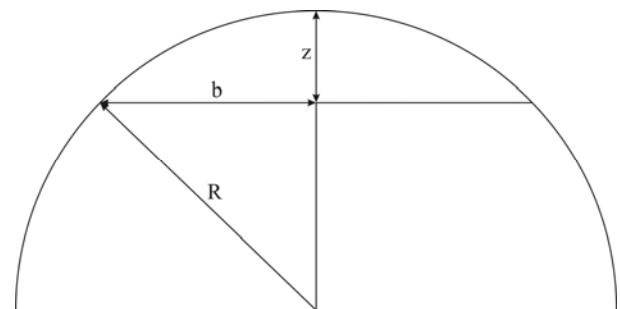


Рис. 3. Визначення зміщення в кривій

За значення b слід приймати половину жорсткої бази вагона при визначенні зміщення на зовнішній кривій чи половину повної довжини вагона – на внутрішній кривій.

Алгоритм розрахунків потрібного габаритного розширення такий:

1. Визначаються радіуси кривизни у відповідних точках зовнішньої та внутрішньої колій.

2. Для експлуатаційних норм приймаються відповідні підвищення зовнішньої рейки для зовнішньої та внутрішньої колій. Для проектних норм приймається підвищення внутрішньої колії рівним нулю, а для зовнішньої визначається, виходячи з максимальної встановленої швидкості та нормативу непогашеного прискорення.

3. Для цих підвищень визначається потрібне розширення міжколійя від нахилу кузова.

4. Визначається зміщення середини вагона всередину кривої для зовнішньої колії та зміщення кінця вагона для внутрішньої колії.

5. За потрібне габаритне розширення береться сума розширень від нахилу кузова, від

зміщення середини вагона та від зміщення кінця вагона.

Запропонований підхід дозволяє обґрунтовано програмно визначати потрібні габаритні розширення міжколійя у випадках, які не розглядалися в стандарті [1].

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Инструкция по применению габаритов приближения строений ГОСТ 9238-83. ЦП 4425. – М.: Транспорт, 1988. – 144 с.
2. Дюнин А. К. Аналитический метод проектирования переустройства железнодорожного пути в плане / А. К. Дюнин, А. И. Проценко. – Новосибирск: Изд-во НИИЖТ, 1967. – 226 с.
3. Корженевич И. П. Проектирование плана второго пути при сложном плане первого пути // «Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России»: Материалы междунауч.-техн. конф. 16-17 ноября 2006. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – С. 181-182.

Надійшла до редколегії 19.03.2008.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПРОМПЛОЩАДКАХ

Розроблено тривимірну чисельну модель розрахунку процесу розповсюдження токсичної речовини на проммайdanчику у разі її витоку з будівлі. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та на моделі течії невязкої нестислої речовини. Наводяться результати обчислювального експерименту щодо прогнозу рівня забруднення атмосфери.

Разработана трехмерная численная модель расчета процесса распространения токсичных веществ на промплощадке при аварийной эмиссии из здания. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и на модели течения невязкой несжимаемой жидкости. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозу уровня загрязнения атмосферы.

The 3D model to simulate the pollutant transfer near building after accidents was developed. The model is based on the transport gradient model and the model of inviscid incompressible fluid. The results of numerical experiments are presented.

Введение. Потенциальную опасность для окружающей среды представляют хранилища твердого ракетного топлива. В случае возгорания этого топлива в атмосферу начинают поступать токсичные вещества. Применяемая в настоящее время нормативная методика прогноза последствий аварийных выбросов или разливов опасных веществ [5] дает лишь оценочную информацию о величине возможного химического загрязнения, т.к. она не учитывает ряд важных факторов, среди которых неравномерность профиля ветра, наличие препятствий на пути шлейфа токсичного вещества. Целью данной работы явилась разработка математической модели процесса загрязнения атмосферы на промплощадках при аварийной эмиссии токсичного вещества при горении твердого ракетного топлива. Особенностью рассматриваемой задачи является то, что рассматривается процесс загрязнения атмосферы, когда источник выброса токсичного вещества находится в частично полуразрушенном здании. Предложенная модель позволяет оперативно получить информацию о динамике загрязнения атмосферы с учетом основных физических факторов, влияющих на данный процесс.

Математическая модель миграции загрязнителя в атмосфере. Для расчета процесса загрязнения атмосферы при миграции в ней токсичного газа, выделившегося вследствие горения твердого ракетного топлива в условиях застройки, будем использовать трехмерное уравнение миграции примеси (модель градиентного типа) [2, 3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i) \end{aligned} \quad (1)$$

где C – концентрация токсичного вещества; u, v, w – компоненты вектора скорости воздушной среды; w_s – скорость оседания примеси; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коэффициент турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного вещества; $\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ – координаты источника выброса.

Для расчета поля скорости воздушного потока на промплощадке делается допущение, что движение воздушной среды – потенциальное, тогда компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z},$$

где P – потенциал.

Уравнение для определения потенциала имеет вид:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Постановка краевых условий для уравнения (2) рассмотрена в работе [3]. Для уравнения (3) ставятся следующие граничные условия:

– на твердых стенках:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали;

– на входной границе (границы втекания воздушного потока):

$$\frac{\partial P}{\partial n} = V_n,$$

где V_n – известное значение скорости;

– на выходной границе:

$$P = P(x = \text{const}, y) + \text{const}$$

(условие Дирихле).

В разработанной численной модели используется неравномерный профиль скорости ветра и вертикального коэффициента диффузии:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m,$$

где u_1 – скорость ветра на высоте z_1 ; $k_1 = 0,2$; $n = 0,16$; $m \approx 1$.

При необходимости пользователь разработанного пакета прикладных программ имеет возможность задавать иную зависимость скорости ветра и вертикального коэффициента диффузии от высоты.

Метод решения. Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется с использованием неявной попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [3]. Особенностью данной разностной схемы является то, что на каждом шаге расщепления строится неявная разностная схема. Однако, определение неизвестного значения концентрации токсичного вещества определяется по явной формуле будущего счета.

Для численного интегрирования уравнения (2) используется идея установления решения по времени, т. е. интегрируется уравнение вида:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2},$$

где τ – фиктивное время.

Численное интегрирование данного уравнения проводится с использованием неявной разностной схемы условной аппроксимации. В разработанном пакете программ осуществляет-

ся также численное интегрирование уравнения (2) с помощью метода Либмана. Расчет поля потенциала проводится одновременно с использованием указанным методов с целью контроля результатов расчета.

Практическая реализация. Будет моделироваться следующая ситуация: в результате аварии произошло разрушение потолка здания и в боковой стене здания образовался (размеры проема 5×10 м) проем. Внутри частично разрушенного здания находятся хранилища твердого ракетного топлива. Это топливо начинает гореть и выделять токсичное вещество (HCl). Таким образом, набегающий на здание ветровой поток не только обтекает здание, но и входит в него через крышу. Выход воздушного потока также осуществляется через крышу и проем в стене. Таким образом, с гидродинамической точки зрения происходит процесс обтекания здания снаружи (внешняя задача аэродинамики) и движение воздушного потока внутри частично полуразрушенного здания (внутренняя задача), где располагается источник эмиссии токсичного вещества.

Вычислительный эксперимент производится при следующих параметрах: интенсивность выброса HCl – 1; скорость ветра (на высоте 10 м) – 5 м/с; коэффициент диффузии $\mu_x = \mu_y = \mu_z = 2,5 \text{ м}^2/\text{с}$; длина маршрута эвакуации – 200 м; люди начинают двигаться по маршруту эвакуации через 10 с после аварии; скорость перемещения людей на маршруте эвакуации – 3 м/с; размеры расчетной области $130 \times 130 \times 60$ м.

Данная задача будет иметь одну отличительную особенность – будет рассматриваться процесс загрязнения атмосферы, когда источник эмиссии загрязнения располагается в частично полуразрушенном здании. Схема расчетной области показана на рис. 1.

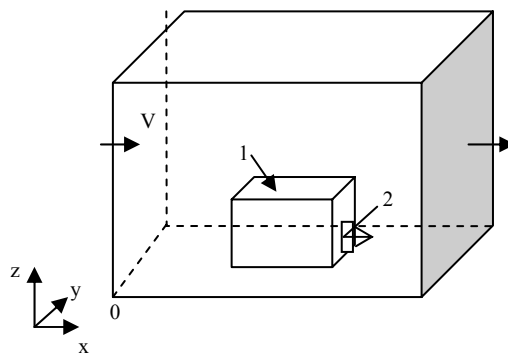


Рис. 1. Схема расчетной области:
1 – корпус здания (без крыши);
2 – проем в стене здания

На последующих рисунках представлена динамика загрязнения воздушной среды на промплощадке после аварии. На рис. 2, 3 отчетливо видно, как шлейф токсичного газа выходит из отверстия в стене производственного корпуса. Видно, что внутри полуразрушенного здания формируется интенсивная зона загрязнения, характеризующаяся большим градиентом концентрации токсиканта. Вне производственного корпуса загрязнитель распространяется в виде шлейфа.

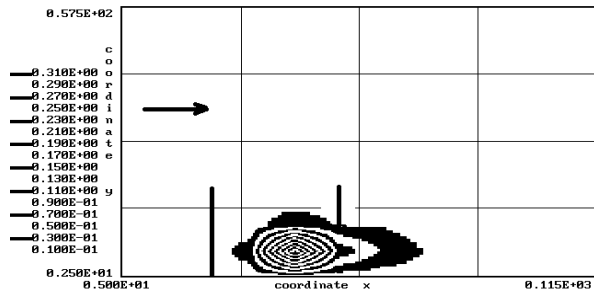


Рис. 2. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 3$ с (сечение $y = 65$ м)

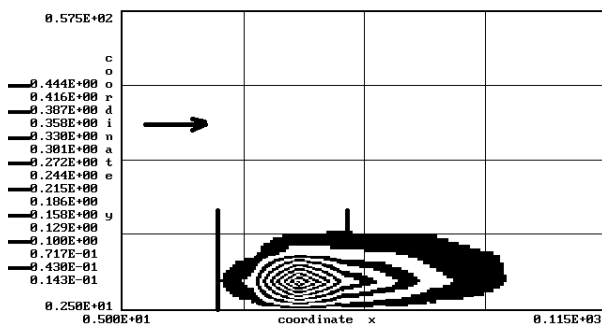


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 10$ с (сечение $y = 65$ м)

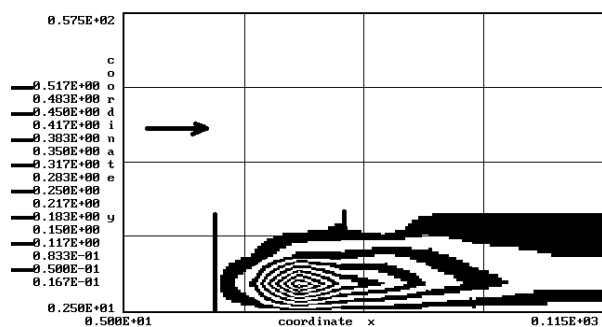


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 40$ с (сечение $y = 65$ м)

На рис. 5 представлена зона загрязнения для момента времени соответствующего периода, когда прекратилось горение ракетного топлива.

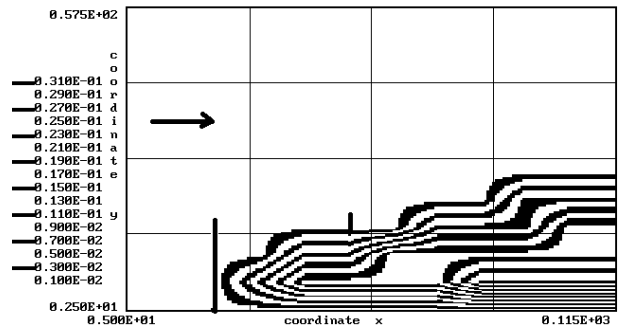


Рис. 5. Зона загрязнения атмосферы через 15 с после прекращения горения ракетного топлива (сечение $y = 65$ м)

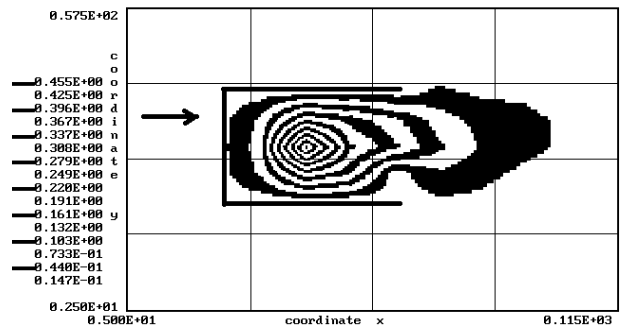


Рис. 6. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 12$ с (сечение $z = 2,5$ м)

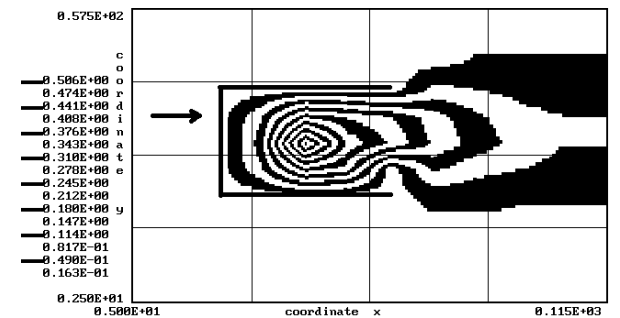


Рис. 7. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 30$ с (сечение $z = 2,5$ м)

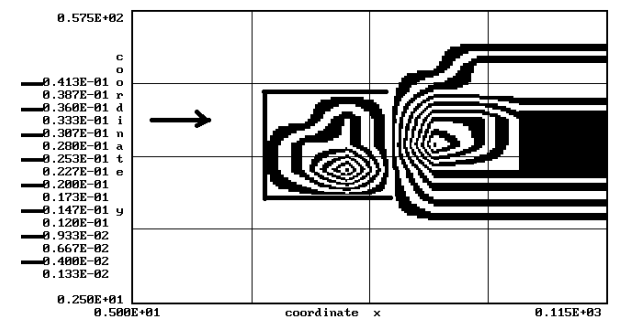


Рис. 8. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 30$ с (сечение $z = 7,5$ м)

Если сравнить этот рисунок с предыдущим, то видно, что изолинии концентрации токсиканта внутри здания стали более разреженными вследствие прекращения «работы» источника

эмиссии и действия воздушного потока и диффузии.

Отметим, что расчет с использованием данной модели требует около 10 с для получения прогнозных данных.

Выводы. В работе разработана трехмерная численная модель, на основе которой построен метод расчета динамики загрязнения воздушной среды на промплощадках при аварийной эмиссии токсичного вещества. Данная модель обладает рядом важных возможностей, необходимых для проектировщика: возможность учета влияния зданий (их формы, различного расположения) на процесс переноса загрязняющих веществ; возможность моделирования различной формы зоны разлива. Дальнейшее развитие данной модели должно быть направлено на создание численной модели для расчета рассеивания тяжелых газов в условиях застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 5-ти кн. / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаяева. – М.: АСВ, 2001. – 200 с.
2. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
4. Мацак В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов. – М.: Медгиз, 1959. – 231 с.
5. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – К., 2001. – 33 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

Поступила в редколлегию 04.03.2008.

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО, ЧЖУ ЖУЙ (ДИИТ)

ОСОБЕННОСТИ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ МАСШТАБНЫМИ ЭМИССИЯМИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Наведено принципи та вимоги до проведення ліквідаційних заходів при аварійних емісіях нафтопродуктів. Розроблено пристрій для проведення локальної очистки ґрунту від легких нафтопродуктів з їх утилізацією.

Приведены принципы и требования к проведению ликвидационных мероприятий при аварийных эмиссиях нефтепродуктов. Разработано устройство для проведения локальной очистки грунта от легких нефтепродуктов с их утилизацией.

The principles and requirements to conduction of elimination measures after emergency emissions of the oil products are presented. The device for conduction of local cleaning of soil from the light oil products with their utilization is developed.

Екологічні наслідки аварій, які відбуваються при перевезенні небезпечних вантажів, є однією з найбільш масштабних і значущих проблем транспортної екології. В час таких аварій відбуваються залпові емісії великих кількостей токсичних речовин, які становлять серйозну небезпечність для людей і навколишнього середовища.

Статистика показує, що, незважаючи на значительні зусилля по запобіганню транспортних аварій, вони продовжують мати місце. Так, навіть за неповними даними Організації Співдружества залізничних доріг тільки великих залізничних аварій в цих країнах відбувається декілька десятків в рік, при цьому середні втрати небезпечних вантажів становлять близько 130 тонн на аварію. Це пов'язано з складнощами прогнозування стихійних бедств, наприклад землетрусів, ураганів, наводнень і т. п., з неминувими помилками персоналу, з незадовільним станом рухомого складу і шляхів, в особливості в країнах з перехідною економікою, до яких належить і Україна, з природним прагненням до підвищення швидкостей руху, з рядом інших причин. В останні роки до цих причин додалися локальні військові дії і терористичні акти.

Нефтепродукти є однією з найбільш поширених вантажів, що перевозяться залізничним транспортом. Україна – транзитна країна і поряд з великою кількістю внутрішніх споживачів збільшується кількість імпортерів цього виду продукції на Заході, в результаті зростає потік російських складів в напрямку Азія – Європа. Однак і кількість аварій з цими видами вантажів має

тенденцію до зростання, деякі з них достатньо масштабні і небезпечні.

Хоча нефтепродукти (за винятком етилізованого бензину) не належать до числа високошкідливих речовин, потрапляння їх в навколишнє середовище призводить до серйозних порушень біоценозів гідросфери і ще в більшій ступені літосфери. По цій причині розробка технологій ліквідації екологічних наслідків транспортних аварій з нафтою і продуктами її переробки виходить в ряд достатньо актуальних. Треба врахувати також, що в результаті масових проливів нефтепродуктів в час аварій втрачаються значительні кількості дорожніх енергоносіїв і таким чином відповідні технології, які включають утилізацію цих енергоносіїв, слід віднести до ряду енерго- і ресурсозберігаючих.

Перше, що слід з'ясувати, це з якою швидкістю розлиті нефтепродукти фільтруються через ґрунти і які фактори в найбільшій ступені впливають на ці процеси. Враховуючи, що асортимент вироблюваних і перевозимих залізничним транспортом нефтепродуктів дуже широкий, і природно він не міг бути охоплено в межах однієї роботи, ми зупинили свій вибір на дизельному паливі марки Д, бензинах А-76 і А-95, маслі ВМ-6.

При виборі типу ґрунту ми виходили з їх поширеності в зонах максимального ризику аварій і небезпечності глибокої міграції розлитого нефтепродукту навіть до підземних водоносних горизонтів. Дослідження виконувалися, як в лабораторних (за ГОСТовськими методами), так і в польових умовах.

При изучении процессов фильтрации нефтепродуктов через грунты нами было изучено влияние следующих факторов: температуры окружающей среды и грунта, дисперсности, влажности, плотности сложения и химического состава грунтов.

На основании полученных данных было проведено математическое моделирование с целью дальнейшего прогнозирования поведения нефтепродуктов в грунтах ненарушенной структуры.

Следующим этапом выполнения данной работы была непосредственная разработка ликвидационных мероприятий по двум основным направлениям, отличающимся характером протекания эмиссии, распространения нефтепродукта и, соответственно, особенностями подхода к их проведению.

Акцентировалось внимание на:

- ликвидации экологических последствий аварий при перевозке *тяжелых* нефтепродуктов;
- ликвидации экологических последствий аварий при перевозке *легких* нефтепродуктов.

Основным принципом ликвидации разливов тяжелых нефтепродуктов является общепринятая схема:

Локализация места разлива → Откачка жидкой фазы нефтепродукта → Засыпка места аварии поглотителями → Сбор отработанных

поглотителей и срезка нефтезагрязненного грунта → Отправка собранного поглотителя и срезанного грунта на утилизацию → Обработка места аварии ферментами и биопрепаратами-нефтедеструкторами для глубокой доочистки грунта.

При этом центральной концепцией технологии является ориентация на использование в качестве сорбентов-поглотителей отходов металлургических, строительных деревообрабатывающих производств, тепловых электростанций и некоторых природных материалов. С целью возможности рекомендации использования того или иного материала мы изучили также влияние основных физических факторов (температура, влажность, гранулометрический и химический составы).

Основным принципом ликвидации аварийных разливов легких нефтепродуктов являются:

Отдувка легких фракций разогретым до оптимальных температур воздухом (конвекция) с параллельной регенерацией нефтепродукта → Закачка ферментов и биопрепаратов-нефтедеструкторов для глубокой доочистки грунта.

Для проведения выше описанных восстановительных работ нами разработана схема размещения рабочего оборудования и специальное устройство для извлечения легких фракций нефтепродуктов из грунтовой массы.

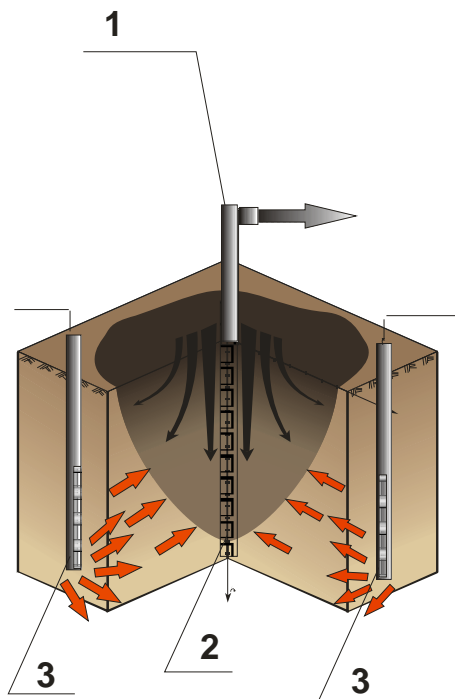


Рис. 1.

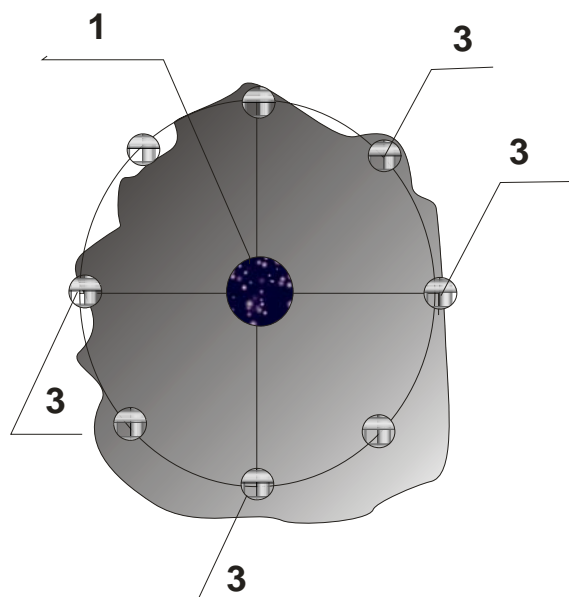


Рис. 2.

Принцип работы устройства заключается в нагнетании в зону разлива воздуха, разогретого на термоэлементах, сквозь которые он пропускается и под давлением подается в нагнетающие перфорированные трубы. Разогретый воздух распределяется в грунтовой массе зоны аварии и испаряет бензиновые фракции нефтепродукта. Подача воздуха направлена к центру зоны аварии, где расположена центральная разгружающая перфорированная со всех сторон труба, через которую собирается и отводится воздух с парами бензина. Бензиново-воздушная смесь пропускается через рефрижераторное оборудование, на котором конденсируются пары бензина. Конденсат бензина собирается в специальную емкость.

Графическая часть объясняет принцип размещения оборудования для термической конвекции почвы, где на рис. 1 изображено устройство для очистки почвы от легких нефтепродуктов – общий вид с расположением в почве, а на рис. 2 – вид сверху.

Описание устройства в статическом состоянии заключается в следующем: устройство состоит из центральной поверхностной трубы 1 для отведения пара бензиново-воздушной смеси, из подземной части разгружающей трубы 2, которая имеет перфорированную поверхность вдоль грунтовой массы для приня-

тия потока бензиново-воздушной смеси, и обсадных труб 3 с перфорированной внутренней стороной, обращенной к центру разлива для направления потока разогретого воздуха к центральной разгружающей трубе сквозь грунтовую массу.

Принцип и условия размещения рабочего оборудования выполняется в следующем порядке: в зону разлива легких нефтепродуктов по кругу разлива забиваются обсадные трубы диаметром d (на глубину, большую глубины разлива) с перфорированной внутренней поверхностью, которая размещается в направлении зоны разлива. В центре разлива забивается трубка диаметром $\geq 2d$ с полностью перфорированной концевой частью, глубина ее забивки не должна быть больше 80 % глубины разлива.

По обсадным трубам под давлением подается разогретый до температуры 75 °С воздух, разогревающий грунтовую массу и испаряющий бензин. Пары бензина отводятся центральной – разгрузочной – трубой и подаются на рефрижераторное оборудование, где он конденсируется и собирается в бак. Эффект очистки, проведенной по этой схеме, достигает 83 % от начальной концентрации, зафиксированной на момент разлива.

Поступила в редколлегию 12.03.2008.

ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У КОНДИЦІОНЕРАХ ПОВІТРЯ ВИПАРНОГО ТИПУ

Розглянуто існуючі схемні рішення комбінованих систем кондиціювання повітря випарного типу, запропоноване рішення з використанням термоелектричного блоку. Представлено математичну модель і експериментальну установку.

Рассмотрены существующие схемные решения комбинированных систем кондиционирования воздуха испарительного типа, предложено решение с использованием термоэлектрического блока. Представлены математическая модель и экспериментальная установка.

The existing scheme solutions of the combined vaporizing air conditioning are considered, proposal for a solution by the thermoelectric unit is performed. The mathematical model and the experimental unit are presented.

В останні роки для охолодження різних обмежених об'ємів (купе пасажирських вагонів, кабіни локомотивів, тракторів, комбайнів та іншої мобільної техніки) почали застосовувати кондиціонери випарного типу. Кондиціонери цього типу мають достатньо значні переваги порівняно з широко розповсюдженими зараз кондиціонерами з паро-компресійною установкою, а саме: прості по конструкції, не вимагають кваліфікованого обслуговування, екологічно нешкідливі, мають низьку споживану потужність, саморегульовані по ефективності охолодження в залежності від температурно-вологісного стану охолоджуваного повітря [1].

Основними ж недоліками кондиціонерів випарного типу, які зараз випускаються, є перезволоження повітря, що створює дискомфортні умови в охолоджуваних приміщеннях, та неможливість досягнення у більшості випадків температури, яка відповідає температурі точки роси. Це значно обмежує можливість використання кондиціонерів такого типу в умовах підвищеної вологості та достатньо низьких температур.

На протязі вже довгого часу здійснюються спроби виправити вищенаведені недоліки кондиціонерів випарного типу. Серед них можна відмітити, наприклад, встановлення додаткового теплообмінника (рис. 1), що за задумом авторів [2] зможе достатньо ефективно знизити температуру повітря, яке обробляється, а також дозволить використовувати кондиціонер для охолодження повітря в приміщенні не тільки за рахунок припливу зовнішнього повітря, але і у режимі рециркуляції повітря приміщення. У цьому випадку необхідно повітря приміщення, що рециркулює, пропускати через сухі канали додаткового теплообмінника, у яких воно охолоджується без зміни свого вологовмісту в ме-

жі до температури точки роси. У вологі канали додаткового теплообмінника надходить основний потік повітря з установки, у них він нагрівається (за рахунок відбору теплоти від потоку повітря, що рециркулює) і зволожується (за рахунок випару води на поверхні вологих каналів) і в цьому стані викидається в атмосферу.

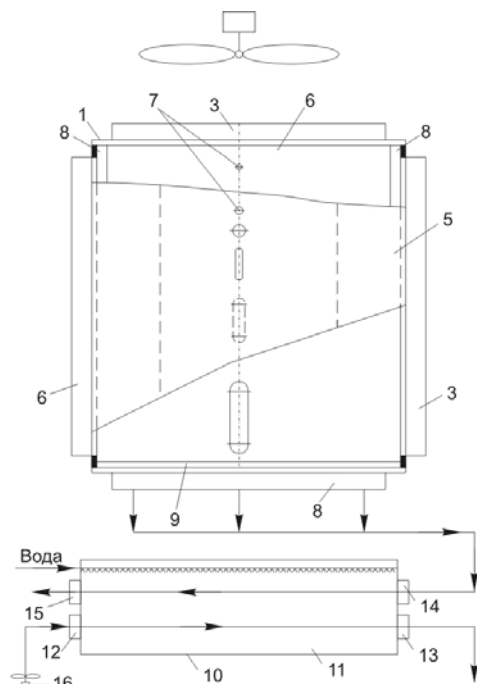


Рис. 1. Принципова схема комбінованої установки для непрямо-випарного охолодження повітря з додатковим теплообмінником:

1 – корпус; 2 – патрубок входу загального потоку; 3 – патрубок виходу допоміжного потоку; 4, 5 – теплообмінні пластини; 6 – додатковий патрубок виходу допоміжного потоку; 7 – наскрізні отвори; 8, 9 – герметичні заглушки; 10 – додатковий теплообмінник; 11 – сухі канали; 12, 13 – патрубки входу і виходу сухих каналів; 14, 15 – патрубки входу і виходу вологих каналів; 16 – вентилятор або насос

Реалізація вищевказаного варіанта дозволяє охолоджувати, якщо буде потреба, не тільки повітря, але і будь-яку текучу речовину. Також є можливим розділення пропонованої установки, що складається з установки для непрямовипарного охолодження повітря і додаткового теплообмінника, на два блоки, один із яких встановлюється поза приміщенням, а інший усередині нього. Це призводить до зниження шуму від вентиляторів повітря та істотного зменшення габаритів блоку установки, розташованого усередині приміщення.

Іншим можливим варіантом конструкції [3] є встановлення вихрової труби в якості додаткового модулю з метою підвищення ступеня охолодження повітря. Потік повітря у вихровій трубі розділяється на холодний і гарячий потоки. Перший з яких надходить до споживача, а другий – у вхідний патрубок кожуха, де, контактуючи з адсорбуючим матеріалом, здійснює видалення з нього вологи, яку цей матеріал поглине із загального потоку повітря в каналах. У результаті такого конструктивного виконання установки підвищується ступінь охолодження повітря і одночасно не потрібні для неї додаткові джерела тепла для регенерації адсорбуючого матеріалу.

Ще один комбінований варіант схемного рішення установки кондиціонування повітря містить у собі блок охолоджувача непрямовипарного типу та холодильну машину [4]. При такій схемі установка кондиціонування повітря здатна охолодити зовнішнє повітря в обсязі необхідної санітарної норми. В якості допоміжного потоку повітря може використовуватися як зовнішнє повітря, так і охоложене повітря із приміщення. При цьому зовнішнє повітря охолоджується в «сухих» каналах охолоджувача і потім подається в загальну систему кондиціонування повітря. Далі відбувається охолодження та осушка повітря у випарнику холодильної машини, після чого воно подається в приміщення.

Авторами статті була запропонована і подана заявка на корисну модель нової схеми комбінованої установки кондиціонування повітря, що містить у собі випарник непрямовипарного типу та модуль термоелектричних батарей [5]. Модуль термоелектричних батарей призначений для додаткового підсушування (зниження вологості повітря до допустимих величин відповідно до санітарних норм) і охолодження повітря перед подачею його в приміщення, яке кондиціюється. У порівнянні з розглянутими раніше схемними рішеннями, термоелектричні

батарей мають цілий ряд переваг: абсолютна безшумність роботи, відсутність рухомих частин і робочих рідин, можливість роботи в будь-якому просторовому положенні, малий розмір і вага системи охолодження, висока надійність, можливість реалізації охолодження та підігріву в одному блоці, простота керування і можливість прецизійного регулювання температури. Крім того, немаловажним моментом може слугувати значне зниження вартості термоелектричних модулів у зв'язку зі значним розширенням області їхнього застосування, а також наявності підприємств, які виробляють термоелектричні елементи на території України.

Однак, незважаючи на настільки значні переваги, основним недоліком таких модулів є коефіцієнт корисної дії термоелектричних елементів, що не перевищує в цей час 20 %. Звісно саме такий низький ККД заважає повсюдному впровадженню термоелектричних кондиціонерів.

Тому в даному схемному рішенні було запропоновано використовувати термоелектричний модуль як допоміжний блок при роботі в літній період (основна ціль – зниження вологості повітря) і як тепловий насос у зимовий період. Це дозволить мінімізувати вплив низького ККД термоелектричного модуля на загальну енергетичну характеристику комбінованої установки кондиціонування повітря.

У літній період попередньо оброблене повітря надходить із сухих каналів випарного модуля в канал термоелектричного блоку. Повітря при проходженні по каналу охолоджується та відбувається збільшення відносної вологості до 100 %, що приводить до конденсації частини вологи з повітря на ребрах радіатора. І це дозволяє на виході з термоелектричного блоку одержати повітря, характеристики якого відповідають необхідним санітарним нормам.

З огляду на можливість досить простого регулювання холодопродуктивності термоелектричних елементів, можна використовувати запропоноване схемне рішення комбінованої установки кондиціонування повітря у всьому кліматичному діапазоні температур на території України.

Розрахункова модель розглянутого термоелектричного блоку представлена на рис. 2. З метою інтенсифікації процесів тепло- та масообміну, робоча поверхня термоелементів обладнана радіатором зі штирями конічної форми, які розташовані в коридорному порядку. У ході розрахунків характеристики повітря, що надходить у термоелектричний блок, і геомет-

ричні параметри каналу узгоджуються з параметрами повітря на виході із сухих каналів випарного блоку та об'ємною витратою повітря, що безпосередньо подається споживачеві.

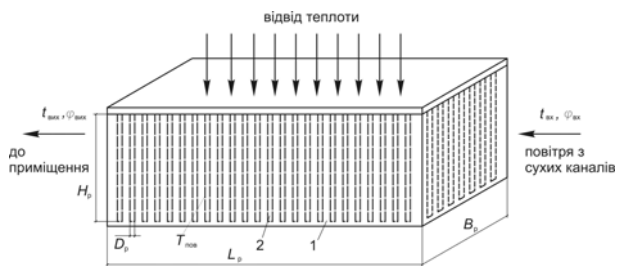


Рис. 2. До математичної моделі термоелектричного блоку:

1 – канал повітроводу; 2 – ребра радіатора

Розрахунок виконується методом послідовних наближень до досягнення необхідної заданої точності. При цьому на першому наближенні температура на виході з радіатора приймається на один градус менше, ніж на вході, а при кожному наступному наближенні зменшується ще на певний крок. Основними рівняннями, що входять в математичну модель є:

1. Рівняння конвективного теплообміну від поверхні радіатора до потоку повітря:

$$Q_1 = \alpha_{\text{сер}} \cdot \left(\pi \cdot D_p \cdot H_p \cdot N_p + \left(B_p \cdot L_p - \pi \cdot D_p^{0.5} \cdot N_p \right) \right) \cdot (t_{\text{сер}} - t_{\text{п}}). \quad (1)$$

Коефіцієнт тепловіддачі у формулі 1 розраховується з урахуванням рядності розташування штирів радіатора.

2. Рівняння теплового балансу для потоку повітря, що проходить по каналу:

$$Q_2 = V_{\text{пов}} \cdot c_{\text{п}} \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{вих}}). \quad (2)$$

3. Масова витрата конденсату, що осідає на поверхні радіатора

$$M = j \cdot \left[\pi \cdot D_p \cdot H_p \cdot N_p + \left(B_p \cdot L_p - \pi \cdot D_p^{0.5} \cdot N_p \right) \right] \cdot 3600. \quad (3)$$

Математична модель має за мету одержання співвідношення для розрахунку масовіддачі з поверхні радіаторів стриженькового типу при обтіканні її вологим повітрям. Для цього використовується рівняння масовіддачі виду:

$$\text{Nu}_D = C \cdot \text{Re}^{0.5} \cdot [1 - p_s(t_{\text{сер}})]^{0.6} \times [p_s(t_{\text{сер}}) - p_s(t_{\text{пов}})]^{(1/3)}, \quad (4)$$

де C – коефіцієнт, який потребує уточнення в експерименті на основі вимірювань кількості конденсату, що створюється на охолоджуваній поверхні осушувача.

З метою оцінки розрахункових даних та перевірки можливості якісного функціонування такого схемного рішення комбінованої установки кондиціонування повітря було створено експериментальну установку, схема якої наведена на рис. 3.

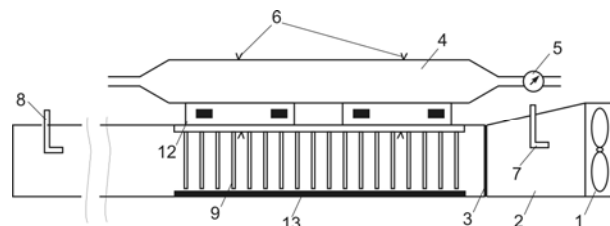


Рис. 3. Схема експериментальної установки термоелектричного модуля

Вентилятор 1 забезпечує подачу повітря в канал 2 у об'ємі до 40 м³/год. З метою створення рівномірного розподілу потоку повітря по всій площі каналу після вентилятора встановлений розсікач. Потік повітря після проходження розсікача омиває конічні штирі алюмінієвого радіатора та проходить додаткову ділянку каналу за радіатором і викидається назовні.

В установці застосовані дві однокаскадні термоелектричні батареї типу «Селен» С2-7. Ці батареї характеризуються оптимальним струмом на рівні 30 ± 3 А та напругою не більше 2 В. Крім того, максимальний досяжний перепад температур становить 50 °С. З боку гарячих спаїв термоелектричних батарей розташований теплообмінник, через який проходить вода з водопроводу, яка дозволяє відвести теплоту з гарячих спаїв батарей. Алюмінієвий радіатор з конічними штирями розташований з боку холодних спаїв батарей. При цьому його плоска частина стикається з батареями, а реберна частина розташована в повітряному каналі.

Витрата води через охолоджуючий теплообмінник контролюється лічильником холодної води 5. Вимір напору повітря до та після радіатора здійснюється за допомогою мікроманометра, з'єданого з насадкою Піто-Прандтля 7 і 8. Вимір відносної вологості атмосферного повітря перед надходженням в установку та на виході виконується за допомогою термогігрометру CENTER-311, що обладнаний двома температурними датчиками і датчиком для виміру відносної вологості. При цьому одержувані в ході виміру параметри в режимі реального часу передаються на персональний комп'ютер з можливістю виставляння кроку знімання показань від 2 секунд. Точність виміру температури та відносної вологості становить 0,1 °С і 0,1 % відповідно. Для знімання значень температури із зовнішньої сторони теплообмінника та із

плоскої частини радіатора з боку холодних спайів батарей використовуються електронні термометри фірми Dallas 18B20 з точністю виміру 0,5 °С, кожний з яких обладнаний власним індикатором, що показує значення температур. Також для виміру маси вологи, що виділяється за час дослідів, під ребрами радіатора розташований поролон 13, що зважується до та після кожного дослідів на електронних вагах з похибкою не більше 1 грама. Барометричний тиск визначається за допомогою лабораторного ртутного барометра. Електричні параметри (напруга і сила струму) контролюються незалежно на кожній термоелектричній батареї за допомогою цифрових мультиметрів.

На початку проведення дослідів в обов'язковому порядку забезпечується циркуляція водопровідної води через теплообмінник 4, щоб уникнути виходу з ладу термоелектричних батарей 12. Після цього здійснюється подача електричної енергії на батареї з початковими параметрами по струму 10 А. З метою зниження впливу теплообміну з навколишнім середовищем і через плоску частину алюмінієвого радіатора знімання даних з контрольно-вимірювального устаткування починається тільки через 15...20 хвилин із часу початку дослідів. Виміри виконувались з інтервалом 2...5 хвилин зі збільшенням сили струму на 5 А через кожні 15 хвилин. Сила струму збільшувалась до 30 А із суворим контролем напруги, яка не мала перевищувати 2 В.

У ході проведення ряду дослідів вдалося досягти різниці між спаями термоелектричних батарей порядку 25 °С при температурі навколишнього середовища 18 °С, а також значного зростання відносної вологості з 36,4 % до 87,4 °С на вході та виході в повітряний канал експериментальної установки, відповідно. Подальшого збільшення різниці температур і досягнення відносної вологості 100 % одержати в цих дослідах не вдалося у зв'язку із недостатньою добротністю термоелектричних батарей,

оскільки при подальшому збільшенні струму спостерігалось значне зростання температури холодних спайів батарей.

Тим не менш, проведені дослідження підтвердили можливість якісної роботи запропонованого схемного рішення системи кондиціонування повітря, а це значною мірою може вирішити проблеми, які властиві кондиціонерам випарного типу. Крім того, використання в конструкції комбінованої установки кондиціонування повітря модуля термоелектричних батарей дозволяє значно розширити річний час експлуатації кондиціонера за рахунок можливості використання його в режимі теплового насоса.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Шацкий В. П. Выбор оптимальных режимов работы охладителей воздуха водоиспарительного типа // Теплоэнергетика, 1995, № 9. – С. 62-64.
2. Патент № 2046257. Российская Федерация. Установка для косвенно-испарительного охлаждения / В. С. Майсоценко, Н. П. Видяев, В. Н. Челабчи, Я. А. Максименюк, Г. П. Орлов, В. Н. Герасимов, Л. Н. Соболев, А. П. Коноводов (Украина). – 11 с.; Опубл. 20.10.1995, Бюл. № 2.
3. Патент № 866348. СССР. Установка для косвенно-испарительного охлаждения воздуха / В. С. Майсоценко, А. Б. Цимерман, М. Г. Зексер (Украина). – 3 с.; Опубл. 23.09.1981, Бюл. № 35.
4. Яковенко И. А. Новое в кондиционировании воздуха: косвенно-испарительная рекуперативная установка (КИРУС) / И. А. Яковенко, Е. А. Соловцов, А. Б. Цимерман // Журнал «Отопление. Водоснабжение. Вентиляция. Кондиционеры.», № 3. – К., 2005.
5. Христьян Є. В. Обґрунтування вибору системи кондиціонування повітря для кабін локомотивів / Є. В. Христьян, І. В. Титаренко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 18. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007.

Надійшла до редколегії 31.03.2008.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІКИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

У пропонованій статті розглянуті системи кондиціювання повітря випарного та розпилювального (водяні та повітряно-водяні) типів, проаналізовані їхні переваги і недоліки, запропонована нова схема кондиціонера.

В предлагаемой статье рассмотрены системы кондиционирования воздуха испарительного и распылительного (водяные и воздушно-водяные) типов, проанализированы их достоинства и недостатки, предложена новая схема кондиционера.

In the article the evaporation cooling and spray (aqueous and air-to-water) types of the air-conditioning systems are considered, their merits and demerits are analyzed; the new scheme of a conditioner is offered.

В останнє десятиліття у світовій практиці відбуваються істотні концептуальні зміни, що стосуються, зокрема, техніки кондиціювання повітря. Значне поширення одержують кондиціонери випарного та розпилювального типів. Серед них найбільш уживаними є пристрої випарного типу і розпилювальні (водяні та повітряно-водяні).

У кондиціонерах випарного типу повітря проходить вздовж панелей, які змочуються водою, в результаті чого за рахунок плівчастого випару води відбувається відбір з поверхні водяної плівки неявної теплоти і насичення повітря водяною парою.

Відомі два варіанти конструктивного виконання зволожувачів даного типу:

- з рециркуляцією води, що характеризується небезпекою розмноження бактерій і можливістю поширення інфекційних захворювань;
- без рециркуляції, що характеризується більшою витратою води, яка тільки в кількості 15–30% використовується за прямим призначенням, тобто випаровується та зволожує повітря, що обробляється.

Кондиціонери розпилювального типу (повітряно-водяні) здійснюють розпилювання води за допомогою форсунок, до яких по окремих трубопроводах подають воду та стиснене повітря [1].

До недоліків даного типу зволожувачів відноситься досить значна довжина вільного пробігу утворених дрібних крапель води, що поширюються в супутньому потоці стисненого повітря. У результаті повітряно-водяні зволожувачі найчастіше використовуються для об'ємного зволоження повітря безпосередньо усередині приміщення. Даний тип зволожувачів вимагає наявності на об'єкті системи стисненого повітря або установки компресора необхідного напору і продуктивності.

Водяні зволожувачі повітря розпилювального типу відносяться до адіабатичних зволожувачів, у яких розпилення води, в якій відсутні мінерали, здійснюється без використання системи стисненого повітря. Позитивною властивістю їх є можливість формування розподільної стійки із заданим поперечним перерізом, що забезпечено спеціальними програмними засобами, які надають можливість із використанням персонального комп'ютера конструювати та комплектувати зазначені стійки, що вбудовуються в існуючий центральний кондиціонер, або вриваються в припливний повітропровід. Це здобуває особливу актуальність при необхідності реконструкції існуючих систем кондиціювання і вентиляції без істотних переробок, залишаючи придатні до подальшої експлуатації вузли та елементи систем.

Як повітряно-водяні, так і водяні зволожувачі, на відміну від зволожувачів випарного типу, використовують біля 90 % води за прямим призначенням. Таким чином, ефективність використання води в зволожувачах обох типів становить близько 0,9.

Охолодження повітря при безпосередньому контакті з водою (адіабатичне) не є процесом, що призводить до вироблення холоду, тому що ентальпія повітря в цьому процесі не змінюється.

Процес одержання холоду за рахунок використання психометричної різниці температур найпростішим способом реалізується в установках непрямо-випарного охолодження повітря, де повітря охолоджується сухою поверхнею, що із протилежного боку охолоджується водою, яка випаровується. Для здійснення процесів переносу теплоти та вологи при непрямо-випарному охолодженні повітря необхідним є наявність двох потоків повітря:

- корисного основного потоку, теплота від якого передається шляхом конвекції через розділяючу стінку теплообмінника без безпосереднього контакту з водою. Це повітря охолоджується зі зниженням його ентальпії та подається в приміщення, що кондиціонується;

- допоміжного потоку, у якому відбувається випар води, що сприйняла теплоту через розділяючу стінку від основного потоку. Процес у допоміжному потоці протікає зі збільшенням вологовмісту та ентальпії повітря, тому це повітря не придатне для цілей охолодження приміщень і викидається назовні. Температура води, що випаровується, в установках непрямо-випарного охолодження повітря завжди вище температури точки роси початкової температури охолоджуваного повітря. Саме тому процес його охолодження протікає при постійному вологовмісті.

Розглянемо докладніше зволожувачі випарного типу (використана інформація ТОВ «Вітор»).

Кондиціонери випарного типу (кулери): у них немає ні компресора, ні теплообмінників, ні холодоагенту. Виконання функції охолодження забезпечується випаром води. Однак в умовах вологого клімату досягти довгострокового ефекту кулером неможливо – через 1...2 години вологість в охолодженому приміщенні досягає 90...95 % і температура знову піднімається. В зволожувачах випарного типу повітря проходить крізь панелі, які змочуються водою, у результаті чого за рахунок плівкового випару відбувається насичення повітря парами води. Оскільки випарні охолоджувачі використовують як холодоагент просту воду, що випаровується в процесі проходження теплого зовнішнього повітря через фільтри, що змочуються водою, і при цьому викидається разом з охолоджуваним повітрям у приміщення, вологість повітря у ньому зростає. Така додаткова вологість не відчутна для людського організму, а також для тварин і рослин, якщо триматися одного з основних правил ефективного функціонування охолоджувачів випарного типу – скільки повітря подано в приміщення через охолоджувач, стільки ж повинно бути видалено з приміщення через відкриті прорізи, а де їх недостатньо, і через додаткові витяжні вентилятори. У протилежному випадку вологість у приміщенні може досягти такого рівня, при якому почне негативно позначатися на комфортності людей, що перебувають у приміщенні. Звідси можна зробити висновок, що такі охолоджувачі незамінні в приміщеннях, де не можна забезпечити повну ізоляцію приміщення від зовніш-

нього середовища для установки систем кондиціонування інших типів. Зовнішнє повітря надходить у приміщення тільки через охолоджувачі, створюючи при цьому трохи більше в порівнянні із зовнішнім тиском у приміщенні. Тому брудне зовнішнє повітря не в змозі проникнути в приміщення через відкриті вікна та двері.

Охолоджувачі випарного типу ефективно працюють при відносній вологості зовнішнього повітря до 60 %. Ефективність їхньої роботи зростає при зменшенні відносної вологості зовнішнього повітря та збільшенні зовнішньої температури. Однак вони досить добре експлуатуються і при більш високих рівнях відносної вологості (до 80 %). У цих випадках кількість змін повітря в приміщеннях повинне бути більшим, ніж рекомендується звичайно для конкретної кліматичної зони (до 60 змін повітря протягом години).

Розглянуті охолоджувачі (кондиціонери) сприятливо впливають на людей, тварин і рослини на протигагу кондиціонерам всіх інших типів, включаючи кондиціонери компресорного типу. Вони не висушують повітря в приміщеннях, подають у приміщення 100 % свіжого зовнішнього охолодженого, зволоженого, очищеного, а в необхідних випадках і одоризованого відповідними компонентами. Вони сприятливо впливають і незамінні для людей, що страждають захворюваннями дихальних шляхів, включаючи астму та алергію. Вони знижують у приміщеннях рівень статичної електрики і їхнє застосування сприятливо впливає на предмети меблів, книги, квіти і таке інше.

Розглянемо, наскільки охолоджувачі можуть понизити температуру в приміщенні. Це залежить від відносної вологості та температури зовнішнього повітря. Наприклад, при температурі +25 °С та відносній вологості зовнішнього повітря 50 %, повітря в приміщенні буде охолоджене до +20 °С – зниження температури на 5 °С.

Однак створюваний рівень комфортності залежить не тільки від зниження температури повітря в приміщенні, але також і від швидкості переміщення повітря в приміщенні. Так, у першому випадку, реальне відчуття тепла організмом людини в результаті впливу на нього цих двох факторів (зниження температури та переміщення повітря) буде приблизно відповідати 16 градусам Цельсія, а в другому випадку – 21 градусу Цельсія. У цьому і полягає феномен охолоджувачів випарного типу при створенні необхідного рівня комфорту для людей, тварин і рослин. Необхідно також пам'ятати, що різниця температур між зовнішнім повітрям і по-

вітрям у приміщенні понад 7 градусів Цельсія вже є небезпечною для людей і тварин. При використанні охолоджувачів випарного типу в приміщенні створюється саме комфортна обстановка для людей і тварин.

Таким чином, до переваг охолоджувачів випарного типу можна віднести [2]:

- екологічну безпеку – відсутні екологічно небезпечні та токсичні хімічні елементи і з'єднання;

- високу економічність – витрата електроенергії на їхній привід в 3...5 разів менше, ніж в існуючих кондиціонерах;

- низьку вартість при виготовленні – конструкція не містить технологічно складних вузлів і дорогих матеріалів;

- кондиціонер подає в приміщення тільки зовнішнє повітря на відміну від існуючих конструкцій, працюючих виключно на рециркуляції, що приводить до зростання в повітрі приміщень шкідливої мікрофлори та запахів;

- важливою перевагою цього типу повітроохолоджувачів є наявність одного вентилятора, що істотно спрощує схему та здешевлює конструкцію;

- всі процеси в кондиціонері протікають при тиску, рівному атмосферному, тому особою герметичності установок не потрібно;

- кондиціонер може бути встановлений у стаціонарних або пересувних об'єктах;

- модульний дизайн дає широкі можливості модифікацій конструкцій і варіюванні потужності.

Але, за даними різних джерел, охолоджувачам випарного типу властиві деякі недоліки.

По-перше, як указувалось вище, охолоджувачі випарного типу ефективно працюють за умови, що відносна вологість зовнішнього повітря не перевищує 70...80 %. Якщо вологість вище цього рівня відносної вологості, охолоджувач повинен бути переведений у режим роботи вентилятора. При цьому, у районах з підвищеною відносною вологістю комфортні умови в приміщенні можуть бути досягнуті навіть в умовах відносної вологості зовнішнього повітря 80...100 % установленням більшої кількості охолоджувачів, що дає можливість збільшити кількість змін повітря в приміщенні аж до 60 за годину.

По-друге, у зимовий час, коли ззовні приміщення встановлюється мінусова температура та виникає ймовірність замерзання води в охолоджувачі, кондиціонер повинен бути відключений від мережі водопостачання і переведений у режим роботи тільки вентилятора. У результаті цього охолоджувач не може виконувати

свої функції, які забезпечують кондиціонування повітря, і, природно, він не зможе виконувати свою функцію очищення повітря від пилу та бруду, як очисник повітря, оскільки вода не буде надходити на фільтри охолоджувача. Однак, у цьому випадку можлива установка додаткових звичайних фільтрів, які встановлюються у звичайних системах вентиляції безпосередньо у повітропроводах, по яких повітря надходить у приміщення.

По-третє, дуже часто споживачі просто неправильно експлуатують їх, закриваючи, наприклад, вікна та двері при включенні апаратів на охолодження повітря, у результаті чого в приміщенні збільшується вологість і створюється дискомфорт.

Однак, з вищевказаними першими двома недоліками в багатьох випадках просто доводиться миритися, оскільки вигоди, одержувані в результаті застосування охолоджувачів випарного типу, мають значно більшу вагу, у порівнянні з наведеними вище недоліками, при ухваленні рішення про їхню установку на конкретних об'єктах, де установка інших систем або просто технічно неможлива або економічно не вигідна.

Провівши попередній порівняльний аналіз можна зробити такі висновки:

1. Випарний повітроохолоджувач дозволяє одержати максимальний ефект охолодження при мінімальних витратах повітря та води.

2. У результаті обробки статистичних даних по стану вологовмісту атмосферного повітря в різних кліматичних районах світу встановлено, що регенеративні випарники можуть забезпечити оптимальні та припустимі параметри повітря в приміщеннях на цих територіях, крім зони вологих тропіків і субтропіків.

3. Зволожувачі повітря випарного типу з рециркуляцією води не відповідають санітарно-гігієнічним вимогам. З метою забезпечення ефективного плівкового випару з поверхні, температура води підтримується в діапазоні температур 25...40°C. При відсутності дренажу в даних умовах після закінчення деякого часу у воді рециркуляційного контуру відбувається інтенсивна проліферація бактеріальної флори, що може приводити до поширення небезпечних інфекційних захворювань.

4. Зволожувачі повітря випарного типу без рециркуляції характеризуються надзвичайно більшою витратою води, лише невелика частина якої використовується корисним образом для зволоження повітря, що підлягає обробці. При постійно зростаючих розцінках на водопо-

стачання це приводить до підвищених експлуатаційних витрат.

5. Зволожувачі повітря випарного типу обох варіантів (з рециркуляцією та без рециркуляції води) не забезпечують регулювання кількості вологи, яка випарюється, із прийнятною точністю, у зв'язку із чим необхідним є використання конструктивної схеми центрального кондиціонера із двоступінчастим нагріванням оброблюваного повітря. Це приводить до істотного збільшення капітальних витрат.

6. Викладені вище факти служать підставою того, що фірми-виробники, у цей час домінуючі на ринку зволожувачів повітря, замість раніше широко розповсюджених зволожувачів випарного типу зосереджені на поставках зволожувачів розпилювального типу.

7. Повітряно-водняні зволожувачі розпилювального типу оптимальним образом відповідають завданням об'ємного зволоження повітря безпосередньо усередині приміщення. Даний тип зволожувачів вимагає наявності на об'єкті існуючої системи стисненого повітря або установки компресора необхідного напору і продуктивності.

8. Водяні зволожувачі оптимальним образом відповідають завданням зволоження повітря у складі секцій.

Проаналізувавши достоїнства і недоліки кондиціонерів випарного типу, можна дійти висновку про те, що переваги таких пристроїв забезпечують досягнення більш широкого охопту параметрів, що сприятливо впливають на клімат у приміщеннях, які кондиціонуються, у порівнянні із широко використовуваними в цей час кондиціонерами на основі парокомпресійних машин. Крім того, вони менше споживають електроенергії, екологічно безпечні, істотно дешевше у виготовленні, обслуговуванні та ремонті. Що ж стосується недоліків, то найбільш істотними з них є необхідність поповнення водою, залежність продуктивності від вологості навколишнього повітря, неможливість роботи в режимі теплового насосу.

З метою усунення зазначених недоліків була запропонована принципова схема кондиціонера [3], показана на рис. 1.

Новим є те, що запропонований кондиціонер обладнаний блоком конденсації вологи з повітря, який виконано з напівпровідникових термохолодильних елементів, на холодних спаях яких встановлено реберні радіатори – конденсатори вологи з охолодженого повітря, а на гарячих спаях розміщено водяний теплообмінник, який поєднується з додатковим охолоджуючим водоповітряним теплообмінником;

а також електрофільтром, розташованим у трубі, що подає повітря у «сухі» канали.

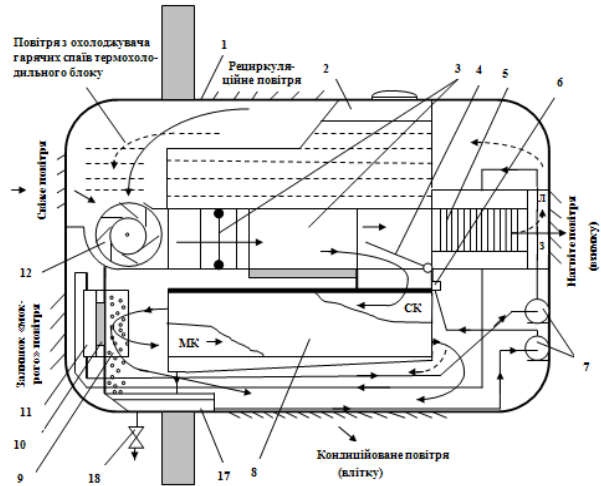


Рис.1. Принципова схема кондиціонера:

- 1 – корпус; 2 – бак для запасу води; 3 – електрофільтр;
- 4 – заслінка; 5 – теплообмінник; 6 – колектор з перфорованими трубками; 7 – мікронасоси для перекачування води; 8 – охолоджуючий випарний блок; 9 – реберні радіатори, на яких відбувається конденсація вологи з повітря; 10 – термохолодильні елементи; 11 – теплообмінник для охолодження гарячих спай термохолодильних елементів; 12 – вентилятор; 13 – пористе покриття «мокрих» каналів; 14 – «сухі» канали; 15 – «мокрі» канали; 16 – піддон випарного блоку охолоджувача повітря

Запропонований пристрій кондиціонування повітря в порівнянні з існуючими поєднує в собі корисні властивості аналогів, а саме, простоту конструкції та економічність кондиціонерів випарного типу, з можливістю реалізації роботи в режимі теплового насоса при мінімальній потребі в поповненні водою і незалежній ефективній роботі від кліматичних і погодних умов експлуатації; розширенні можливостей регулювання параметрів обробленого повітря як за температурою, так і за вологістю, а також за іонним складом та бактерицидними властивостями.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Маханько М. Г. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах и локомотивах / М. Г. Маханько, Ю. П. Сидоров, А. Хенач, М. Шмидт. – М.: Транспорт, 1981. – 254 с.
2. Михайлов М. В. Микроклимат в кабинах мобильных машин / М. В. Михайлов, С. В. Гусева. – М.: Машиностроение, 1977. – 230 с.
3. Христьян С. В. Обгрунтування вибору системи кондиціонування повітря для кабін локомотивів / С. В. Христьян, І. В. Титаренко. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 10. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 25-28.

Надійшла до редколегії 07.03.2008.

РАСЧЕТ БЕЗОПАСНОГО ВРЕМЕНИ РАБОТЫ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ НАКОПЛЕННОГО ИЗНОСА

Отримані наближені формули для остатнього ресурсу прогонових споруд в залежності від накопиченого зносу.

Получены приближенные формулы для остаточного ресурса пролетных строений в зависимости от накопленного износа.

Approximate formulae for the residual resource of spans in dependence on the wear accumulated are determined.

Основной целью решения задачи является определение в процессе технической диагностики времени, в течение которого элементы моста могут работать безотказно с заданной степенью надежности. Основными исходными данными для расчетов являются результаты технической диагностики и требуемые значения уровня надежности.

Установлено [1...6], что все параметры, входящие в расчетные формулы износа, являются случайными величинами, подчиняющиеся нормальному закону распределения. Поэтому значения износа также подчиняются нормальному закону. Тогда можно записать

$$\frac{\bar{I}_{cr} - \bar{I}_t}{\sqrt{(V_1 \bar{I}_{cr})^2 + (V_2 \bar{I}_t)^2}} \geq \gamma_n, \quad (1)$$

где \bar{I}_{cr} – математическое ожидание предельного значения износа; \bar{I}_t – математическое ожидание износа, установленное в процессе технической диагностики; V_1 и V_2 – коэффициенты вариации распределений соответственно I_{cr} и I_t ; γ_n – нормативное значение характеристики безопасности, определяемое в зависимости от уровня надежности.

Решением (1) определим значение износа, при котором обеспечивается заданная степень безопасности

$$I_t = \frac{I_{cr} - I_{cr} \gamma_n \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \gamma_n^2 V_1^2 V_2^2}}{1 - \gamma_n^2 V_2^2}. \quad (2)$$

При $V_1 = V_2$ выражение (2) упрощается и имеет вид

$$I_t = \frac{I_{cr} (1 - \gamma_n V \sqrt{2 + \gamma_n V^2})}{1 - \gamma_n^2 V_2^2}. \quad (3)$$

По результатам визуального обследования время с момента технической диагностики, при котором работа пролетного строения будет безотказной с надежностью P_n , с учетом (2), будет

$$\Delta T_{res} = \bar{T}_{res} - \frac{1}{0.011} \sqrt{\frac{1 - \gamma_n V (2 + \gamma_n V^2)^{1/2}}{1 - \gamma_n^2 V^2}}. \quad (4)$$

Остаточный ресурс, в течение которого пролетное строение будет работать безотказно с учетом карбонизации бетона, определяем, исходя из условия

$$\frac{\bar{\Psi}_{cr} - \bar{\Psi}_t}{\sqrt{(V_1 \bar{\Psi}_{cr})^2 + (V_2 \bar{\Psi}_t)^2}} \geq \gamma_n, \quad (5)$$

где $\bar{\Psi}_{cr}$ – математическое ожидание предельной величины меры накопления износа; $\bar{\Psi}_t$ – математическое ожидание меры накопления износа, установленное в процессе технической диагностики; V_1 и V_2 – коэффициенты вариации распределений соответственно Ψ_{cr} и Ψ_t .

Остаточный ресурс с учетом процесса коррозии арматуры

$$\Delta T_{res} = \frac{a \gamma_n^2 (V_1^2 \Psi_{cr}^2 + V_2^2 \Psi_t^2)}{k^2 c - \gamma_n^2 (V_1^2 \Psi_{cr}^2 + V_2^2 \Psi_t^2)}, \quad (6)$$

при $V_1 = V_2$

$$\Delta T_{res} = \frac{a \gamma_n^2 V^2 (\Psi_{cr}^2 + \Psi_t^2)}{k^2 c - \gamma_n^2 V^2 (\Psi_{cr}^2 + \Psi_t^2)}. \quad (7)$$

Остаточный ресурс с учетом прогибов (провисания)

$$\Delta T_{res} = \frac{\gamma_n a_f \sqrt{V_1^2 \Psi_{cr}^2 + V_2^2 \Psi_t^2}}{C_f - \gamma_n \sqrt{V_1^2 \Psi_{cr}^2 + V_2^2 \Psi_t^2}}, \quad (8)$$

при $V_1 = V_2$

$$\Delta T_{res} = \frac{\gamma_n a_f V (\Psi_{cr}^2 + \Psi_t^2)^{1/2}}{C_f - \gamma_n V (\Psi_{cr}^2 + \Psi_t^2)^{1/2}}. \quad (9)$$

Остаточный ресурс с учетом деградации в структуре бетона получается

$$\Delta T_{res} = T_{res} \frac{1}{N_{cr}} \left[1 - \frac{\Psi_{cr} - \gamma_n \sqrt{V_1^2 \Psi_{cr}^2 + V_2^2 \Psi_t^2}}{a_k} \right]^{-1/\alpha}. \quad (10)$$

Полученные формулы являются приближенными, так как входящие в формулы другие параметры также имеют случайный характер. Учет случайности всех расчетных параметров приведет к сложным зависимостям, трудно используемым в практических расчетах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 446 с.
2. Бондаренко В. М. Надежность строительных конструкций и мостов / В. М. Бондаренко, Л. И. Иосилевский, В. П. Чирков. – М.: Изд-во Академии Архитектуры и строительных наук, 1996. – 220 с.
3. Васильев А. И. Долговечность железобетонных мостов и меры по увеличению сроков из службы / А. И. Васильев, В. П. Польовко // Автомобильные дороги, 1995, № 9. – С. 30-32.
4. Веселев Ю. А. Основы теории надежности строительных конструкций / Ю. А. Веселев, Д. Б. Демченко. – Ростов-на-Дону: Терра, 2001. – 127 с.
5. Иосилевский Л. И. Проблемы надежности железобетонных мостовых конструкций // Бетон и железобетон, 1999, № 1. – С. 23-26.
6. Мамажанов Р. Вероятностное прогнозирование ресурса железобетонных пролетных строений. – Ташкент: Фан, 1993. – 156 с.

Поступила в редколлегию 15.12.2007.

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА МОСТОВ

У статті представлені основні концептуальні міркування стосовно розробки і реалізації системного підходу до створення моніторингу мостових споруд. Особливою рисою сучасного аспекту моніторингу мостів є перехід від вимог забезпечення надійності до вимог забезпечення усієї сукупності споживацьких якостей споруд. Сформульовані критерії діагностики експлуатаційної надійності мостів як фундаментальної мети моніторингу.

В статье представлены основные концептуальные соображения по разработке и реализации системного подхода к созданию мониторинга мостовых сооружений. Отличительной особенностью современного аспекта мониторинга мостов является переход от требований обеспечения надежности к требованию обеспечения всей совокупности потребительских качеств сооружений. Сформулированы критерии диагностики эксплуатационной надежности мостов как фундаментальной цели мониторинга.

The major concepts of the elaboration and realization of the bridge construction monitoring systemic approach are presented in this paper. The main peculiarity of the bridge monitoring modern aspect is pointed out here, namely, the transition from the demands of providing the reliability to the demands of providing the whole complex of the structure consumer qualities. The criteria of diagnostics of the bridge exploitation reliability as the fundamental aim of monitoring are formulated here.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции мирового мостостроения обусловлены разнообразием архитектурных форм и конструктивных решений. Следствием этого являются проблемы идеализации реальных мостовых сооружений, т.е. выбора расчетных схем, адекватно отображающих не только статическую, но и динамическую пространственную работу сооружений в поле многообразных нагрузок и воздействий различного происхождения.

Причины возможных отказов сооружений в целом или отдельных их частей при монтаже и в процессе эксплуатации очень часто обусловлены неадекватностью выбора расчетных схем. Отсюда очевидна необходимость оценки фактических значений параметров статической и динамической жесткости (с учетом частот внешних динамических воздействий и диссипативных свойств конструкций) уже на начальной стадии длительной эксплуатации. Именно на этой стадии роль мониторинга для уникальных, комплексно-многомерных, конструктивно неоднородных, композитных (сталь и железобетон, алюминий) и других сложных мостовых сооружений трудно переоценить, особенно для уточнения расчетных моделей, а также для оценки реакции мостов и отдельных их частей на внешние воздействия.

Фундаментальные идеи динамической интегральной диагностики состояния конструкций

как наиболее эффективного компонента мониторинга мостов были сформулированы в 70-80 гг. в работах [1...4]. Их дальнейшее развитие в работах [5...13] оказало позитивное влияние на решение реальных проблем обеспечения эксплуатационной надежности, как мостов, так и других классов сооружений.

В качестве убедительной иллюстрации эффективности мониторинга инженерных конструкций следует отметить как результаты многолетних исследований работы уникальных вантовых мостов – газопровода через р. Амударья в Афганистане пролетом 660 м в течение 1973...1991 гг. [1, 2] и аммиакопровода через р. Днепр на Украине пролетом 720 м с 1979 г. по настоящее время [4], так и мониторинг главного монумента Победы на Поклонной горе в г. Москве, организованный в 1995 г. и осуществляемый по настоящее время, а также мониторинг вантово-арочного моста в Серебряном Бору в г. Москве (на стадии реализации проекта).

Диагностика эксплуатационной надежности

Проблема надежности конструкций по Н. С. Стрелецкому связана с критерием неразрушимости. Статистическая мера неразрушимости, названная им гарантией неразрушимости, связана с рассмотрением и анализом известного «треугольника Стрелецкого».

При всей совокупности проблем надежности не следует ни противопоставлять, ни формально сопоставлять вопросы теории надежности

строительных конструкций и проблемы эксплуатационной надежности реальных инженерных сооружений. По своей сути это пересекающиеся множества. Причем, первое из них с полной уверенностью можно отнести к нечеткому множеству (**fuzzy set**) с размытыми границами, нечеткой логикой и набором лингвистических характеристик^{*)}, коррелирующих с типом и назначением строительных конструкций, моделью той или иной теории надежности.

Второе множество должно быть наполнено конкретным содержанием. В частности, необходимо сформулировать в приоритетном порядке критерии качества эксплуатационной надежности в зависимости от конструктивной формы сооружения, нагрузок и воздействий, а также целого ряда физических, экономических, экологических и иных факторов.

Из большого разнообразия признаков качества надежности к наиболее важным и существенным применительно к мостовым конструкциям следует отнести безотказность, расчетную долговечность, безопасность и ремонтпригодность.

Под безотказностью понимают эксплуатационную надежность сооружений в целом и их отдельных элементов. Расчетная долговечность – это расчетный срок службы (или ресурс) при заданной обеспеченности нагрузок такого вида, как ветровая, снеговая, сейсмическая, ветровое волнение и др. Безопасность конструкций предполагает также их надежность по отношению к биосфере, т.е. к жизни и здоровью людей или состоянию окружающей среды при учете таких факторов, как редкие стихийные воздействия, не предусмотренные условиями нормальной эксплуатации, грубые ошибки на стадиях проектирования, изготовления, строительства или эксплуатации конструкций. Ремонтпригодность конструкций характеризует конструктивную форму с точки зрения условий нормальной эксплуатации и возможности вы-

^{*)} Понятие «надежность» аналогично понятию «устойчивость» за последние 5-6 десятилетий стало столь перегруженным, что сформировало нечеткое лингвистическое множество (**fuzzy linguistic set**). Удачной иллюстрацией нечеткого лингвистического множества «надежность» может служить словосочетание «надежный человек» аналогично словосочетанию «морально устойчивый человек» из другого нечеткого лингвистического множества «устойчивость». Очевидно, эти словосочетания не имеют ничего общего ни с теорией надежности, ни с теорией устойчивости.

полнения ремонтно-профилактических, восстановительных работ в процессе эксплуатации.

Безопасность мостовых конструкций как один из признаков качества надежности определяется также санитарным критерием диагностики, т.е. характером воздействия вибраций на организм человека. Любая вибрация оценивается по её физиологическому или психологическому воздействию на человека: комфорт с предельным порогом его снижения; обеспечение профессиональной деятельности с предельной границей снижения производительности труда вследствие усталости при выполнении строительных или ремонтно-восстановительных работ на сооружении, обеспечение безопасности и здоровья, которому соответствует предел воздействия.

К основным параметрам вибрации, обуславливающим санитарный критерий диагностики, относятся частотный состав и уровни характерных кинематических факторов – виброперемещений, виброскоростей и виброускорений, направление, регулярность (повторяемость) вибрации, длительность воздействия на человека (доза) вибрации.

Большую роль в оценке эксплуатационной надежности, долговечности и безопасности конструкций играют натурные обследования, испытания и длительные наблюдения. Они служат достоверной основой диагностики мостовых конструкций. В то же время на особо важных и уникальных мостовых сооружениях необходимо организовать:

- постоянные натурные наблюдения с целью оказания технической помощи при эксплуатации;
- уточнения метеорологического и сейсмометрического микрорайонирования и соответствующих метеорологических и сейсмических воздействий – зонинг;
- изучение реакции мостовых конструкций на реальные воздействия;
- обнаружение явлений динамической и аэроупругой неустойчивости.

Это позволяет обосновано диагностировать состояние конструкций и в необходимых случаях разрабатывать мероприятия по повышению их надежности.

Критерии диагностики

Одним из доминирующих критериев диагностики конструкций являются их динамические свойства, выступающие в качестве интегральных оценок состояния. За последнее десятилетие разработаны современные эффектив-

ные методы и средства измерения динамических параметров конструкций, в том числе в инфранизкочастотном спектре (до 0,2 Гц), который характерен для большинства гибких пешеходных, а также висячих и вантово-балочных мостов различного назначения. К этим параметрам относят собственные частоты, формы и логарифмические декременты пространственных колебаний, параметры вынужденных колебаний. Сопоставляя эксплуатационные значения динамических параметров с их эталонными, паспортными значениями, теоретическими (расчетными) или экспериментальными, полученными при вводе сооружений в эксплуатацию, можно достаточно обосновано дать диагностику состояния конструкций. Динамическая интегральная диагностика мостовых конструкций аналогично диагностике судов и авиастроительных конструкций или атомных реакторов играет важную роль в обеспечении надежности сооружений и опирается на динамические методы экспериментальных исследований.

Опыт эксплуатации, многолетних наблюдений и диагностики ряда уникальных инженерных сооружений показывает, что систематический анализ их состояния позволяет не только содержать сооружения на требуемом уровне, но и своевременно осуществлять мероприятия по обеспечению эксплуатационной надежности и расчетной долговечности. При этом необходимо отметить, что диагностика конструкций служит составной частью эксплуатации сооружений и не требует дополнительных эксплуатационных затрат, за исключением средств на привлечение (не реже одного раза в 5 лет) специализированных организаций для инструментальных измерений, геодезической съёмки и некоторых других видов работ.

Наряду с интегральными динамическими критериями диагностики состояния конструкций, широкое распространение могут получить критерии, оценка которых дифференцируется поэлементно в результате выполнения комплекса инструментальных измерений. К этому комплексу следует отнести:

- измерение перемещений несущих элементов конструкций в вертикальной и горизонтальной плоскостях под действием силовых факторов, в том числе метеорологического воздействия, что позволяет определить фактическую жесткость и деформативность элементов и сооружения в целом;

- измерение усилий и напряжений в узлах и элементах;

- геодезические измерения пространственного положения (геометрии) элементов и узлов сооружения.

Мониторинг мостов

Мониторинг мостовых конструкций должен получить широкое распространение для оценки их состояния в процессе эксплуатации. В самом обобщенном смысле мониторинг конструкций – это наблюдение, анализ и прогноз. При этом наблюдение предусматривает визуальное и инструментальное описание параметров нагрузок и воздействий различной природы, а также статическое и динамическое поведение сооружения в целом и отдельных его элементов в пространстве реальных нагрузок и воздействий, которое в данном случае трактуется как реакция конструкций на внешние воздействия. Анализ предполагает сравнение фактических параметров нагрузок и воздействий в реальных условиях эксплуатации с их расчетными значениями. Это необходимо для уточнения обеспеченности внешних воздействий и достоверности расчетных схем.

Составленный на основе наблюдений и оценок прогноз состояния конструкций имеет особое значение в мониторинге. Он позволяет обоснованно судить об остаточном ресурсе конструкций и в необходимых случаях активно влиять на повышение надежности в процессе эксплуатации. Достоверность прогноза обуславливается качеством программы наблюдений, оснащения приборами и аппаратурой, средств обработки и анализа результатов наблюдений.

Цель мониторинга – сбор и анализ информации о прочности, устойчивости, жесткости, надежности и расчетной долговечности конструкций, а также о комфорте людей в процессе монтажа и эксплуатации. Следовательно, наряду с традиционными признаками качества надежности – безотказность, безопасность, расчетная долговечность, ремонтпригодность – рассматриваются и экологические признаки, которые в первую очередь отождествляются с санитарными критериями уровня и дозы вибрации.

Таким образом, проект мониторинга должен составляться в соответствии с необходимой целесообразностью уточнения реального поведения мостового сооружения в поле внешних воздействий и нагрузок и оценки остаточного ресурса в процессе эксплуатации. Мера необходимой целесообразности, определяющая масштабы мониторинга, должна определяться

авторами проекта мостового сооружения по согласованию с заказчиком, балансодержателем и эксплуатирующей организацией на основе индивидуальных специфических особенностей каждого сооружения и проблем его проектирования. Это обусловлено юридической ответственностью авторов проекта за безотказность, долговечность, безопасность и ремонтпригодность мостового сооружения в течение всего срока его существования.

Мониторинг мостовых конструкций массового применения может быть основан на базе атласа отказов (дефектов), созданного при стендовых испытаниях эталонной конструкции, на которой можно моделировать различные типы дефектов, и динамическими испытаниями отслеживать влияние их на динамические параметры. При эксплуатации реальных конструкций по изменению динамических параметров по сравнению с паспортными значениями можно предсказывать тип дефектов (или группы дефектов).

При проектировании мостов сложных систем возникают вопросы, достоверные ответы на которые можно получить только при анализе фактической работы сооружения в поле реальных внешних воздействий и нагрузок.

Поэтому мониторинг большепролетных конструкций висячих и вантово-балочных мостов, а также особо важных сооружений осуществляется в индивидуальном порядке. Разрабатывается проект оснащения конструкций приборами и аппаратурой, средствами связи и коммуникаций для измерения динамических параметров работы сооружений в условиях реальных метеорологических, сейсмических, подвижных и технологических нагрузок.

На основе накопленного опыта динамической интегральной диагностики состояния конструкций, в частности, мостов больших пролетов, можно утверждать: по характеру изменений собственных частот пространственных колебаний, их форм и логарифмических декрементов колебаний и сдвигов фаз тип дефекта устанавливается с высокой степенью достоверности.

Особенности мониторинга при монтаже связаны с анализом изменений в процессе монтажа основных свойств конструкций, таких как жесткость, частоты собственных пространственных колебаний, виброускорения.

Цель мониторинга начального периода эксплуатации – уточнение нагрузок и воздействий; проверка соответствия реальной работы конструкций принятым в расчетах допущениям; ана-

лиз реакций конструкций на действие реальных нагрузок и воздействий; корректировка в случае необходимости расчета конструкций, а также инструкции по эксплуатации.

В процессе длительной эксплуатации мониторинг позволяет оценить:

- изменение динамических параметров сооружений и отдельных их элементов при эксплуатации;
- релаксационные и усадочные процессы в материалах конструкций;
- обоснованность назначений коэффициентов надежности по нагрузке, безопасности, условиям работы.

В качестве иллюстрации системного подхода к созданию мониторинга мостового сооружения ниже приведены соответствующие мероприятия на стадии разработки концептуальных соображений к программе, техническому заданию и проекту мониторинга вантово-арочного моста через реку Москва в Серебряном Бору г. Москвы.

Данное уникальное по назначению и ответственности сооружение значительно отличается от традиционных мостов:

- парадоксом спектра собственных частот пространственных колебаний системы «пролетное строение – арка – ресторан», состоящим в том, что в связи с отсутствием в пролетном строении неподвижных опорных частей низшей частоте соответствуют продольные колебания пролетного строения. Это, в свою очередь, потребовало установки специальных поглощающих устройств в торце пролетного строения, превращая инженерное сооружение в механизм, что принуждает к обязательному и постоянному вниманию службы эксплуатации сооружения;
- чувствительностью усилий в вантах к неравномерным осадкам опор арки и пролетного строения;
- наличием ресторана как объекта общественно-социального назначения со скоплением большого количества людей и возможным специфическим их поведением (танцы, пляски и т.п.), требующего постоянного внимания по допустимым уровням и дозам вибрации с точки зрения дискомфорта посетителей и обслуживающего персонала;
- необходимостью иметь непосредственно на мосту (или вблизи) помещений для службы эксплуатации, неснижаемого запаса материалов и оборудования, приборов и аппаратуры для обеспечения безопасной эксплуатации;
- пролетного строения;

- арки;
- опорных частей;
- поглощающих устройств;
- ресторана (в т.ч. для ликвидации снега и гололедо-изморозевых отложений);
- средств эвакуации посетителей и обслуживающего персонала ресторана;
- при плановых осмотрах ответственных узлов, стыков, швов и соединений, элементов несущих и ограждающих конструкций сооружения.

Отличительной особенностью современного аспекта мониторинга мостов является переход от требований обеспечения надежности к требованию обеспечения всей совокупности потребительских качеств мостового сооружения. Поэтому программа мониторинга включает следующие вопросы:

1. Фактическая работа всех опорных частей и деформативность опор и на этой основе уточнение расчетной схемы (модели) сооружения.

2. Изучение реального спектра частот и соответствующих им форм пространственных колебаний сооружения в целом и отдельных его составных частей (парциальных частот):

- пролетного строения;
- арки;
- вант;
- ресторана
- в системе «пролетное строение – арка – ресторан».

3. Измерение усилий в вантах.

4. Изучение продольного (по длине моста) и вертикального (по высоте арки) профилей скорости ветра.

5. Изучение реакции сооружения в целом и его отдельных элементов на реальные ветровые воздействия, в т.ч. вибрации вант; выявления динамической и аэроупругой неустойчивости.

6. Изучение влияния метеорологических параметров на образование гололедо-изморозевых отложений на вантах и других элементах сооружения.

7. Анализ уровня отложений снега на элементах конструкций сооружения, в том числе, на вантах и на внешней поверхности ресторана.

8. Изучение температурных деформаций конструкций.

9. Анализ работоспособности эксплуатационных качеств поглощающих устройств.

10. Геодезическая съемка пространственно-го положения пролетного строения (продольного и поперечного профилей) и арки.

11. Изучение динамического поведения платформы пола ресторана в горизонтальной и

вертикальной плоскостях и кручения относительно главных осей инерции ресторана при действии ветра, подвижной нагрузки на мосту, посетителей ресторана, в том числе уровней вибрации, с целью оценки дискомфорта посетителей и обслуживающего персонала.

12. Создание динамического паспорта сооружения.

13. Сопоставление реального ресурса сооружения и его составных частей (пролетного строения, арки, вант, поглощающих устройств, опорных частей, ресторана) с расчетной (проектной) долговечностью – 100 лет.

14. Разработка «Инструкции по эксплуатации» сооружения.

Особого внимания в процессе мониторинга заслуживает анализ эксплуатации ресторана и средств его жизнеобеспечения с точки зрения недружественного воздействия на окружающую среду. Кроме того, следует учитывать, что при эксплуатации мостового сооружения может возникнуть необходимость разработки и осуществления мероприятий по воспрепятствованию гнездования птиц в узлах конструкций арки. Многолетний опыт наблюдений за эксплуатацией мостов показывает, что это представляет реальную угрозу возникновения очагов ускоренной коррозии металла, а также иных неблагоприятных проявлений.

Технические средства мониторинга должны обеспечить выполнение цели во всех перечисленных выше аспектах и включают в себя:

- первичную аппаратуру и датчики;
- вторичную аппаратуру для регистрации информации;
- системы коммуникаций;
- микропроцессорную технику с современным программным обеспечением;
- энергетическое обеспечение функционирования измерительной и коммуникационной систем.

Функционирование технических средств мониторинга обуславливается наличием профессионально подготовленного персонала и специально оборудованного помещения.

Мониторинг впоследствии, в режиме длительной эксплуатации сооружения, должен стать составной и неотъемлемой частью функционирования службы эксплуатации с учетом постоянной модернизации всех технических средств мониторинга в связи с наиболее низким сроком их морального износа по сравнению с другими современными техническими средствами измерений и анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казакевич М. И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
2. Казакевич М. И. Наблюдения за аэродинамическим поведением висячего перехода газопровода Афганистан – СССР // Сб. ЦНИИС Госстроя СССР, серия VIII, Строительные конструкции. Строительная физика. – Вып. 4. – М.: ЦНИИС Госстроя СССР, 1977. – С. 17-20.
3. Казакевич М. И. Диагностика металлических конструкций и ее роль в обеспечении надежности сооружений // В кн.: «Развитие металлических конструкций: Работы школы Н. С. Стрелецкого» / Под ред. В. В. Кузнецова. – ЦНИИпроектстальконструкция. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 480-482.
4. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
5. Kazakevitch M. I. Stabilization of a Cable-Stayed Footbridge / M. I. Kazakevitch, V. V. Kulyabko // Proc. IABSE Symposium - 1995. – San Francisco (USA), 1995. – P. 1099-1104.
6. Kazakevitch M. I. Monitoring of Long-Span Steel Structures / M. I. Kazakevitch, V. V. Kulyabko // IX Int. Conf. on Metal Structures. – Krakow (Poland), 26-30 June, 1995. – P. 245-250.
7. Казакевич М. И. Введение в виброэкологию зданий и сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко. – Д.: ПГАСА, 1996. – 200 с.
8. Казакевич М. И. Динамическая интегральная диагностика металлоконструкций // Тр. Межд. конф. «Металлостроительство-96», Макеевка, 1996. – т. 1. – С. 9-11.
9. Казакевич М. И. Динамическая диагностика и мониторинг состояния строительных конструкций ответственных сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко // Тр. VI Украинской науч.-техн. конф. «Металлические конструкции». – Киев-Николаев, 1996. – С. 84-86.
10. Казакевич М. И. Мониторинг мостов в процессе монтажа и при эксплуатации / М. И. Казакевич, Г. Б. Фукс // Тр. Межд. конф. «Передовые технологии на пороге XXI века» (ICAT'98), Часть 1. – М., 1998. – С. 152-156.
11. Казакевич М. И. Актуальные проблемы динамики сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко // Металеві конструкції. УАМК. – т. 1, № 1. – 1998. – С. 65-74.
12. Горохов Е. В. Аэродинамика электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим / Под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк, 2000. – С. 223-227.
13. Горохов Е. В. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередач / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим / Под ред. Е. В. Горохова. – Донецк, 2005. – С. 278-282.

Поступила в редакцию 17.12.2007.

А. Б. КАЗАРИН, Б. А. КАЗАРИН, Д. Е. ГУСЕВ, Г. П. ПАСТУШКОВ, В. Г. ПАСТУШКОВ, Д. В. ЖИХАРЕВ (БНТУ, Минск, Республика Беларусь)

ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ТОННЕЛЕЙ

В статті наведені практичні та аналітичні аспекти методології дослідження обробки тунелів за допомогою георадарних технологій.

В статье приведены практические и аналитические аспекты методологии исследования обделки тоннелей с помощью георадарных технологий.

In the paper the practical and analytical aspects of research methodology for a tunnel casings by georadar technologies are presented.

Перегонные тоннели метрополитена с обделкой из монолитно-прессованного бетона возводятся обжатием свежей бетонной смеси, уложенной за кольцевую опалубку. Такая технология снижает трудоемкость работ по сравнению с сооружением тоннеля со сборной обделкой, однако существенным недостатком монолитно-прессованной обделки является низкая трещиностойкость неармированного бетона, и могут возникнуть различного характера дефекты и повреждения. Наличие трещин в обделке, чаще всего, сопровождается фильтрацией через обделку воды. Наличие водных потоков может также привести к разуплотнению грунта в контактной с обделкой зоне.

Известно, что обследование обделки тоннелей носит комплексный характер. Кроме визуального осмотра, проводится определение прочностных свойств бетона, испытание выбуриваемых образцов, а также используются виброакустические, сейсмические и георадиолокационные методы [1]. Эффективность использования георадиолокационного метода в значительной степени определяется выбранной технологией исследования: методикой измерений, методикой построения радиолокационных изображений подповерхностной среды, методикой интерпретации радиолокационных изображений.

В данной статье приводятся результаты георадарных измерений на одном из участков Минского метрополитена. В процессе измерений была использована современная методика измерений, основанная на теореме Боярского [2], и методика построения радиолокационных изображений (РЛИ), основанная на синтезе апертуры антенны [3], которые отличаются от рекомендуемых в нормативных документах

[4, 5]. Обследованный участок Минского метро был сооружен в 1980 г. Обделка тоннеля выполнялась из бетона марки М300 с использованием проходческого щитового комплекса ТЩБ-7. Участок перегонного тоннеля был сдан в эксплуатацию в 1984 г. (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид участка перегонного тоннеля

Во время проведения обследования тоннеля на поверхности обделки в отдельных местах были обнаружены отслоения бетона. В процессе эксплуатации на исследуемом участке в обделке стали возникать трещины и открытые отслоения бетона (рис. 2).

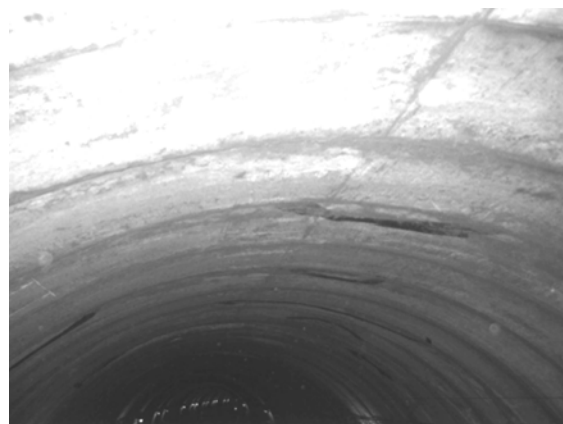


Рис. 2. Вид участка дефектной поверхности

В 1993 г. при простукивании обделки были зафиксированы дефектные места, в которых создавался глухой звук. Площадь таких дефектных мест не превышала 0,3...0,5 кв. м.

Для выявления причин прогрессирующего развития дефектов обделки, выявления скрытых дефектов и выработки мероприятий по их устранению в 2006 г. авторами был выполнен комплекс работ, включающий:

- изучение проектной документации;
- визуальное освидетельствование состояния обделки;
- исследование состояния конструкции с помощью георадара по всей длине участка тоннеля (рис. 3);



Рис. 3. Исследование состояния конструкции с помощью георадара

- исследование прочности бетона обделки с помощью склерометра и методом отрыва со скалыванием;
- отбор образцов бетона путем выбуривания кернов с последующим испытанием образцов в лабораторных условиях (рис. 4).

Радиолокационные измерения выполнялись с использованием георадара «ЗОНД-10» на частоте 150 МГц, с варьированием поляризационных параметров зондирующего сигнала. Совместная обработка временных зависимостей амплитуд отраженных сигналов с различной поляризацией позволила построить радиолокационные изображения зондируемых подповерхностных сред по относительной плотности и относительной влажности.



Рис. 4. Отбор образцов бетона путем выбуривания кернов

В общем случае, РЛИ представляет собой цветную (черно-белую) двумерную матрицу размером $m_1 \cdot L \cdot m_2 \cdot Z$ (где m_1 , m_2 – масштабные коэффициенты, L – длина профиля, Z – глубина зондирования), размеры ячеек которой соответствуют размерам разрешаемых георадаром объемов подповерхностной среды, а их цвет (отенок) – амплитудам сигналов, отраженных от соответствующих разрешаемых объемов.

Связь цветовых градаций в представленных ниже РЛИ с нормированными амплитудами отраженных сигналов и оценочными значениями пористости, водонасыщения и модуля упругости приведены в таблице.

Георадарные измерения были выполнены в плоскости профиля 1 через лоток тоннеля, в плоскости профиля 2 через вершину тоннеля и плоскости профиля 3 с дневной поверхности проезжей части проспекта Независимости.

Анализ РЛИ подповерхностной среды в плоскости профиля 1 (лоток, обделка, грунт) по относительной плотности (рис. 5) показал, что коэффициент пористости бетонного основания пути и обделки тоннеля в пределах обследованного участка периодически меняется от значения «очень плотный» до значения «рыхлый». Протяженность плотных участков составляет около 0,4 м, а интервалов между ними – около 3,0 м. Наблюдается неровная наружная поверхность тоннеля под основанием пути на РЛИ. Можно предположить, что цементный раствор в процессе нагнетания проникал в полости грунта. Грунты, залегающие под обделкой тоннеля на глубину до 4,0 метров, можно охарактеризовать, как «плотные» с прослоями «рыхлых».

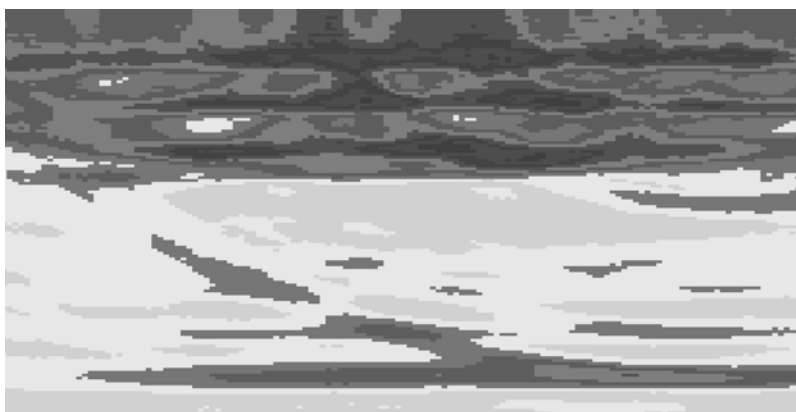


Рис. 5. РЛИ подповерхностной среды

Анализ РЛИ подповерхностной среды в плоскости профиля 1 по относительной влажности позволяет сделать вывод, что более разуплотненные участки бетонного основания пути являются и более влажными. На РЛИ отчетливо видны следы инфильтрации воды от поверхности лотка тоннеля до наружной поверхности обделки. В одном сечении тоннеля наблюдается инфильтрация воды в грунт, что свидетельствует о наличии в этом месте сквозной трещины.

Грунты, залегающие непосредственно под обделкой тоннеля можно охарактеризовать, как «влажные», «очень влажные», а в отдельных местах – «водонасыщенные».

Толща влажных грунтов под обделкой не превышает одного метра. Подстилающие эту толщу грунты наблюдаются маловлажными.

РЛИ подповерхностной среды, залегающей в плоскости профиля 2 (обделка, грунт, воздух), представлены на рис. 6. На РЛИ грунтов по относительной плотности отчетливо наблюдается толща обделки и граница дневной поверхности проезжей части с воздухом. Грунты, залегающие между дорожной одеждой и обделкой можно охарактеризовать как «рыхлые» с прослоями «средней плотности». Толща обделки наблюдается на РЛИ трехслойной. Наиболее плотными наблюдается крайний слой, контактирующий с грунтом и крайний внутренний слой. По данным анализа РЛИ полная толщина обделки не превышает 35 см, а толщина крайних слоев обделки составляет, соответственно, 10...12 и 5...6 см. Плотность промежуточного слоя обделки вдоль профиля меняется от значения «плотный» до значения «рыхлый». На РЛИ грунтов, залегающих в плоскости 2, по влажности, наибольшая концентрация поровой воды наблюдается непосредственно под дорожной одеждой проезжей части и вблизи обделки тоннеля. На РЛИ отчетливо видны не-

большие по мощности линзы водонасыщенного песка. Также видны следы инфильтрации атмосферной воды от дневной поверхности проезжей части проспекта к обделке, и далее, через сквозные трещины в обделке – к её внутренней поверхности (то, что наблюдалась в 1997 г. во время аварии теплосети). Сопоставление мест расположения дефектов обделки, визуально наблюдаемых на внутренней поверхности тоннеля, и обводненных трещин, наблюдаемых на РЛИ, показывает их совпадение с погрешностью около 25-30 см. Сопоставление мест расположения визуально наблюдаемых трещин в дорожной одежде проезжей части проспекта Независимости и мест инфильтрации воды, наблюдаемых на РЛИ, показывает их совпадение с погрешностью, в среднем, 0,5 м.

Для уточнения сделанных выше заключений относительно состояния обделки и картины сложения грунтов вблизи неё было выполнено зондирование тоннеля с дневной поверхности дорожного покрытия (профиль 3). Это оказалось возможным только благодаря отсутствию в обделке металлической арматуры. Плотность профиля 3 совпадала с продольным осевым сечением тоннеля. Подповерхностная среда представлена последовательно в виде элементов дорожной конструкции, грунтов, обделки в верхней части тоннеля, воздуха, обделки в нижней части тоннеля и грунта под тоннелем.

Анализ РЛИ подповерхностной среды, залегающей в плоскости профиля 3 по относительной плотности и влажности, показывает, что толща грунта над обделкой представлена тремя слоями глинистого грунта (мощностью 0,3...0,4 м) и перемежающимися с ними песков «рыхлых» и «средней плотности». Глубина залегания глинистых грунтов составляет 1,0, 2,5 и 4,0 м. В среднем слое глинистого грунта на отдельных участках наблюдаются разрывы сплошности. На РЛИ отчетливо видны верхняя

и нижняя границы обделки тоннеля, отстоящие друг от друга на расстоянии около 5.0 м. Гидрогеологическая обстановка над обделкой представлена подземными водами спорадического распространения в виде линз водонасы-

щенных песков. Их образование связано с инфильтрацией атмосферной воды с проезжей части проспекта через сквозные трещины в дорожном покрытии.

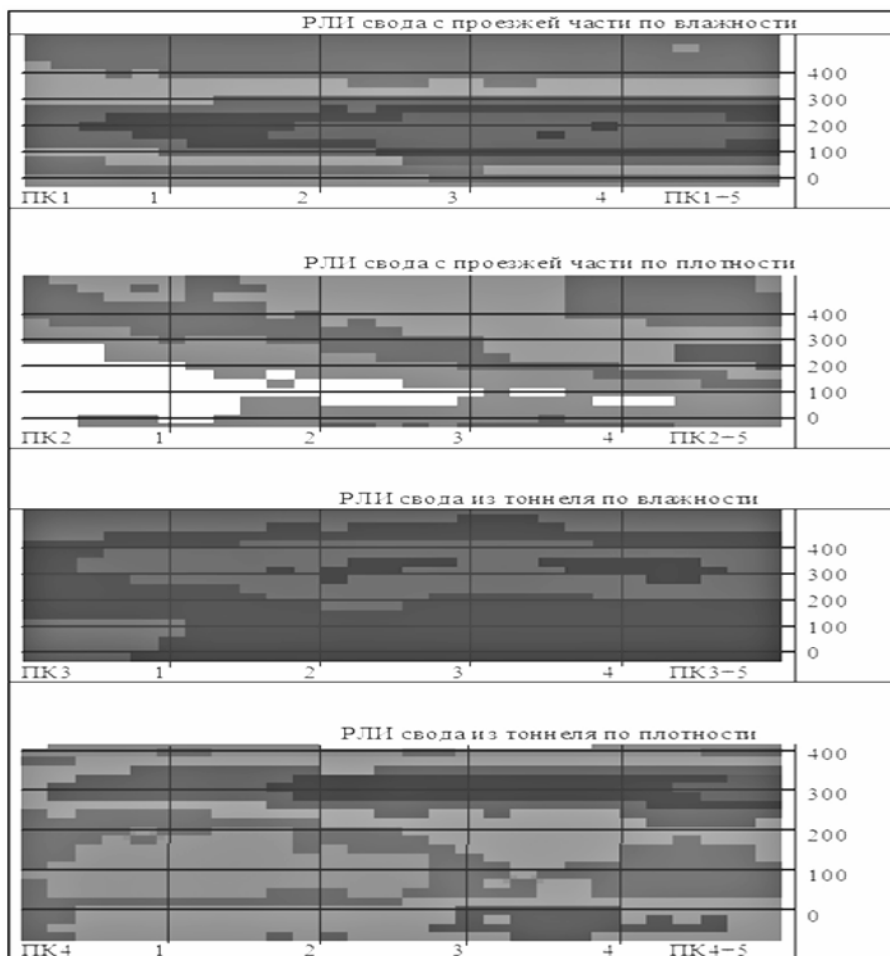


Рис. 6. РЛИ подповерхностной среды

Выводы: Использование георадарных технологий в комплексе с прямыми методами позволяют при обследовании обделок тоннелей (в которых отсутствует металлическая арматура) выявить все обводненные сквозные трещины в обделке и сделать оценку грунтов за её пределами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин А. А. Поведение обделки деривационного тоннеля № 1 Ирганайской ГЭС во время эксплуатации // Гидротехническое строительство, 2006, №4. – С. 20-25.

2. Левис, Обратная задача дифракции // Зарубежная радиоэлектроника, 1970, №2. – С. 100-113.
3. Реутов А. П. Радиолокационные станции бокового обзора / А. П. Реутов, Б. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко. – М.: Сов. радио, 1970.
4. Технические указания по инструментальной диагностике земляного полотна, МПС РФ, М., 2000. – С. 20-25.
5. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций, МТ РФ, М., 2003 г.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.

РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННОГО ХРОМОМАРГАНЦЕВОГО ЧУГУНА ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ЗАГРУЗОЧНЫХ ЖЕЛОБОВ И ТОРЦЕВЫХ СТЕН ПОЛУВАГОНОВ-ХОПРОВ 22-471, ПЕРЕВОЗЯЩИХ АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В роботі за допомогою квазі-Д-оптимального плану Песочинського проведено оптимізацію хімічного складу зносостійких економнолегованих хромомарганцевих чавунів, мікролегованих алюмінієм, за механічними та мікроструктурними показниками, що характеризують експлуатаційні властивості сплавів.

В работе с помощью квази-Д-оптимального плана Песочинского проведена оптимизация химического состава износостойких экономнолегированных хромомарганцевых чугунов, микролегированных алюминием, по механическим и микроструктурным показателям, характеризующим эксплуатационные свойства сплавов.

In the article the optimization of chemical composition of the wear-resistant economically alloyed Cr-Mn cast irons microalloyed with aluminum is realized by means of the quasi-D-optimum plan of Pesochinski over the mechanical and microstructural parameters, which characterize the operational properties of alloys.

Разработка новых составов износостойких материалов, позволяющих экономить дефицитные дорогостоящие легирующие элементы, является актуальной задачей развития металлургической и машиностроительной отрасли Украины. Актуальность использования материалов с большим сроком службы для футеровки желобов грузочных устройств железнодорожных вагонов, торцевых стенок полувагонов-хопров 22-471 позволит сократить расходы, связанные с частой заменой указанных деталей и самих вагонов в целом. Использование экономнолегированных хромомарганцевых чугунов в условиях ударно-абразивного износа, а также структурные характеристики этих материалов позволяют предположить зависимость их эксплуатационных свойств от микроструктуры матрицы. Известно, что наибольшее влияние на структурные характеристики матрицы в чугунах типа ИЧХ12Г5 оказывает концентрация марганца [1]. Однако, в соответствии с работой [2], легирование алюминием влияет на количество вторичных карбидов в матрице и, следовательно, механические характеристики указанных материалов.

Изучение влияния дополнительного легирования на структуру и свойства чугунов проводили на образцах чугунов, полученных из следующих шихтовых материалов: чугунная дробь, обрезь стального проката, феррохром ФХ006А, электролитический марганец, алюми-

ний АВ97. Чугунную дробь получали разливкой синтетического чугуна в бак с водой.

Плавку чугунов производили в печи Таммана в тигле из окиси алюминия (\varnothing 35x150) мм. Масса плавки составляла от 200 до 300 г. Чугунную дробь, сталь и феррохром помещали в печь вместе с тиглем. После расплавления шихты вводили остальные ферросплавы. В процессе плавки производили перемешивание расплава кварцевым стержнем. Разливали чугун в кварцевые трубки с внутренним диаметром 12...14 мм и длиной около 250 мм. Для уменьшения пористости отливки в донной части монтировался холодильник. Для снижения скорости охлаждения кварцевые трубки помещались в короб с песком. При использовании такой схемы кристаллизации скорость охлаждения составляла около 20...30 К/с. Для металлографических исследований использовали слитки без верхней и донной части. Твердость образцов измеряли на приборе ТК-2М, ударную вязкость – на копре с энергией удара 1250 Дж, микротвердость матрицы – с помощью приставки к металлографическому микроскопу «Вертивал» (Германия).

Исследования проводились с использованием методики планирования экспериментов с помощью некомпозиционного квази-Д-оптимального плана Песочинского.

Исходным материалом для исследования служил хромомарганцевый чугун типа ИЧХ12Г5. В качестве факторов принимались

содержания марганца, хрома и алюминия. Хром и марганец являются основными легирующими элементами в чугунах такого типа. Легирование хромом приводит к формированию эвтектики на базе карбида Me_7C_3 , а введение марганца стабилизирует γ -твердый раствор, что способствует улучшению свойств матрицы. Интервалы изменения концентраций хрома составляли 12...20 % (масс.), марганца – 2...6 % (масс.), алюминия – 0...0,2 % (масс.). Содержание углерода в экспериментальных сплавах подбиралось для каждого сплава с целью обеспечения степени эвтектичности 0,8. Содержание кремния во всех сплавах было около 0,7 % масс.

После разливки образцы отжигались в печи при температуре 860 °С в течение 3-х часов с последующим охлаждением на воздухе. Термическую обработку образцов производили совместно, в стальной обойме, обеспечивающей скорость охлаждения в интервале температур 860...350 °С около 20 К/мин. Такая скорость охлаждения характерна для отливок среднего сечения.

Выходной характеристикой (Y) в эксперименте являлись механические свойства чугунов: предел прочности при изгибе (σ_U , МПа), ударная вязкость (K_c , кДж/м²), твердость (HRC_3), а также микротвердость матрицы (HV_{50}). Именно эти характеристики, по мнению многих авторов, коррелируют с эксплуатационными свойствами чугунных деталей, эксплуатирующихся в условиях ударно-абразивного износа.

Получены уравнения регрессий для микротвердости и механических свойств. Проверка адекватности полученных моделей в условиях экспериментов проводилась по критерию Фишера (F) при уровне значимости 0,05.

Целью настоящего исследования являлось определение совместного влияния марганца и алюминия – элементов, в основном содержащихся в матрице сплавов, на предел прочности при изгибе, твердость и ударную вязкость хромомарганцевого чугуна.

Структура всех исследуемых сплавов представляет собой доэвтектический белый чугун с эвтектикой на базе тригонального карбида Me_7C_3 (рис. 1). Изменение концентраций хрома, марганца и алюминия в плане экспериментов не сопровождается изменением типа эвтектической колонии. Изменение концентраций основных легирующих элементов приводит к изменению структуры матрицы. Структура матрицы в исследуемых чугунах может быть перлитной (рис.1, а), мартенситно-перлитной (рис.1, б), мартенситно-аустенитной (рис.1, в) или их со-

четанием с включением вторичных карбидов, выделяющихся в процессе термической обработки. Продукты диффузионного распада аустенита в исследуемых чугунах характерны для сплавов с низкой концентрацией марганца.

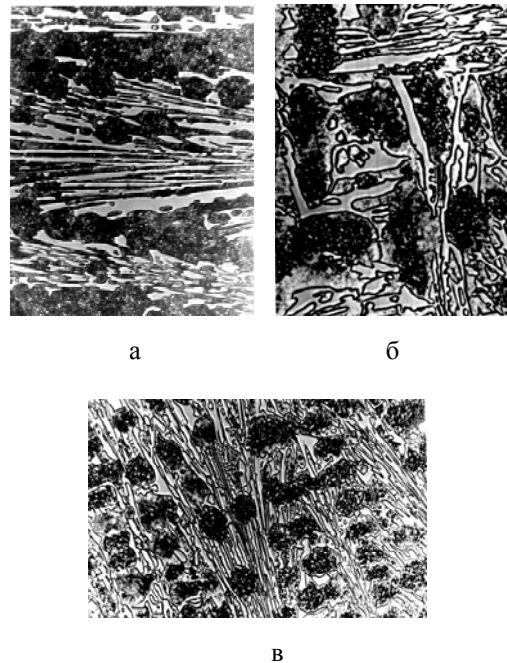


Рис. 1. Микроструктура хромомарганцевых чугунов в термообработанном состоянии, а–в – $\times 500$.

Микроструктура металлической матрицы определяет ее износостойкость. В ряду вышеперечисленных структур наибольшей микротвердостью в исследуемых сплавах обладает мартенсит с включениями вторичных карбидов, другие фазы и структурные составляющие ее снижают.

С помощью математической обработки получены уравнения регрессий для:

микротвердости матрицы, HV_{50} :

$$Y_1 = 34,25 + 236,94X_1 + 17,94X_2 - 1780X_3 + 445X_1X_3 - 30,44X_1^2;$$

твердости, HRC_3 :

$$Y_2 = 12,13 + 14,47X_1 + 1,77X_2 - 65X_3 - 0,3X_1X_2 + 16,25X_1X_3 - 1,2X_2^2;$$

предела прочности при изгибе, σ_U (МПа):

$$Y_3 = -2491,5 - 96X_1 + 456,25X_2 - 5175X_3 + 960X_1X_3 - 12,94X_2^2;$$

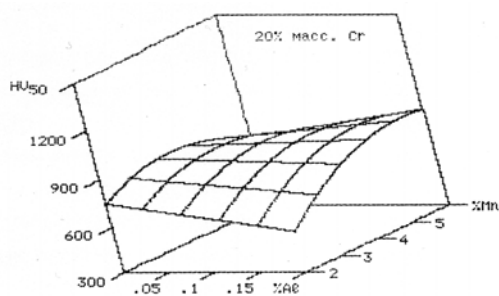
ударной вязкости, K_c (кДж/м²):

$$Y_4 = 69,88 + 442,50X_3 - 2212,5X_3^2,$$

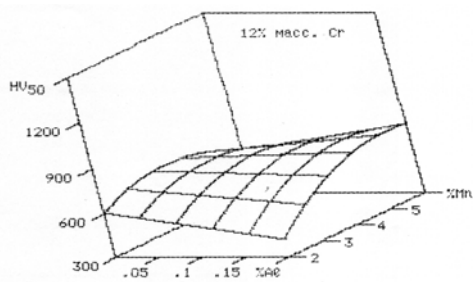
где Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 - микротвердость (HV_{50}), твердость (HRC_3), предел прочности при изгибе (σ_U , МПа) и ударная вязкость (K_c , кДж/м²), а

X_1 , X_2 , X_3 – содержание в % (масс.) марганца, хрома и алюминия, соответственно.

Поверхности отклика для микротвердости матрицы при различном содержании хрома представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что характер влияния алюминия на микротвердость матрицы зависит от содержания марганца. На совместное влияние марганца и алюминия указывает коэффициент парного взаимодействия этих элементов в уравнении регрессии. При высоком содержании марганца алюминий спо-



а



б

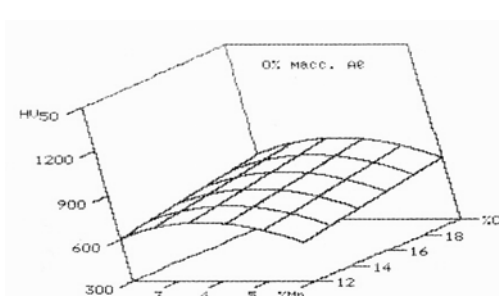
Рис. 2. Влияние алюминия и марганца на микротвердость матрицы хромомарганцевых чугунов при концентрации хрома: а – 20% (масс.), б – 12 % (масс.)

собствует повышению микротвердости матрицы, при низком – снижению. Повышение концентрации хрома в чугуне приводит к увеличению общего уровня микротвердости матрицы, причем характер зависимости ее от содержания марганца и алюминия при этом не меняется (см. рис. 2). Влияние марганца на микротвердость экстремально, а алюминия – линейно. Величина максимума микротвердости растет с увеличением содержания хрома. При повышении содержания алюминия максимум смещается в область более высоких концентраций марганца.

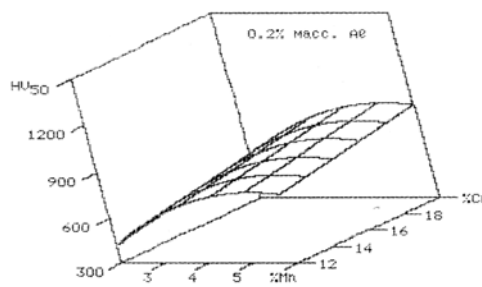
Изменение содержания алюминия в пределах плана экспериментов не изменяет характер влияния марганца и хрома (рис. 3). Легирование хромомарганцевого чугуна алюминием (см. рис. 3) приводит к увеличению микротвердости

матрицы при повышенных концентрациях марганца и уменьшению при низких.

В публикациях, посвященных влиянию марганца на микроструктуру матрицы высокохромистого чугуна, указывается, что наиболее высокими уровнями микротвердости обладает мартенситная матрица с вторичными карбидами [1]. Мартенситная структура матрицы достигается при оптимальном содержании марганца в чугуне. Отклонение в сторону меньших концентраций марганца приводит к появлению



а



б

Рис. 3. Влияние хрома и марганца на микротвердость матрицы при содержании алюминия: а – 0 % (масс.); б – 0,2 % (масс.)

продуктов диффузионного распада аустенита, в сторону повышенных – увеличивает объемную долю остаточного аустенита. В обоих случаях наблюдается снижение микротвердости матрицы. При низком содержании марганца в чугуне увеличение концентраций алюминия приводит к уменьшению микротвердости за счет увеличения в структуре матрицы объемной доли продуктов диффузионного распада аустенита. В сплавах с высоким содержанием марганца алюминий инициирует выделение вторичных карбидов. При этом микротвердость матрицы повышается. Повышение содержания алюминия в исследуемых чугунах смещает максимум микротвердости матрицы в область больших концентраций марганца, с одновременным его увеличением.

Поверхности отклика для твердости при различных содержаниях хрома представлены на рис. 4. Как видно, характер совместного влияния алюминия и марганца на твердость аналогичен влиянию на микротвердость. При этом изменение твердости исследуемых сплавов происходит за счет изменения микротвердости матрицы.

Алюминий способствует повышению твердости сплавов с высоким (более 4 % масс.) со-

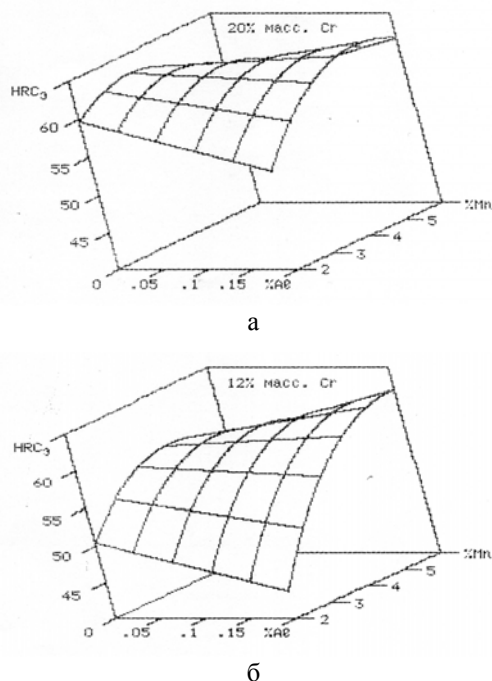


Рис. 4. Влияние марганца и алюминия на твердость хромомарганцевого чугуна при концентрации хрома: а – 20 % (масс.); б – 12 % (масс.)

держанием марганца, что связано с уменьшением объемной доли остаточного аустенита.

Зависимости совместного влияния алюминия, марганца на предел прочности при изгибе с различным содержанием хрома представлены на рис. 5. Изменение содержания хрома в чугуне меняет характер зависимости. Повышение общего уровня прочности наблюдается при концентрациях хрома более 15 % (масс.).

В исследуемых сплавах с низким содержанием марганца повышение содержания алюминия приводит к некоторому уменьшению предела прочности при изгибе за счет увеличения объемной доли продуктов диффузионного распада аустенита (см. рис. 1, а, б). При содержаниях марганца более 4 % масс. характер влияния алюминия на прочность меняется. Следует отметить, что изменение прочности при этом незначительно.

Наряду с характеристиками микротвердости матрицы (HV_{50}), твердости (HRC_3), предела

прочности при изгибе (σ_U , МПа), ударная вязкость является наиболее ёмкой характеристикой эксплуатационных свойств износостойких чугунов, испытывающих ударно-абразивные нагрузки. Исследование влияния алюминия на ударную вязкость (рис. 6) показывает, что с учетом точности использованной методики экспериментов ударная вязкость исследованных чугунов значимо зависит только от содержания алюминия. Проверка других коэффициентов уравнения регрессии с помощью критерия Фишера показала их незначимость.

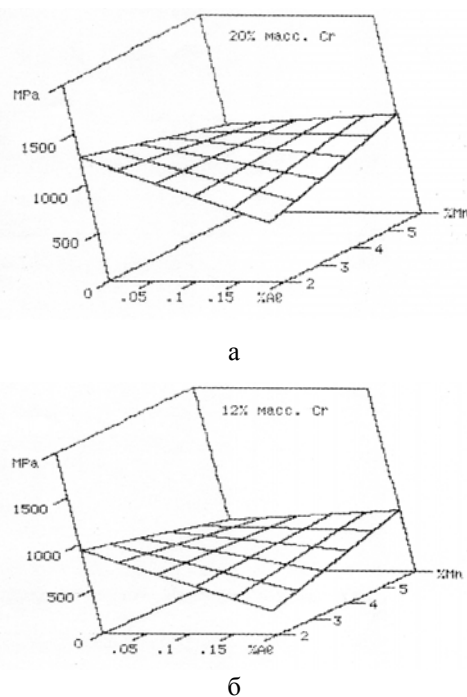


Рис. 5. Влияние алюминия и марганца на предел прочности при изгибе при различной концентрации хрома: а – 20 % (масс.); б – 12 % (масс.)

Имеющиеся сведения в литературе о влиянии структуры матрицы на ударную вязкость показывают, что одинаковые значения ударной вязкости достигаются при наличии перлитной, мартенситной или мартенситно-аустенитной структуры, т.е. прямой связи между структурой матрицы и ударной вязкостью нет. Эти положения не противоречат полученным результатам.

Возвращаясь к рис. 6, необходимо отметить повышение уровня ударной вязкости при дополнительном легировании алюминием в количествах около 0,1 % (масс.) Дальнейшее повышение его концентрации приводит к падению ударной вязкости, что связано, скорее всего, с ликвацией алюминия по границам зерен.

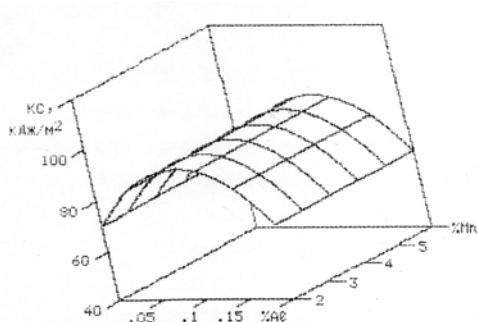


Рис. 6. Влияние марганца и алюминия на ударную вязкость хромомарганцевых чугунов

Химический состав чугуна с оптимальным содержанием химических элементов в пределах данного эксперимента представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав чугуна и его структурных составляющих

Сплав, фаза	Содержание элементов, % (масс.)					
	C	Si	Mn	Cr	Al	Fe
Чугун	2,78	0,66	4,48	17,6	0,1	ост.
Карбид Me_7C_3	н/и	-	3,6	49,6	-	37,5
Матрица	н/и	0,66	3,02	12,99	0,09	ост.

Оптимальный состав термообработанного хромомарганцевого чугуна, легированного алюминием, позволяет получить микротвердость матрицы не менее $800 HV_{50}$, твердость – не менее $60 HRC_3$, предел прочности при изгибе – не менее 1100 МПа и ударную вязкость – на уровне не менее 80 кДж/м^2 . Подобные механические характеристики при отсутствии алю-

миния в качестве микролегирующего компонента обеспечиваются лишь при условии концентрации хрома и марганца в чугуне не менее 20 и 4%, соответственно. Таким образом, дополнительное легирование хромомарганцевых чугунов алюминием позволяет улучшить их механические свойства. Концентрация алюминия около 0,1% масс. в хромомарганцевом чугуне позволяет повысить ударную вязкость на $20...25 \text{ кДж/м}^2$. В исследуемых чугунах при концентрации марганца более 4% (масс.) увеличение содержания алюминия обеспечивает повышение твердости сплава на 2-3 единицы HRC_3 за счет инициации выделения вторичных карбидов в матрице и уменьшения количества остаточного аустенита. При более низком содержании марганца алюминий снижает твердость чугуна. Использование хромомарганцевых чугунов, микролегированных алюминием около 0,1% масс., в качестве бронеплит футеровки грузочных желобов железнодорожных вагонов под абразивные материалы и торцевых стенок полувагонов-хопров 22-471 позволит увеличить срок службы конструкций, сэкономить дорогостоящие легирующие элементы, например хромистую лигатуру.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гарбер М. Е. Отливки из белых износостойких чугунов. – Машиностроение, 1972. – 112 с.
2. Фарсер В. М. Исследование структурных превращений и особенностей вторичного твердения в высокопрочных сталях, легированных алюминием и медью / В. М. Фарсер, Т. Г. Потемкина, А. А. Круглов, Е. А. Савенкова // Изв. АН СССР. Металлы. – 1991. – № 3. – С. 89-93.

Поступила в редакцию 17.03.2008.

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ, ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ, БУДІВЕЛЬНИХ РОЗЧИНІВ ТА ЗАЛІЗОБЕТОНУ

В роботі наведені методи підвищення фізико-механічних, технологічних властивостей і довговічності бетону, будівельних розчинів та залізобетону. Визначено вплив основних пластифікаторів, дисперсних та комплексних добавок на експлуатаційні властивості бетонів і будівельних розчинів. Запропоновані шляхи підвищення необхідних технологічних та фізико-механічних властивостей визначають – у будь-яких випадках цілеспрямованого впливу – необхідність застосування комплексних хімічних та дисперсних добавок для досягнення найкращих результатів. Розроблені шляхи підвищення довговічності залізобетону враховують комплекс закладів, які мають контролювати антикорозійну активність добавок до бетонів по відношенню до сталеві арматури, застосовувати поверхневе покриття залізобетону спеціальними хімічними добавками та використовувати при виробництві сталеві арматури спеціальні регламентовані режими високотемпературної термомеханічної обробки з міжклітьвовим підстижуванням металу та післяпрокатного регламентованого охолодження в потоці прокатного стану.

В работе приведены методы повышения физико-механических, технологических свойств и долговечности бетона, строительных растворов и железобетона. Обозначено влияние основных пластификаторов, дисперсных и комплексных добавок на эксплуатационные свойства бетонов и строительных растворов. Предложенные пути повышения необходимых технологических и физико-механических свойств для достижения наилучших результатов определяют необходимость использования – в любых случаях целенаправленного влияния – комплексных химических и дисперсных добавок. Разработанные пути повышения долговечности железобетона включают комплекс мероприятий, контролирующей антикоррозионную активность добавок в бетоны по отношению к стальной арматуре, использование поверхностных покрытий железобетона специальными химическими добавками, а также использование при производстве арматурного проката специальных режимов высокотемпературной термомеханической обработки при межклетьевом подстижении металла и послепрокатном регламентированном охлаждении в потоке прокатного стана.

The methods of increasing the physico-mechanical, technological properties and durability of concrete, mortars and reinforced concrete are presented in the paper. The influence of basic plasticizers, dispersed and complex additions on the operation properties of concretes and mortars is considered. The suggested ways of increasing necessary technological and physico-mechanical properties for achievement of the best effectiveness lead to the necessity of using – in any case of goal-seeking influence – the complex chemical and dispersed additions. The developed ways of increasing the reinforced concrete durability include the complex of measures checking anticorrosion activities of additions for concretes with respect to steel reinforcement, the use of surface coatings of reinforced concrete with special chemical additions, as well as during production of reinforcement rolled metal the use of special regimes of high-temperature thermomechanical treatment under intercellular cooling of metal and after-rolling regulation cooling in the stream of rolling mill.

Піднесення значності будівельної сфери на фоні будівельного «буму», що спостерігається на просторі країн СНД, сприяє розвитку нових науково-технологічних рішень, які забезпечать необхідні потреби галузі у якісних матеріалах та технологіях, що одночасно сприятимуть ресурсозбереженню. Найважливішим завданням для даної сфери є підвищення фізико-механічних властивостей, довговічності бетонних та залізобетонних будівельних конструкцій при забезпеченні ресурсо- та матеріалозбереження. Означене завдання вирішується у разі вжиття широкого комплексу заходів, що передбачають:

- створення нової теоретичної бази, яка

дозволить управляти властивостями бетонів та будівельних розчинів на основі цементу та цілеспрямовано впливати на структуроутворення цементного каменю;

- розроблення на її основі нових високо-ефективних добавок, які дозволяють економити як цемент, так і енергозатрати на будівництві та виробництві бетону при гарантованому рівні досягнення необхідних фізико-механічних та технологічних характеристик бетону;

- застосування у якості компонентів нових добавок дешевої сировини, що сприятиме широкому колу їх застосування, у тому числі при будівництві соціального житла та суспільних об'єктів;

– суворе контролювання корозійної активності добавок в бетони по відношенню до сталевій арматури та зниження корозійної активності арматурного металу. Застосування спеціальних покриттів бетонів та будівельних розчинів, які захищають від бактеріального та грибкового зараження;

– впровадження нових комплексних добавок, що забезпечують підвищені пластичні міцності, адгезивні, водо- та морозостійки властивості бетонів та будівельних розчинів, які базуються як на традиційно використовуваних пластифікаторах та прискорювачах твердіння, так і на їх сумішах з тонкодисперсними нанопорошками;

– поширення на українських заводах-виробниках арматури нової технології високо-температурної термомеханічної обробки арматурного прокату у комплексі з регламентованим післяпрокатним охолодженням в потоці прокатного стану та нових марок сталей, мікролегованих елементами, що утворюють в структурі дрібнодисперсні хімічні з'єднання, які утримують ріст зерен при гарячому деформуванні;

– удосконалення технологій виробництва комірчастих бетонів та спеціальних теплоізолюючих матеріалів на основі цементу;

– поширення знань про застосування спеціальних добавок до цементних сумішей, що отримані у галузі будівництва, на металургійну галузь для розроблення технологічних прийомів одержання нових жаростійких бетонів, які, у свою чергу, забезпечать матеріалозбереження в цій галузі.

Удосконалення існуючих теоретичних розробок та систематизація нових теоретико-практичних знань про вплив сучасних хімічних добавок на структуроутворення цементного каменю дозволить проектувати нові склади ефективних економічних добавок до бетонів та розчинів. Перевагу на цьому шляху, на думку авторів, слід приділяти створенню комплексних добавок, до складу яких входять пластифікатори, прискорювачі твердіння, інгібітори та каталізатори хімічних процесів, дрібнодисперсні нанопорошки.

Застосування пластифікаторів нині міцно входить в культуру будівельного виробництва. Але не часто вчені цієї галузі звертають увагу на особливості структуроутворення цементного каменю з новими поверхнево-активними речовинами (ПАР), які також виступають в ролі модифікаторів при структуроутворенні цементного каменю, при цьому замінюють наявні про-

блеми доволі відомим терміном російською мовою: «совместимость добавок с украинскими цементами». Під цим терміном як раз і закрито питання структуроутворення цементного каменю під впливом однокомпонентних чи комплексних добавок-модифікаторів. Безумовно, окрім характеристик морфології та розмірів кристалів, що формуються під час гідратації цементів та формують основні робочі характеристики будівельних розчинів на цементній основі, важливими є термодинамічні характеристики гідратації та тепловиділення для технологічних якостей рухомих бетонних сумішей.

Авторами роботи зроблено початок робіт із системного дослідження структуроутворення під впливом ПАР, що містяться у сучасних добавках та у більшій частині випадків являють собою модифікатори росту кристалів цементного каменю. Науковий опис проведених робіт та окремі висновки будуть представлені у подальших публікаціях на цю тему. Необхідно лише пояснити, що додавання деяких сучасних добавок значно змінює морфологію цементного каменю та сприяє формуванню наноструктурних матеріалів з нитковидними, хвилястими тонкими поверхневими кристалами, щільно прилеглими кристалами глобулярної форми. Таким чином, завдяки диспергуванню та керуванню формою росту цементних кристалів можливе досягнення високих показників фізико-механічних характеристик матеріалів на основі цементу.

Для підвищення механічних характеристик бетонів сучасний ринок добавок пропонує застосування фіброволокон, рідкого скла, але зважаючи на складність технологічних прийомів їх застосування, складність досягнення структурної однорідності та їх сумісності зі змінною структурою цементного каменю, найбільш ефективним способом є не уведення додаткової фібри чи рідкого скла до структури, а зміна морфології цементного каменю до утворення нановолокон з великим об'ємним відсотком гелевої пористості. Міцність таких нановолокон цементного каменю в десятки разів перевищує міцність звичайних кристалів цементу та додатково надає бетону підвищені характеристики міцності на вигин.

Незважаючи на технологічні труднощі уведення нанопорошків до цементних сумішей, цей напрямок підвищення рівня властивостей бетонів має бути ефективним, особливо у разі застосування в комплексі з хімічними добавками. Означені компоненти діють як каталізатори один до одного і додатково підвищують техно-

логічні та фізико-механічні характеристики бетонів. При цьому нанопорошки додатково підвищують щільність матеріалу за рахунок більш щільної упаковки наповнювачів.

Використання бетонів зі спеціальними властивостями як найбільш поширених та відносно дешевих матеріалів замість дорогих аналогів, наприклад – малоцементних жаростійких бетонів замість дорогих керамік, дозволить економити енерго- та матеріаловитрати при їх виробництві. Застосування добавок, наприклад типу ПЛКП сприяє економії як цементу, так і енергетичних витрат на пропарку бетонних виробів. Розроблення нових теплоізоляційних матеріалів на основі цементу та впровадження їх при будівництві житла, промислових та соціальних об'єктів сприятиме зменшенню витрат матеріалів на забезпечення необхідної товщини стінок для тепло- та шумоізоляції.

Суворе контролювання корозійної активності добавок відносно сталеві арматури та підвищення пластичних характеристик арматури

допоможе гарантувати неможливість передчасного руйнування залізобетонних конструкцій.

Необхідним етапом робіт по підвищенню надійності та довговічності будівельних конструкцій має бути впровадження на українських металургійних заводах технології високотемпературної термомеханічної обробки прокату при регламентованих міжклітьвовому та післяпрокатному підстужуванні металу. Подібна – розроблена автором – технологія діє на іжевському металургійному заводі ВАТ «Іжсталь». Означені технологічні прийоми дозволили підвищити пластичні характеристики (відносне звуження поперечного перерізу та відносне подовження при розтягуванні металу) в середньому на 20 %. Подібний ефект досягнуто за рахунок підвищення структурної однорідності та структурної стабільності, щільності металу, зниження розміру зерен на 1-2 бали та дисперсності вторинних карбідів.

Надійшла до редколегії 17.03.2008.

В. В. КОВАЛЕНКО (НГУ, Российская Федерация), И. В. КУПЕНКО (ДонНТУ),
А. Ю. ПРОКОПОВ (ЮРГТУ, Российская Федерация), С. В. КАРГАПОЛОВ, (ДИОС,
г. Донецк)

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ АРМИРОВКИ СТВОЛОВ НА СКОРОСТЬ ИХ КОРРОЗИИ

На базі лабораторних досліджень встановлено особливості процесу корозії елементів армування, що знаходяться під навантаженням від підйомних судин та з боку породного масиву.

На базе лабораторных исследований установлены особенности протекания процесса коррозии элементов армировки, находящихся под нагрузкой от подъемных сосудов и со стороны породного массива.

On the basis of laboratory explorations the features of conducting the corrosive process in the shaft reinforcement parts under the load from lifting buckets and rock mass were determined.

Одним из факторов, влияющих на скорость коррозии элементов армировок вертикальных стволов, являются напряжения в проводниках и расстрелах, вызванные действием эксплуатационных нагрузок. Известно [1, 2], что коррозия напряженного металла идет быстрее, чем ненапряженного. Однако, при выборе антикоррозионных покрытий армировок стволов этот фактор не учитывается [3], что приводит к завышенной оценке их долговечности.

В работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований влияния на скорость коррозии напряжений стальных образцов, вызванных действием на них различных нагрузок (1...5 кг). При этом моделировались условия работы металлических крепей горизонтальных выработок, а именно напряжения 50...250 МПа. Как показали расчеты [4], напряжения в элементах армировки стволов зачастую существенно превышают 250 МПа. Поэтому зависимость, полученная в [2], должна быть уточнена для условий работы армировки стволов. Для этого необходимо провести ряд дополнительных экспериментов по сходной методике [2], но при больших нагрузках на стальные образцы. Например, для моделирования напряжения 350 МПа в опыте должны быть использованы грузы массой 7 кг.

Испытания проводились в строительной лаборатории кафедры СШ и ПС ДонНТУ. При проведении лабораторных исследований был использован метод ускоренных коррозионных испытаний (УКИ), основанный на периодическом смачивании образцов в водном растворе хлорида натрия [5]. В данном эксперименте имитировались худшие из возможных условий коррозии металла по фактору минерализации

воды. Поэтому при проведении эксперимента использован водный раствор хлорида натрия (NaCl) с концентрацией последнего, равной 3% (что соответствует минерализации шахтной воды 30 г/л) с добавлением NH₄OH для имитации pH = 7 (условия шахт ГХК «Добропольеуголь» и ГХК «Павлоградуголь»). Образцы смачивались раствором 2 раза в сутки. Для определения зависимости скорости коррозии элементов армировок от действия нагрузок были смоделированы условия их работы: шарнирно-опертая балка, нагруженная по краям постоянной сосредоточенной силой. В экспериментальных наблюдениях использовалось 9 образцов с размерами 400×10×3 мм, выполненных из Ст5. На краях каждого образца были просверлены отверстия для крепления грузов. Расстояние между опорами было принято равным 100 мм. Этот участок образца был принят рабочим, т.е. в ходе испытания он покрывался тонким слоем раствора (2 раза в сутки). Перед проведением эксперимента поверхность рабочего участка очищалась от ржавчины при помощи металлической щетки. Вся остальная поверхность покрывалась защитным слоем из эмалевой краски. Перед испытанием образцам первой тройки были присвоены порядковые номера от 1 до 3, после чего они взвешивались. Первый образец загружался нагрузкой 6 кг, что соответствует напряжению $\sigma = 300$ МПа в реальных условиях, второй – 7 кг (350 МПа) и третий – 8 кг (400 МПа). Аналогичным образом нумеровались и испытывались образцы из второй и третьей троек. Испытания каждой из троек образцов проводились в течение 30 суток. По истечении 30 суток рабочие области всех образцов, включая их боковые грани, бы-

ли очищены от продуктов коррозии и повторно взвешены.

Общий вид одного из образцов в процессе испытания представлен на рис. 1., а на рис. 2 показаны образцы после испытаний.

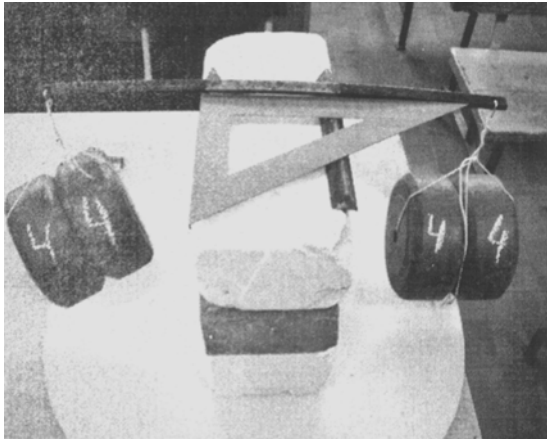


Рис. 1. Общий вид образца в процессе испытания под нагрузкой 8 кг

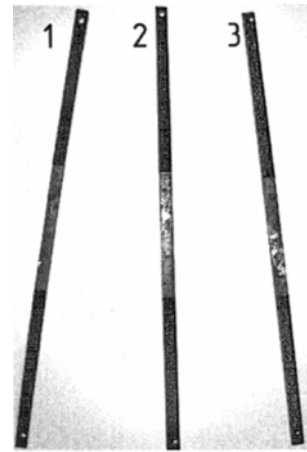


Рис. 2. Общий вид образцов после испытания под нагрузкой: 1 – 6 кг; 2 – 7 кг; 3 – 8 кг

При установлении итоговой зависимости (рис. 3) использовались данные, полученные ранее В. В. Коваленко [2]. Следует заметить, что при напряжениях $\sigma < 127$ МПа скорость коррозии K практически не зависит от σ , стремясь к значению 2.67 (см. рис. 3).

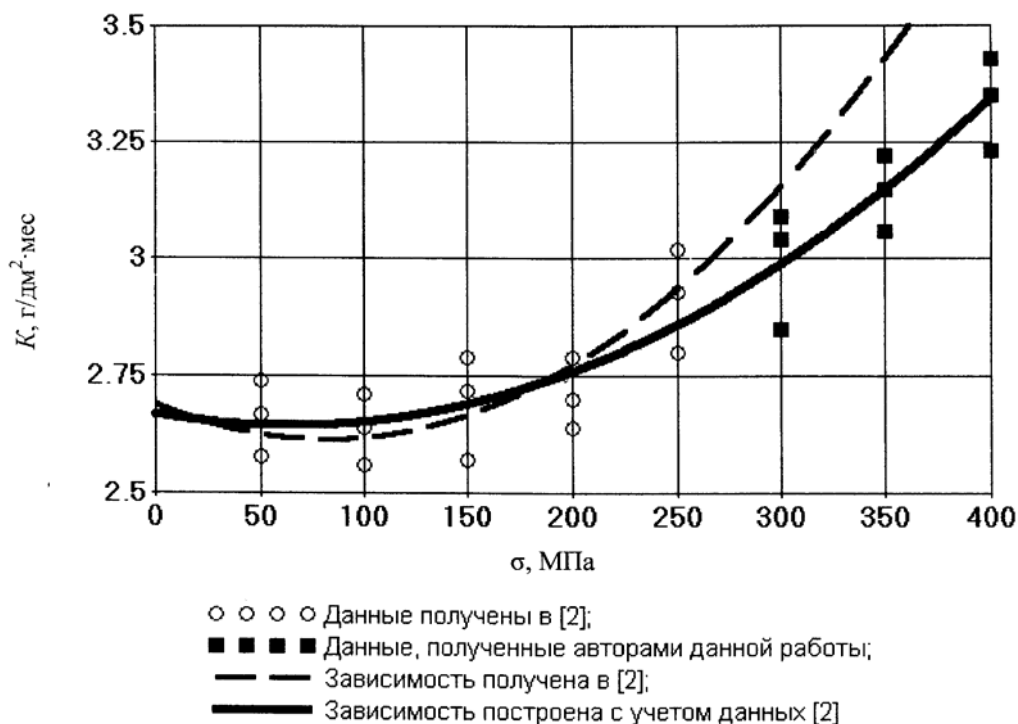


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии металла от величины напряжений

Слагаемое 2.67 в правой части по сути представляет собой скорость коррозии при отсутствии напряжений в стали ($\sigma = 0$), или начальную скорость коррозии K_0 . Этот факт объясняется тем, что при проведении данного эксперимента на скорость коррозии оказывала влияние еще и минерализация воды (концентрация NaCl в растворе). Следовательно, при $\sigma < 127$ МПа на-

пряжения практически не влияют на процесс коррозии, скорость которого определяется в основном минерализацией воды. Как показывают расчеты, величина K_0 в самом деле практически совпадает со значением скорости коррозии при минерализации $C = 3\%$ и нулевой скорости движения струи воздуха.

С учетом вышесказанного, при значениях $\sigma < 127$ МПа общая скорость коррозии может быть принята равной K_0 . При значениях $\sigma \geq 127$ МПа, зависимость общей скорости коррозии от напряжений в элементах армировки (см. рис. 3) выражается следующим образом:

$$K_{\text{общ}} = K_0 + (0.62 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma^2 - 0.78 \cdot \sigma) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где K_0 – начальная скорость коррозии, обусловленная влиянием минерализации шахтных вод и скоростью движения струи воздуха, г/дм²·мес.

Значительное влияние на скорость коррозии напряжений, близких к уровню предела текучести и выше, объясняется разрушением естественных защитных оксидных пленок, что облегчает доступ кислорода и коррозионной среды к поверхности металла. Направление дальнейших исследований – разработка методики расчета параметров противокоррозионных покрытий для различных горно-геологических условий работы армировок стволов с учетом полученных зависимостей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шлугер М. А. Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, В. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1981. – 216 с.
2. Коваленко В. В. Повышение несущей способности металлической крепи капитальных горных выработок в условиях агрессивных шахтных вод: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.04. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2003. – 16 с.
3. Инструкция по противокоррозионной защите армировки стволов, металлоконструкций шахтной поверхности и другого горнотехнического оборудования. – Харьков: ВНИИОМШС, 1973.
4. Саакян Р. О. Обоснование параметров ремонтно-пригодной податливой армировки вертикальных стволов для условий деформирующегося породного массива: Автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.20 / Южно-Российский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2005. – 20 с.
5. Розенфельд И. Л. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов / И. Л. Розенфельд, К. А. Жигалова. – М.: Металлургия, 1966. – 347 с.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.

О РАЗВИТИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Проанализовано питання про методи просторового розрахунку пролётних будов різної конструкції. Показана можливість застосування спрощених методів розрахунку, які дозволяють урахувати як пружні, так і нелінійні деформації, а також оцінити інші фактори, що впливають на НДС системи без шкоди для точності отриманих результатів.

Проанализирован вопрос о методах пространственного расчета пролетных строений различной конструкции. Показана возможность применения упрощенных методов расчета, позволяющих учесть как упругие, так и нелинейные деформации, а также оценить другие факторы, влияющие на НДС системы, без ущерба для точности получаемых результатов.

The problem of methods of spatial computation of spans of different structures has been considered. The possibility of application of simplified computation methods allowing to take into account both resilient and non-linear deformations as well as to estimate other factors affecting the stressed-and-strained state of a system without accuracy loss for results obtained has been presented.

Вопросу распределительной способности пролетных строений мостов посвящено десятки и даже сотни работ. В рамках данной статьи невозможно перечислить все эти работы. Уже в середине 50-х годов прошлого столетия на смену простейшим методам расчета пришли методы, позволяющие с достаточной для практики точностью определить напряженно-деформированное состояние (НДС) пролетных строений при воздействии на них временных нагрузок. Из многочисленных методов расчета этого периода следует выделить методы Б. Е. Улицкого [1], Л. В. Семенца [2], И. А. Трифонова [3]. Сложнейший в математическом отношении метод Б. Е. Улицкого считался точным и был реализован в виде программы расчета, которая использовалась проектантами всего Советского Союза. В дальнейшем метод развивался самим Б. Е. Улицким и его учениками и был перенесен на расчет практически всех балочных мостов (прямых, консольных, косых, кривых, плитных) как с учетом упругих свойств материалов, так и с учетом нелинейных деформаций.

Однако И. А. Трофимов подчеркивает, что модель Б. Е. Улицкого может дать при расчете в упругой стадии достаточно точные решения только при удержании большого числа членов ряда. При расчете железобетонных пролетных строений (когда следует учесть влияния трещин и других факторов) этот метод может дать весьма приближенные результаты. Он показал, что и другие точные методы, не учитывающие этих факторов, могут дать результаты, далекие от истины.

Естественно, в последующие годы ученые изыскивали более простые модели расчета. Так, Л. В. Семенец впервые в Советском Союзе разработал энергетический метод расчета пролет-

ных строений мостов балочной конструкции, выполняемых из железобетона или металла. Метод был более простым, чем метод Б. Е. Улицкого, понятен инженерам, и поэтому широко использовался в практике проектирования. Следует подчеркнуть, что он учитывал только упругие деформации материала пролетных строений и не был разработан для сборных плитных мостов и мостов других конструкций.

И. А. Трофимову удалось, значительно упростив решения, учесть при расчетах процесс трещинообразования и влияние других факторов. Для ряда пролетных строений он применял двухпараметрическую модель П. Л. Пастернака, разработанную для расчета фундаментов с учетом их совместной работы с грунтом. И. А. Трофимов, кроме упрощения расчетов пролетных строений, применив модель П. Л. Пастернака, показал (что на наш взгляд, является главным) общность расчетов, казалось бы, далеких по назначению и функциональным особенностям конструкции (фундаментов и пролетных строений).

По пути упрощения пространственных расчетов пролетных строений пошли и другие выдающиеся ученые: М. Е. Гишман [4], Г. Н. Азизов [5], М. М. Онищенко [6], В. Г. Кваша и А. Ф. Яременко [7]. Например, М. Е. Гишман разработал обобщенный метод внецентренного сжатия с учетом крутящихся моментов, расчет сборных плитных мостов, рассматривая их в поперечном направлении как шарнирную цепь, расчет кривых в плане мостов, составил обширные таблицы для определения внутренних усилий и деформаций всех типов балочных мостов. Однако, его методы не позволяют рассматривать пролетные строения других конструкций (рамных, арочных, комбинированных).

Г. Н. Азизов разработал обобщенный метод расчета, позволяющий учитывать процесс трещинообразования при сравнительно несложных в математическом плане решениях.

В. Г. Кваша и А. Ф. Яременко вернулись к использованию модели в виде перекрестных элементов, но применили при расчете смешанный методов строительной механики.

С развитием вычислительной техники снова были предложены сложнейшие модели расчета пролетных строений, часто базирующиеся на применении метода конечных элементов (МКЭ) [8, 9]. В Украине на основе МКЭ составлен комплекс «Лира». Развитие методов по пути их усложнения понятно, т.к. МКЭ дает возможность при расчете учесть много факторов, характеризующих свойства материалов, конструктивные особенности и способы возведения пролетных строений.

Однако, на наш взгляд, не стоит обожествлять и считать панацеей от всех неприятностей использование сложнейших моделей с применением МКЭ. Недостатки методов с применением МКЭ четко определил Г. Н. Азизов, обратив внимание на сложность подбора формы и количества конечных элементов при расчете пролетных строений разных конструкций, на неустойчивость решения системы с большим количеством неизвестных, на практическую невозможность контроля промежуточных расчетов и на большие затраты машинного времени, что удорожает процесс проектирования мостов.

В связи с этим следует приветствовать и в дальнейшем разработку более простых методов расчета пролетных строений, позволяющих с достаточной для практических целей точностью оценить НДС системы. В этом плане перспективным, на наш взгляд, является разработанный нами метод расчета, в котором пролетное строение разрезается на продольные элементы (балки, рамы, арки) и поперечные элементы, которые рассчитываются смешанным методом строительной механики [10, 11]. Во многих наших работах, перечень которых в данной статье сделать невозможно, доказано, что предложенный метод позволяет рассчитывать любые по конструкции пролетные строения, любой нерегулярной схемы, при продольных элементах, выполненных из разных материалов. При реконструкции мостов разные продольные элементы одного и того же пролетного строения могут иметь разные по величине пролеты, что не вызывает затруднений при расчете. Метод позволяет учесть нелинейность работы или ползучесть материала, дефекты элементов и оценить их влияние на распределительную способность пролетного строе-

ния. И, наконец, программные расчеты на ЭВМ не представляют трудностей, т.к. задача сводится к решению системы канонических уравнений, в которых количество неизвестных составляет в худшем случае всего несколько десятков. Все это позволяет (без ущерба для точности расчетов) значительно уменьшить затраты машинного времени при расчете пролетных строений.

Кроме того, предложенный метод расчета позволяет определить НДС плоских и ребристых плит при любых условиях их опирания по контуру и плит с точечным опиранием на опоры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Улицкий Б. Е. Вопросы пространственного расчета балочных мостов. – М.: Автотрансиздат, 1956. – 60 с.
2. Семенец Л. В. Пространственный расчет мостов с учетом кручения // Изв. вузов. Стр-во и архитектура, 1959. – № 5. – С. 55-63.
3. Трифонов И. А. Практический метод расчета железобетонных большепролетных балочных мостов переменной жесткости // Сб. тр. МИСИ. – Вып. 17. – М.: МИСИ, 1957. – С. 69-85.
4. Гибшман М. Е. Проектирование транспортных сооружений: Учебник для вузов. – 2-е изд., перер. и доп. / М. Е. Гибшман, В. И. Попов. – М.: Транспорт, 1988. – 447 с.
5. Азизов Г. Н. Пространственный расчет железобетонных пролетных строений мостов // Дороги і мости. – Т. 1, Вип. 7. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – С. 8-21.
6. Онищенко М. М. Про деякі спрощення просторових розрахунків прогінних будов мостів / М. М. Онищенко, Н. М. Хвоциньська, В. М. Леонтьева // Автом. дороги і дор. буд-во. – Вип. 42. – К.: Будівельник, 1988. – С. 84-87.
7. Кваша В. Г. Расчет однопролетных и неразрезных строений железобетонных автодорожных мостов / В. Г. Кваша, А. Ф. Яременко, О. В. Фомин // Автом. дороги і дор. буд-во. – Вип. 69. – К.: Будівельник, 2004. – С. 81-87.
8. Лантух-Лященко А. И. ЛИРА. Программный комплекс расчета и проектирования конструкций «Фаст». – М.-К., 2001. – 359 с.
9. Cheung Y. I. Finite strip analysis of slab and box girter bridges // Hong-Kong // Eng., 1985. – Vol. 19, № 6. – P. 31-41.
10. Кожушко В. П. Расчет пролетных строений балочных мостов разрезной системы // Сопроотивление материалов и теория сооружений. – Вип. 36. – К.: Будівельник, 1980. – С. 118-127.
11. Кожушко В. П. До розрахунку балочно-консольних прогінних будов на тимчасове навантаження // Автом. дороги і дор. буд-во. – Вип. 37. – К.: Будівельник, 1989. – С. 56-60.

Надійшла до редколегії 23.10.2007.

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ

У статті представлено оцінку та передбачення терміну служби залізобетонних мостів. Запропоновані моделі передбачення довговічності на основі детерміністичного та ймовірнісного підходів.

В статье представлены оценка и предсказание срока службы железобетонных мостов. Предложены модели предсказания долговечности на основе детерминистического и вероятностного подходов.

This paper presents an assessment and prediction of service life for reinforced concrete bridges. The deterministic and probabilistic approach prediction models of durability are proposed.

1. Проблема

Проблема долговечности, оценки ресурса сооружений сложна. Ее корректная постановка требует учета изменчивости материалов и нагрузок во времени, чувствительности к деградации конструктивной формы сооружения, условий строительства, условий эксплуатации, характеристик окружающей среды, социально-экономических требований.

Задача оценки ресурса мостов, как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации – всегда была наименее изученной в теории сооружений, а с другой стороны – наиболее значимой в социально-экономическом плане. Сегодня, в условиях весьма ограниченного финансирования системы эксплуатации, стратегическое планирование финансирования отрасли должно опираться на как можно более реалистичный прогноз технического состояния моста.

Считается, что долговечность железобетонных пролетных строений автодорожных мостов, которые проектируются в соответствии с нормативными требованиями [1, 2] будет составлять 80...100 лет. Какой была теоретическая база установления такого срока долговечности – неизвестно.

Нормами Советского Союза проектная долговечность не декларировалась вообще. В нормативах [1] срок 80 лет установлен из опыта проектирования и эксплуатации железобетонных пролетных строений. В Еврокоде [2] срок жизненного цикла мостов, независимо от конструкции и материала, установлен в 100 лет.

В работе [3] указывается, что средняя длительность жизненного цикла железобетонных мостов Японии установлена Министерством финансов – 60 лет. В то же время, исследование авторов работы [3], выполненное по статистическим данным Японии и США, показывает, что средняя продолжительность жизненного цикла железобетонных мостов составляет

93 года. Авторы исследования предлагают принять, как нормативный для мостов США, Японии и стран юго-восточной Азии, срок в 90 лет.

Реальный средний срок службы железобетонных пролетных строений в странах Европы составляет 50...60 лет.

Глобальная проблема прогноза долговечности состоит в том, чтобы объединить научный базис исследований деградации железобетона с требованиями правил проектирования, условий строительства, эксплуатации и получить теоретические модели оценки долговечности мостов на всех этапах жизненного цикла. Очевидной есть необходимость в разработке практического аппарата управления долговечностью.

2. Прогноз долговечности на этапе проектирования. Детерминистический подход

Со временем мы все больше убеждаемся, что декларируемый нормами проектирования мостов срок службы железобетонных пролетных строений в 80...100 лет является нереальным. Причины снижения ожидаемого ресурса есть на всех стадиях жизненного цикла сооружения. Популярным есть тезис о том, что главная причина низкой долговечности кроется в недостатках ухода в процессе эксплуатации.

Безусловно, что отсутствие надлежащей системы эксплуатации является весомой причиной низкой долговечности. Однако мы не имеем достаточных доказательств, что железобетонные пролетные строения в момент сдачи в эксплуатацию имеют декларируемую долговечность. Приходится признать, что снижение среднего срока службы закладывается еще на стадии изыскания и проектирования сооружения. В проектном решении никак не отображается, в каких условиях и с какой скоростью будет протекать деградация железобетонных элементов.

Очевидно, что сегодня есть необходимость обобщить теоретические и экспериментальные исследования проблемы долговечности желе-

зобетонных элементов мостов с целью формулировки модели деградации, которая могла бы быть аппаратом прогноза их ресурса. Ниже излагается детерминистический подход к оценке долговечности железобетонных элементов мостов.

Формулировка задачи

Наиболее популярной интегральной моделью деградации железобетона является кусочно-линейная функция (рис.1), описывающая уровень коррозии арматурной стали с течением времени в зависимости от состояния защитного слоя бетона [4, 5].

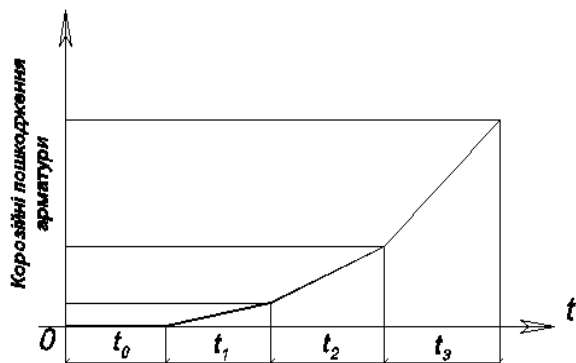


Рис. 1. Схема деградации железобетона

Идеализированная схема деградации, показанная на рис. 1, имеет четыре этапа, четыре характерных интервала времени:

t_0 — время полной карбонизации защитного слоя арматуры;

t_1 — начало коррозии арматуры, время разрушения пассивирующего слоя арматуры и незначительного трещинообразования;

t_2 — время коррозии арматуры, не защищенной пассивирующим слоем и интенсивного трещинообразования;

t_3 — время интенсивной коррозии, сопровождающейся скалыванием защитного слоя и достигающей своего предельного уровня, время прекращения эксплуатации.

Срок службы элемента T является суммой означенных интервалов времени.

Центральной идеей нашего исследования является гипотеза о том, что при условии декомпозиции процесса деградации, как это представлено идеализирующей диаграммой рис. 1, можно прогнозировать ресурс элемента суммой прогнозов каждого из четырех этапов:

$$T = t_0^p + t_1^p + t_2^p + t_3^p. \quad (1)$$

Что касается прогноза времени протекания каждого из этапов, то сегодня, по крайней мере, два первых этапа достаточно изучены для того, чтобы прогнозировать время t_0^p и t_1^p . С другой стороны, имеется немало научных свидетельств

того, что время протекания первого и второго этапов в сумме составляют приблизительно половину ресурса железобетонного элемента:

$$t_0^p + t_1^p \approx 0,5T. \quad (2)$$

Представленный далее аналитический обзор исследований оценки скорости деградации железобетона положен в основу формулировки задачи прогноза срока службы.

Этап 1 – карбонизация бетона

Деградация бетона со временем проявляется, прежде всего, в коррозии, являющейся результатом взаимодействия с углеродом окружающей среды. Карбонизация вызывает структурные изменения в бетоне, нейтрализацию защитного слоя, что приводит к интенсификации коррозии арматуры. В процессе карбонизации происходит превращение гидроксида кальция цементного камня в карбонат кальция (отсюда термин «карбонизация»):



В результате этой реакции снижается щелочность жидкой фазы бетона. От начального значения $pH = 12,5 \dots 13,1$ щелочность снижается до $pH = 8 \dots 9$. При этом бетон теряет свои пассивирующие защитные свойства арматуры. Именно потеря пассивирующей пленки и является началом коррозии арматуры, началом второго этапа деградации железобетона.

Прочность бетона в процессе карбонизации практически не снижается, Несколько уменьшается пористость и влагопроницаемость железобетона за счет того, что карбонат кальция частично заполняет поры в бетоне.

Наиболее распространенными моделями описания скорости деградации защитного слоя бетона есть общие законы аналитической теории диффузии, известные как уравнения первого и второго законов Адольфа Фика (1855 г.). Процесс карбонизации описывается одномерным дифференциальным уравнением первого закона Фика:

$$Q = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (4)$$

где Q — количество перенесенного в результате диффузии вещества (в данном случае — углерода), так называемая, плотность диффузионного потока;

$C = C(x, t)$ — концентрация диффундирующего вещества, функция координаты x и времени t ;

D — коэффициент диффузии газа в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$;

Решение дифференциального уравнения (4) при допущениях, что концентрация углерода линейно изменяется по толщине защитного слоя бетона и градиент концентрации является постоянным, дает связь времени с глубиной карбонизации бетона:

$$d_c = \left(\frac{2DCt}{m_0} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где d_c – глубина карбонизации в направлении координаты x , нормальной к поверхности бетона;

m_0 – параметр реакционных свойств бетона, функция свойств и количества цемента в бетоне.

Модель деградации (4), (5) есть феноменологической, ее параметры D , m_0 определяются экспериментально [6–9].

Другая форма представления свойств бетона в модели карбонизации представлена в документе [10]:

$$d_c = \left(\frac{2k_1 k_2 k_3 DCt}{a} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^n, \quad (6)$$

где d_c – глубина карбонизации;

k_1 – параметр среднего содержания влаги в бетоне;

k_2 – параметр условий эксплуатации;

k_3 – коэффициент водоцементного отношения;

a – граничное значение содержания CO_2 в карбонизированном бетоне;

t_0 – время эксплуатации, $t_0 \leq t$;

n – параметр климатических условий эксплуатации.

Этап 2 – деградация бетона под влиянием хлоридов

Второй этап деградации железобетона, характеризующийся разрушением пассивирующего слоя, есть началом коррозии арматуры.

Заканчивается этап, когда возле поверхности арматуры накапливается определенное критическое количество хлоридов. Ионы хлоридов, всегда присутствующие в окружающей среде, проникают через защитный слой по капиллярной системе и микротрещинам. Процесс диффузии хлоридов описывается моделью второго закона Фика [10, 11]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где $C = C(x, t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине x в момент времени t , $\text{кг}/\text{см}^3$;

D – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$;

t – время, с (отсчитывается от момента начала эксплуатации);

x – координата, нормальная к поверхности бетона, см.

Уравнение (7) при граничных и начальных условиях $C(x, t) = C_S$ для $x = 0$, $t > 0$ и $C(x, t) = C_I$ для $x > 0$, $t = 0$ и постоянном коэффициенте диффузии хлоридов в бетоне имеет решение:

$$C = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right], \quad (8)$$

где $\operatorname{erf}()$ – функция ошибок.

C_I – начальное содержание хлоридов в бетоне, $\text{кг}/\text{см}^3$;

C_S – концентрация хлоридов на поверхности защитного слоя бетона, $\text{кг}/\text{см}^3$

Решение (8) устанавливает связь глубины проникновения хлоридов со временем:

$$t = \frac{1}{D} \left[\frac{x}{2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C - C_I}{C_S - C_I} \right)} \right]^2, \quad (9)$$

где $\operatorname{erfc}()$ – дополнительная функция ошибок.

Многие исследователи считают [12], что учет граничных и начальных условий $x = 0$, $t > 0$ и $C(x, t) = C_I$ в решении уравнения (7) есть излишним в силу малости C_I сравнительно с концентрацией хлоридов на поверхности защитного слоя бетона C_S . В этом случае решение уравнения (7) имеет более простую форму:

$$C = C_S \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (10)$$

Зависимости (8) – (10) при известных параметрах коэффициента диффузии хлоридов в бетоне D , начальному содержанию хлоридов в бетоне C_I и концентрации хлоридов на поверхности защитного слоя бетона C_S дают возможность прогнозировать время этапа 2 деградации железобетона в зависимости от толщины защитного слоя, свойств бетона и характеристик окружающей среды.

Этап 3 – коррозия арматуры и интенсивное трещинообразование

Если задать критическое значение концентрации хлоридов на глубине толщины защитного слоя, зависимость (8) дает возможность установить время окончания этапа 3, то есть начала интенсивной коррозии арматуры, и в

конце этапа – время прекращения эксплуатации. В этом случае связь толщины защитного слоя d_c со временем его критического насыщения хлоридами дается зависимостью:

$$d_c = 2 \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{C_{CR} - C_I}{C_S - C_I} \right) \right) \sqrt{D \cdot t}, \quad (11)$$

где C_{CR} – критическое значение концентрации хлоридов.

Сегодня имеются исследования, хотя и несколько противоречивые, устанавливающие экспериментальным путем критические значения концентрации хлоридов C_{CR} в зависимости от физических характеристик бетона. Так, в работе [13] указывается, что для разных типов бетонов критическое количество хлоридов составляет 0,1...0,5 % от массы цемента. В англоязычной литературе [12] приводятся критические значения в таких границах: 0,4...1,5 % от массы цемента.

Изложенный подход детерминистического прогноза срока службы, основанный на теоретических основах классических законов диффузии, дает принципиальную возможность оценить время деградации бетона защитного слоя. Одна из таких попыток практического применения законов Фика для прогноза деградации приведена в табл. 1. Данные таблицы взяты из документа [9].

Если принять во внимание что бетоны в мостостроении имеют коэффициент диффузии хлоридов в бетоне D порядка 5×10^{-8} см²/с и принять гипотезу (2), то анализ табл. 1 не дает никаких оснований считать реальным срок эксплуатации в 100 лет.

Таблица 1

Прогноз времени до начала коррозии арматуры
($t_{cr} = t_0 + t_1$)

Толщина защитного слоя, мм	Время, лет при значениях коэффициента диффузии хлоридов в бетоне D , см ² /с		
	5×10^{-7}	5×10^{-8}	5×10^{-9}
25	0,6	5,6	56
50	2,3	23,0	230
75	5,0	50,0	500

Прогноз деградации бетона в процессе эксплуатации

Новейшая методология прогноза ресурса железобетонных конструкций мостов, находящихся в эксплуатации, приведена в работе [14] и в нормативном документе [15]. Мы излагаем здесь основные положения методологии, счи-

тая, что разработанный аппарат может быть обобщенным и применяться для оценки ресурса на этапе проектирования.

В основе прогноза лежит введенная в работе [14] «мера коррозионного состояния», являющейся количественным показателем деградации бетона защитного слоя в процессе эксплуатации. Остаточный ресурс защитного слоя бетона (по отношению к арматуре) определяется по формуле:

$$T_p = T_e \frac{S_1}{S_0 - S_1} \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (12)$$

где T_e – время эксплуатации;
 S_0 – начальная мера коррозионного состояния;
 S_1 – мера коррозионного состояния в рассматриваемый момент эксплуатации;
 K_1 – коэффициент агрессивности среды;
 K_2 – коэффициент, учитывающий применение дополнительной защиты поверхности бетона.

Мера коррозионного состояния вычисляется в функции двух параметров бетона – капиллярного водопоглощения ω и щелочности pH :

$$S = \frac{|\omega_t - \omega_k|}{\omega_k} \cdot \frac{|pH_t - pH_k|}{pH_k}, \quad (13)$$

где индекс t отвечает поточному значению водопоглощения ω и щелочности pH , тогда как индекс k – гранично-допустимому.

На наш взгляд, эта апробированная методика, применяющаяся в системе эксплуатации мостов, может быть обобщена для применения на этапе проектирования.

Представленный выше обзор моделирования деградации железобетонных элементов дает принципиальный теоретический базис прогноза ресурса элементов мостов. Однако, для разработки практического аппарата прогноза ресурса, очевидно, потребуется решение ряда задач, связанных с установлением значений параметров деградации D – коэффициента диффузии хлоридов в бетоне и C_{CR} – критического значения концентрации хлоридов в зависимости от: типа цемента, водоцементного отношения, физических характеристик бетона, характеристик окружающей среды. Нуждается также в проверке и уточнении гипотеза (2) $t_0^p + t_1^p \approx 0,5T$.

Представленные модели деградации бетона носят детерминированный характер, тогда как процесс коррозии бетона является стохастическим. Коэффициент диффузии вещества в бетоне является характеристикой случайного блуждания частицы (броуновское движение) и

должен определяться методами теории вероятностей и математической статистики. Для практической методики прогноза является необходимым установление доверительного интервала, установление нижней оценки ресурса элемента.

3. Вероятностная оценка долговечности по параметру трещинообразования

Другой, вероятностный подход изложен в нашем исследовании [16]. Здесь представлена вероятностная модель прогноза долговечности на этапе проектирования элемента. Модель имеет в качестве аргумента один параметр. Такая постановка задачи вызвана запросами проектирования конструкций по принципам управляемой надежности, управляемой долговечности. Область исследования ограничивается изгибаемыми железобетонными элементами автодорожных мостов.

Формулировка задачи

Общая постановка задачи заключается в анализе функции обобщенного резерва прочности, зависящей от времени

$$S(t) = R(t) - Q(t), \quad (14)$$

где $R(t)$ – несущая способность, монотонная убывающая функция; $Q(t)$ – обобщенная нагрузка, монотонная возрастающая функция.

Проблема надежности стохастической системы, описываемой уравнением (14), формулируется так

$$P_f(t) = \text{Prob}[\min S(X(\tau)) \leq 0 \text{ для } 0 < \tau < t], \quad (15)$$

где $S(X(t))$ – обобщенный резерв прочности, зависящей от времени.

Или, в других терминах, вероятность того, что в период времени t будет достигнуто предельное состояние конструкции

$$P_f(t) = \int_{S(X(t)) \leq 0} f[X(t)] dX(t), \quad (16)$$

где $f[X(t)]$ – плотность распределения функции базовых переменных.

Для прогноза долговечности мы используем численный подход, рекомендованный Европейским объединенным комитетом безопасности сооружений [17, 18]. Идея его сводится к моделированию функции обобщенного резерва прочности $S(\cdot)$ и поиску ее минимального значения, соответствующего достижению предельного состояния

Модель

В основу модели прогноза долговечности положена гипотеза о том, что интегральным параметром, определяющим достижение пре-

дельного состояния, является стохастическая характеристика безопасности $\beta(t)$, определяемая по ширине раскрытия нормальных или наклонных трещин

$$S(X(t)) = S(\beta(t)). \quad (17)$$

Приняты обычные допущения о нормальном распределении функций $R(t)$, $Q(t)$ и отсутствии корреляции между ними.

Функция деградации (обобщенный резерв прочности) принята в форме

$$S(\beta(t)) = \beta_0 a(t - t_0)^{-\lambda}, \quad (18)$$

где λ – параметр, получаемый регрессионным анализом статистического ряда времени достижения предельного состояния; t_0 – начальный период; a – масштабный параметр модели.

Характеристика надежности вводится как отношение среднего резерва несущей способности к его стандарту

$$\beta(0) = \frac{\mu_s}{\sqrt{D_s}}. \quad (19)$$

Для случая оценки долговечности по образованию нормальных трещин

$$\sigma_{bt} \leq mR_{bt,ser} \quad (20)$$

начальная характеристика надежности имеет вид

$$\beta(0) = \frac{\vartheta - 1}{\sqrt{V_{bt}^2 + \vartheta^2 V_{Rbt}^2}}, \quad (21)$$

где $\vartheta = \mu_{Rbt} / \mu_{bt}$ – среднее расчетное напряжение бетона и среднее вычисленное напряжение соответственно; V_{bt} и V_{Rbt} – коэффициенты вариации бетона.

Средние значения определяются по нормативным, следуя зависимостям

$$\mu_{Rbt} = \frac{mR_{bt,ser}}{1 - 1,64V_{Rbt}}; \quad \mu_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{1 + 1,64V_{bt}}. \quad (22)$$

Для случая долговечности, определяемой по раскрытию трещин от воздействия временной нагрузки, $a_{cr} \leq \Delta$ определяется аналогично.

Анализ модели

Для получения значений параметров модели (18) выполнен регрессивный анализ выборки времени T перехода в пятое дискретное состояние (первый капитальный ремонт или прекращение эксплуатации) 168 железобетонных ребристых сборных пролетных строений мостов Украины. Выборка характеризуется такими параметрами:

- среднее время перехода в пятое дискретное состояние $\mu_r = 34$ года;
- максимальное значение $T_{max} = 45$ лет;
- минимальное значение $T_{min} = 21$ год;
- дисперсия $D_T = 7,1 \text{ лет}^2$; стандарт $\sigma_r = 2,67$ года

Данные выборки послужили качественной базой для определения параметров:

- верхняя оценка $\lambda = 0,26$; $a = 1,60$; нижняя оценка $\lambda = 0,42$; $a = 2,10$.

На рис. 2 показаны графики функции деградации $S(\beta(t))$ для случая начальной характеристики безопасности $\beta(0) = 3,0$. Минимальное нормируемое значение функции принято равным $S(\beta(t))_{crit} = 1,5$ (табл. 2). Пересечение кривых с линией минимального значения дает точки времени до первого капитального ремонта или прекращения эксплуатации T_{crit} . Так получаем: верхняя оценка $T_{crit, sup} = 92$ года, нижняя – $T_{crit, inf} = 34$ года.

Таблица 2

Нормативные требования надежности элементов

	По первой группе граничных состояний	По усталости или другим постепенным отказам	По второй группе граничных состояний
Характеристика безопасности, β	3,8	1,5...3,8	1,5
Вероятность отказа, P_f	0,0001	0,0668...0,0001	0,0668

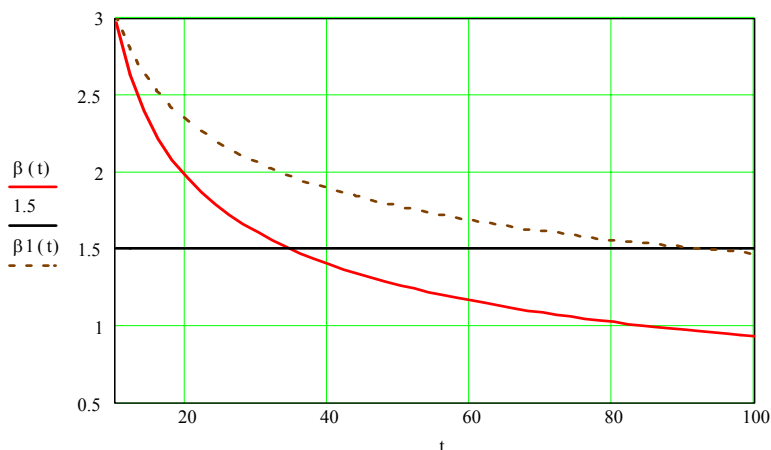


Рис.2. Функция деградации, при $\beta(0) = 3,0$
(ось OY – Характеристика безопасности, ось OX – Время, лет)

Открытые вопросы

Предложенная интегральная вероятностная модель прогноза долговечности изгибаемых железобетонных элементов автодорожных мостов представляет собой функцию деградации, единственным аргументом которой есть характеристика безопасности, получаемая по параметрам трещинообразования. Это простая, наглядная и удобная для практических приложений модель. Модель следует рассматривать как постановку задачи, как предлагаемый подход к прогнозу долговечности.

В практической методологии, вероятно, не удастся ограничиться одной единственной функцией деградации. Понадобится несколько функций, зависящих от конструктивных особенностей элемента. Предполагается, что

большой разрыв между верхней и нижней оценками долговечности вызван, в большей части, конструктивными особенностями.

С другой стороны, понадобится теоретическое обоснование принятого ныне предельного значения характеристики безопасности по второму предельному состоянию $\beta = 1,5$ ($P_f = 0,9332$). Таким обоснованием, на наш взгляд, должно быть исследование долговечности на основании кинетических уравнений коррозии защитного слоя бетона и арматуры, представленных выше в разд. 2.

4. Оценка долговечности в процессе эксплуатации

Научные разработки последних лет в области транспортных сооружений [19-22] послужили

ли основой для создания ведомственных нормативных документов [23, 24], позволяющих получить интегральную оценку и прогноз технического состояния конструктивных элементов и сооружения в целом и таким образом прогнозировать остаточный ресурс.

Теоретической базой прогноза является феноменологическая стохастическая модель деградации, описывающая накопление повреждений, как процесс, эволюция которого во времени определяется вероятностной дискретной марковской цепью [25]. Представленная ниже модель является дальнейшим развитием идеи описания накопления повреждений, следуя принципам дискретных марковских цепей с непрерывным временем.

Модель

Моделью нормативного документа [23] описывается стохастический процесс постепенного накопления повреждений элемента. В действительности процесс старения элемента сооружения состоит не только из постепенных отказов, но также из внезапных. Модель, представленная здесь, описывает процесс деградации, содержащий постепенные и внезапные отказы. Рассматривается система из 5 дискретных состояний. Эволюция системы описывается как дискретный процесс с непрерывным временем, с равномерно распределенными промежутками времени между состояниями. Процесс накопления повреждений содержит внезапные «проскоки» через одно состояние, как показано на графе процесса на рис. 3.

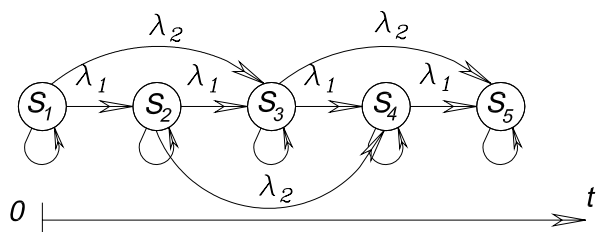


Рис.3. Граф процесса

Система может оставаться в одном из них, последовательно переходить из одного соседнего состояния S_i в другое с большим номером S_{i+1} , или перескочить через соседнее состояние S_{i+1} к следующему S_{i+2} . Состояние 5 – поглощающее. Это означает, что выхода из состояния 5 система не имеет.

В терминах дискретного марковского процесса [25] задача сводится к поиску безусловных вероятностей пребывания системы S на произвольном шаге k в состоянии S_i :

$$p_i(k) = \text{Pr ob}[S(k) = S_i];$$

$$k = 1, 2, \dots, 5; i = 0, 1, \dots, 4 \quad (23)$$

Вероятности $p_i(k)$ выражаются через *условные вероятности* перехода системы S на шаге k в состояние S_j при условии, что на шаге $k-1$ система была в состоянии S_i :

$$p_{ij}(k) = \text{Pr ob}[S(k) = S_j | S(k-1) = S_i];$$

$$i, j = 0, 1, \dots, 4 \quad (24)$$

Вероятности перехода (24) составляют квадратную *матрицу переходов* размером $n = 5$ в нашем случае. Обозначим ее \mathbf{P}_0 . На главной диагонали матрицы \mathbf{P}_0 стоят вероятности задержки системы в данном состоянии S_i на шаге k , на боковых диагоналях стоят $p_{ij}(k)$ – вероятности перехода системы из состояния S_i в состояние S_j .

В силу того, что на каждом шаге система может находиться только в одном из двух взаимно исключающих состояний, сумма всех вероятностей одной строки равняется единице:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}(k) = 1. \quad (25)$$

Равенство (25) является следствием того, что события марковской цепи несовместны и образуют полную группу.

Поиск вероятностей перехода, которые содержит стохастическая матрица \mathbf{P}_0 , является доминантой, центральным местом в разработке модели, описываемой дискретным марковским процессом. Когда матрица \mathbf{P}_0 найдена, по известным значениям условных вероятностей перехода и начальному значению безусловной вероятности пребывания системы в состоянии S_i все другие безусловные вероятности находятся по рекуррентной формуле:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1)p_{ij},$$

$$k = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

Будем считать, что переход системы из одного состояния в другое происходит как в пуассоновском потоке событий с интенсивностью $\lambda_{ij}(t)$. (Заметим, что пуассоновский поток является типичным марковским процессом). Переход из состояния S_i в состояние S_j происходит в момент наступления первого события потока. Вектор интенсивности пуассоновского потока обозначим \mathbf{E} .

Искомые вероятности марковской цепи $p_1(t), p_2(t), p_n(t)$ – функции времени являются вероятностями того, что система в момент t находится в состоянии S_i и определяются из системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными, в общем случае, коэф-

фициентами. Это известные уравнения Колмогорова, описывающие эволюцию дискретного марковского процесса с непрерывным временем.

В матричной форме уравнения имеют вид:

$$\frac{d\mathbf{P}(i, t)}{dt} = \mathbf{P}(i, t) \cdot \mathbf{E}. \quad (27)$$

К уравнениям (27) присоединяются начальные условия:

$$\text{при } t=0 \quad \begin{aligned} p_1(t) &= 1; \\ p_2(t) &= p_3(t) = p_4(t) = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Кроме того, в решении системы дифференциальных уравнений (27) используется нормировочное условие (25).

Матрица вероятностей перехода $\mathbf{P}(i, t)$ в (27), очевидно, зависит от времени t . Подчеркнем, что время считается от начала процесса. Что касается матрицы интенсивности перехода (скоростей деградации) \mathbf{E} – то она, в общем случае, также зависима от времени. Однако, для практического применения чаще получают модели с независимой от времени матрицей \mathbf{E} и даже в случаях $\mathbf{E} = \text{const}$.

В нашей модели положим интенсивности перехода (скорости деградации) независимыми от шага и времени. Интенсивность перехода в соседнее состояние обозначим λ_1 , перехода через одно состояние – λ_2 и их сумму $\varphi = \lambda_1 + \lambda_2$. Матрица \mathbf{E} уравнения (27) будет иметь вид:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varphi & \varphi & \varphi & \lambda_1 \\ 0 & \lambda_1 & \lambda_1 & \lambda_1 \\ 0 & 0 & \lambda_2 & \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

В соответствии с графом процесса модели (рис.1) и зависимости (2) система уравнений (27) будет иметь вид:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \begin{bmatrix} -\varphi p_1 & 0 & 0 \\ -\varphi p_2 & \lambda_1 p_1 & 0 \\ -\varphi p_3 & \lambda_1 p_2 & \lambda_2 p_1 \\ -\lambda_1 p_4 & \lambda_1 p_3 & \lambda_2 p_2 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Здесь λ_1 – интенсивность перехода из состояния S_i в состояние S_{i+1} ;

λ_2 – интенсивность перехода из состояния S_i в состояние S_{i+2} ; $\varphi = \lambda_1 + \lambda_2$.

Определим параметр λ_1 из условия:

$$k = 5; i = 4; t = 100. \quad (31)$$

Это условие означает, что система переходит из состояния S_4 в состояние S_5 , когда воз-

раст элемента достигает 100 лет. Интенсивность перехода «перескока» примем $\lambda_2 = 0,05 \cdot \lambda_1$.

Численное решение системы дифференциальных уравнений (31) по методу Рунге-Кутты дает значение условных вероятностей перехода, из которых формируется матрица переходов:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 0,9851 & 0,0049 & 0,0100 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9704 & 0,0097 & 0,0199 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9560 & 0,044 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9418 & 0,0582 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Примем $p_k = 0,9998$ и по известным значениям условных вероятностей перехода \mathbf{P}_0 из уравнения (26) получим вектор безусловных вероятностей пребывания системы в состоянии j :

$$\mathbf{P}_j = [0,9998 \quad 0,9849 \quad 0,9558 \quad 0,9138 \quad 0,8605]^T \quad (33)$$

Сравнение полученного вектора вероятностей (33) с вектором, соответствующим модели нормативного документа [23], показывает, что деградация в данном случае протекает более интенсивно. В этом проявляется вероятность внезапных отказов (проскоков).

На графике рис. 4 приведены графики снижения надежности, соответствующие нормативной модели [23] (кривая ModAr) и модели с внезапными отказами (30) – кривая ModBr. Как видно, деградационные процессы в модели (30) протекают значительно интенсивнее.

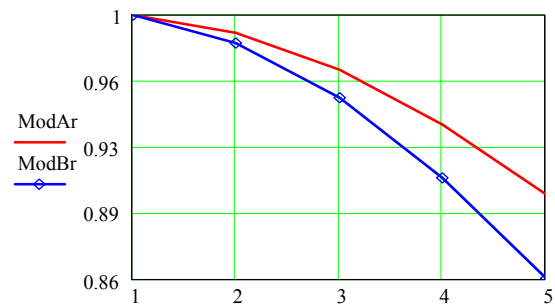


Рис. 4. Надежность элементов в дискретных состояниях (ось OY – Вероятности; ось OX – Дискретное состояние)

Надо полагать, что представленная модель накопления повреждений даст более реалистичный прогноз остаточного ресурса в тех случаях, когда в установленные сроки обследования [26] выявлено резкое ухудшение технического состояния элементов сооружения. Это уточнение прогноза может оказать существен-

ное влияние на стратегический план эксплуатации моста.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДБН України В.2.3-14: 2006 «Мости та труби. Правила проектування». – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.
2. EUROPEAN PRESTANDARD ENV 1991-1-1. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 1: Basis of design. – European Committee for Standardization. – Brussels. – 85 pp.
3. Matsumoto T. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance / T. Matsumoto, S. S. Beng // Proc. Japan-Taiwan int. workshop on urban regeneration. Maintenance and green material, 2005. – P. 23-36.
4. Tuutti K. Corrosion of steel in concrete // CBI Research, fo 4:82. – Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
5. Lounis Z. Reliability-based service life prediction of deteriorating concrete structures / Z. Lounis, M. S. Madanat // Proc. 3rd Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions, Vol. 1, 2001. – P. 965-972.
6. Алексеев С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисиль. – М., 1990. – 316 с.
7. Бліхарський З. Я. Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі / З. Я. Бліхарський, М. Г. Сташук, О. М. Малик // Зб. «Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж». – Донецьк, 2003. – С. 318 – 324.
8. Лучко Й. Й. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд / Й. Й. Лучко, І. І. Глагола, Б. Л. Козаревич. – Львів: Каменяр, 1999. – 229 с.
9. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20 с.
10. Service-Life Prediction / State of the Art Report / Reported by ACI Committee 365 // ACI Manual of Concrete Practice. – Part 1. – 2001.
11. Takewaka K. Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments / K. Takewaka, S. Matsumoto // ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988. – P. 381-400.
12. Hartt W. Critical Literature Review of High-Performance Corrosion Reinforcements in Concrete Bridge Applications / W. Hartt, R. Powers, V. Leroux, D. K. Lysogorski // Center for Marine Materials. – Florida Atlantic University, 2004. – 53 pp.
13. Розенталь Н. К. Коррозионные процессы в модифицированных бетонах // Зб. «Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж». – Донецьк, 2003. – С. 129-133.
14. Чернявский В. Л. Оценка остаточного ресурса по мере функционального состояния эксплуатирующихся железобетонных конструкций / В. Л. Чернявский, Ю. Б. Гиль // Зб. наук. пр. Луганського нац. ун-ту, № 40 (52). – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2004. – С. 279-285.
15. Технологічний регламент з підготовки поверхні залізобетонних конструкцій для нанесення ремонтних складів. ТР-218-02071168-362-2004. – К.: Укравтодор, 2004. – 35 с.
16. Лантух-Лященко А. І. Проблема довговічності залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – Вип. 73. – Національний транспортний університет. – К., 2006. – С. 204-210.
17. JCSS. Probabilistic model code. The Joint Committee on Structural Safety. – Zurich, 2001. – 138 pp.
18. ISO ST 2394. General Principles on Reliability for Structures. – Zurich: ISO, 1998. – 50 pp.
19. Лантух-Лященко А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – Вип. 57. – 1999. – С. 183-188.
20. Дегтяр В. Г. До проблеми оцінки зносу елементів моста / В. Г. Дегтяр, А. І. Лантух-Лященко // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – Вип. 59. – Український транспортний університет. – К., 2000. – С. 33-36.
21. Лантух-Лященко А. І. До проекту державних будівельних норм з оцінки технічного стану мостів // Зб. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 2. – Львів: Каменяр, 2000. – С. 78-83.
22. Лантух-Лященко А. І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – Вип. 62. – К., 2001.
23. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються. ВБН В.3.1-218-174-2002. – Державна служба автомобільних доріг України. – К., 2002. – 74 с.
24. Лантух-Лященко А. І. Настанови з визначення технічного стану мостів / А. І. Лантух-Лященко, В. І. Кір'ян, П. М. Коваль та ін. – ТАУ. – К.: Логос, 2002. – 117 с.
25. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
26. ДБН В.2.3-14:2002. «Мости та труби. Обстеження і випробування».

Поступила в редколлегию 23.10.2007.

Й. Й. ЛУЧКО (Львівський державний аграрний університет),
А. Я. ПЕНЦАК, Р. Я. ПЕЛЕХ (ТзОВ «Фірма Терміт», Львів)

КОНСТРУКЦІЯ ТА РОЗРАХУНОК З'ЄДНАННЯ АРМАТУРНИХ СТЕРЖНІВ ОБТИСКНИМИ ВТУЛКАМИ

У роботі розглянуто проблему з'єднання високоміцної вуглецевої і термомеханічно зміцненої арматури. Проведено аналіз результатів попередніх досліджень із світової практики. Запропоновано конструкцію з'єднання та проведені дослідження балкових залізобетонних елементів, армованих з'єднаною арматурою, на міцність, тріщиностійкість та деформації. Ці дослідження показали доцільність такого з'єднання та надійну працездатність залізобетонних конструкцій, армованих з'єднаною арматурою.

В работе рассмотрена проблема соединения высокопрочной углеродной и термомеханически упрочненной арматуры. Проведен анализ результатов исследований из мировой практики. Предложено конструкцию соединения и проведены исследования балочных железобетонных элементов, армированных соединенной арматурой, на прочность, трещиностойкость и деформации. Эти исследования показали целесообразность такого соединения и надежную работоспособность железобетонных конструкций, армированных соединенной арматурой.

The problem of connection of high-strength carbon and thermomechanically strengthened reinforcements is considered in the paper. The analysis of results of previous investigations from world practice is conducted. The construction of connection is offered and the research of the beam reinforced concrete elements reinforced by the combined reinforcement on durability, crack-durability and deformations is conducted. This research showed the expedience of such a connection and reliable working capacity of the reinforced concrete constructions reinforced by the combined reinforcement.

Проблема та її актуальність. На сучасному етапі розвитку будівельної індустрії широко використовують збірні та монолітні залізобетонні конструкції мостових та транспортних споруд, армовані високоміцною стержневою арматурою різних класів міцності. Для армування бетону в основному застосовують стержні термомеханічно зміцненої арматури стандартної довжини 12 м класу А400С; А600; А800С з періодичним профілем. Потреба у такій арматурі по країні становить сотні тисяч тонн. Крім того, на будівельних підприємствах України складається значна кількість (до 20 % від виробництва арматури) стержневої арматури вказаних класів нестандартної довжини за одночасно існуючого гострого дефіциту такої сталі.

У вітчизняному будівництві, починаючи з п'ятдесятих років минулого століття, для малої арматури періодичного профілю використовували трудомісткі і енергоємні зварні стикові або напускні з'єднання. Однак термомеханічно зміцнена сталь арматури класу А600С, А800С ($\sigma_s = 1100$ МПа) має суттєвий для виробництва недолік – погано зварюється, тобто зварні з'єднання із неї не задовольняють експлуатаційним вимогам для арматури цього класу. Тому з'єднані так стержні нестандартної довжини можна використовувати як арматуру

класу А400 із заниженою розрахунковою міцністю, $\sigma_s = 600$ МПа.

Враховуючи це, інженери та вчені розробляли та впроваджували альтернативні способи з'єднання малої арматури. До найпоширеніших належать з'єднання арматури за допомогою різьбової втулки. Суть цього способу полягає в тому, що кінці стержнів обточують і нарізають різьбу відповідного діаметра. Потім на арматуру накручують втулку з внутрішньою різьбою, завдовжки приблизно 100 мм (довжина змінюється залежно від діаметра арматури), з'єднуючи стержні між собою. Цей спосіб має досить суттєві недоліки: складність обробки кінців арматурних стержнів (обточування, виготовлення втулки з внутрішньою різьбою), а також створення додаткових концентраторів напружень внаслідок нарізання різьби.

У наш час особливо поширений перехід на уніфіковану зварювану арматурну сталь з межею текучості $\sigma_T \geq 500$ Н/мм² (А500С і В500) замість менш міцної і гірше зварюваної арматури класу А-ІІІ (А400) з межею текучості $\sigma_T \geq 400$ Н/мм². До 2005 р. всі металургійні заводи України, Росії, Білорусії, Молдови і Латвії – виробники арматури періодичного профілю – освоїли масове промислове виробництво тер-

момеханічно зміцненої стержневої арматурної сталі класу А500С, А600С діаметром 6...40 мм за СТО АСЧМ 7-93 і холоднодеформованої сталі того ж класу міцності діаметром 4...12 мм, що позначається як В500С.

Головними причинами необхідності повної заміни арматури класу А-III (А400) на арматурну сталь класу А500С та інші є:

- відсутність крихких руйнувань власне арматури та її зварних з'єднань, виконаних дуговым зварюванням, за рахунок низького (до 0,22 %) вмісту вуглецю і структури «природного композиту», що одержується в результаті термомеханічного зміцнення у потоці прокату сталі класу А500С;

- значна (до 22 %) економія сталі за рахунок більш високої межі текучості сталі класу А500С;

- універсальність використання, що дозволяє за рахунок високої пластичності в поєднанні з високою межею пружності і низькою собівартістю, використовувати її у всіх видах арматурних виробів як робочу, так і конструктивну і навіть попередньо напружену арматуру.

Аналіз результатів попередніх досліджень. Перехід на арматуру класу А500С (В500С), А600С, А_T-IV, А-V, А_T-V, А_T-VI та їх з'єднання детально досліджено у працях [1–20]. Діючі нормативні документи ТСН 102-00, СП 52-101-2003 та інші нормативні документи [21–32] дозволяють виконувати проектування або будівництво всіх без виключення будівель і споруд в районах з розрахунковою зимовою температурою до –50 °С включно при звичайних, динамічних і вібраційних навантаженнях з використанням цих сталей як робочої або конструктивної арматури у вигляді цілих стержнів або зварних виробів.

Деякі статистичні дані про механічні властивості сталі класу А500С діаметром 6...40 мм [1, 4] і міцність зварних з'єднань, виконаних дуговым зварюванням, наведені в [4, 5].

За всім комплексом механічних властивостей, витривалості, зчепленню з бетоном і зварюваністю ця арматурна сталь відповідає нормам європейських стандартів EN 10080-2005, BS 4449-2005 та ін.

Іншою найважливішою проблемою є стикування арматури як для монолітного залізобетону, так і для довгомірних збірних залізобетонних конструкцій. Тут можна розглядати три способи з'єднання: внапуск (без зварювання), дугове зварювання або механічні з'єднання [15, 16, 17, 20-33].

В Україні, як і в країнах СНД та в багатьох країнах світу, дотепер загальноприйнятим способом з'єднання арматури на монтажі було зварювання: ручне дугове протяжними швами, внапуск і з накладками, ванно-шовне та з багатшаровими швами на сталевій скобі-накладці, а також дугове навхрест.

Для стикування арматурної сталі класу А500С ці види дугового зварювання можуть використовуватися практично без обмеження, але вимагають значної витрати електроенергії і трудовитрат, а також жорсткого систематичного контролю.

Треба зважити на те, що більшість великих аварій залізобетонних конструкцій у процесі їх будівництва відбулися саме через використання дугового зварювання гарячекатаної сталі класу А400 (А-III), переважно марки 35ГС при вмісті вуглецю і марганцю в ній на верхній межі допускалися за ГОСТ 5781.

Тому використання з'єднання при монтажі для арматури класу А400 (А-III) термозміцнених та високовуглецевих арматурних стержнів не рекомендується. Як вказувалося вище, зварювання вимагає контролю як початкового металу, так і якості виконання з'єднань і їх міцності, при цьому для контролю ванно-шовного зварювання необхідно використання неруйнівних методів, зокрема ультразвукову дефектоскопію [34, 35], що значно здорожує роботи на влаштування стиків. Напуск завдовжки від 20Ø до 40Ø, залежно від умов роботи арматури і кількості стиків в одному перерізі, призводить до втрати від 3,5 до 27 % арматури при її діаметрах від 10 до 40 мм і довжині стержнів, що стикуються 6,0 м. При цьому найбільші втрати металу мають місце при стикуванні стержнів великих діаметрів: 32...40 мм – відповідно до 22...27 %. Проте проблема цим не обмежується. Для гарантії міцності таке з'єднання вимагає значної витрати поперечної арматури, а мінімальні величини об'ємного армування повинні складати, наприклад, при міцності бетону 42,3 і 31,5 Н/мм² не менше 0,01...0,016 [3, 32, 33], тобто при стикуванні внапуск стержнів великих діаметрів загальні втрати металу можуть скласти до 40 %. Крім того, використання з'єднань внапуск для стикування арматури великих діаметрів призводить до обмеження об'єму для бетону у зоні стику і небезпеки зниження реальної міцності залізобетонного елемента, що особливо небезпечно в колонах і інших стиснутих у стадії експлуатації залізобетонних елементах з невеликим поперечним перерізом.

Ідея стикування високоміцних термомеханічно зміцнених арматурних стержнів механічним способом за допомогою обтискних втулок (обойм, гільз) виникла наприкінці 80-х років на заводах Дніпропетровська та Запоріжжя. На цих заводах назбиралось багато арматури нестандартної довжини, а її стикування за допомогою зварювання суттєво знижує міцність (до 40 %), що є дуже значними втратами. Ця проблема дуже актуальна і при армуванні довгомірних конструкцій (мостових, стояків ліній електропередач та ін.) як монолітних, так і збірних.

На основі звернень керівників заводів та будівельних організацій була сформована інститутами ІЧМ НАН України і ФМІ НАН України програма «Розробка методів забезпечення довготривалої міцності, корозійної стійкості пресованих з'єднань арматурних стержнів у залізобетонних конструкціях» ПС.008.93, за якою безпосередньо за участю автора та під його керівництвом у 1990-1996 рр. було досліджено міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних балкових елементів, що армовані з'єднаною арматурою методом обтиснення втулок при короткочасних та довготривалих навантаженнях, корозійна стійкість пресованих з'єднань арматурних стержнів у різних агресивних середовищах [6].

Різні аспекти цих досліджень описані та опубліковані у багатьох працях [7–13, 15–17, 19, 20]. Зокрема розрахунок фізико-механічних, геометричних та силових параметрів, імовірності утворення дефектів у обоймі і арматурі на стику арматури і обойми розглянуті у працях [6, 7, 11], а дослідження арматурного прокату із серповидним профілем на витривалість та втрату міцність з'єднань арматурних стержнів діаметром 10, 12, 14, 16 мм та класів високоміцної арматури А_T-IV, А_T-V, А_T-VI, А_T-VII, А500С і А600С обтискною втулкою наведено у працях [7, 14, 18, 19]. На даний час розроблені методичні рекомендації зі з'єднання арматурних стержнів обтискними втулками [21] та технічні умови з'єднання стержнів арматурних обтискними втулками [22] та стандарт організації України (СОУ) [23].

Конструкції з'єднань. Головним є експлуатаційна безпека будівлі. Тому в більшості країн світу, у тому числі у Великобританії, США, Німеччині, Росії та Україні для стикування арматури діаметром 10...40 мм використовують механічні з'єднання, що гарантують надійність споруди, які описані у працях [32–39] та показані на рис. 1-10.

Механічні з'єднання, за умов їх роботи в залізобетонних конструкціях і залежно від вимог, що пред'являються до їх міцності на розтяг і стиск, поділяються на розтягнуті і стиснуті контактні. Розтягнуті стики можуть використовуватися в залізобетонних конструкціях з розрахунковими опорами розтягу і стиску за нормативними документами для арматури відповідних класів.

Стиснуті контактні стики можуть використовуватися тільки для залізобетонних конструкцій, арматура яких у стадії експлуатації стиснута, і на розтяг не розраховуються. Їх розрахункові опори стиску приймаються за нормативними документами для арматури відповідних класів.

Міцність, деформативність і пластичність розтягнутих механічних з'єднань арматурної сталі на розтяг повинні відповідати нормам та даним, які наведені у працях [21–23, 36]

За способом виготовлення механічні з'єднання поділяються на:

- впресовані, створювані шляхом багаторазового або одноразового поперечного обтиску або протяжки з'єднувальної втулки (муфти) (рис.1–4, 10);
- гвинтові, у тому числі стержні спеціального гвинтового профілю, які створюються шляхом накручування муфти і контргайок з різьбою на гвинтовий періодичний профіль стержнів (рис. 3), що з'єднуються, і стержні будь-якого профілю з різьбою на кінцях (рис.5а, 5b; 6), які створюються шляхом накручування муфти на кінці стержнів, що з'єднуються, із заздалегідь зробленою різьбою ;
- болтові, створювані шляхом закручування болтів, розташованих на бічній поверхні муфти (рис.7; 8а, b, c).

За конструкцією механічні з'єднання поділяються на:

- стандартні, що використовуються для з'єднання стержнів одного діаметру, коли хоча б один стержень може вільно обертатися (рис. 3);
- перехідні, використовуються для з'єднання стержнів різних діаметрів (рис. 6);
- позиційні, коли жоден із стержнів, що з'єднується, не може вільно обертатися (рис.5с; 8d; 9);
- монтажні, для з'єднання арматурних стержнів з профілем або пластиною з використанням зварювання.

Механічні з'єднання можуть застосовуватися для стикування стержнів арматури діаметром 12...40 мм класів А500С за СТО АСЧМ

7-93, А400 (А-III), А600 (А-IV) і А800 (А-V) за ГОСТ 5781; Ат600 (Ат-IV) і Ат800 (Ат -V) за ГОСТ 10884.

Потрібно також відзначити досвід [2] стикування і анкерування попередньо напруженої стержневої арматури класів А600 і Ат800 за допомогою впресованих муфт завдовжки всього 4ϕ в умовах заводів ЗБВ. У 2004 р. Асоціацією «Залізобетон» випущені «Рекомендації з механічних з'єднань арматурної сталі для залізобетонних конструкцій», що рекомендуються Держбудом Росії для широкого використання [27–29].

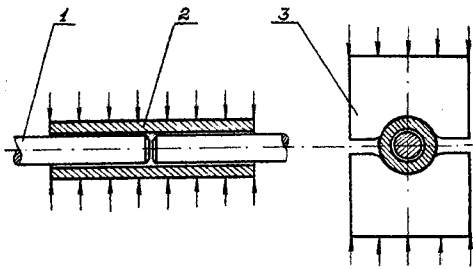


Рис.1. Принципова схема втулкового з'єднання:
1 – арматурний стержень; 2 – обтиска втулка;
3 – пуансон

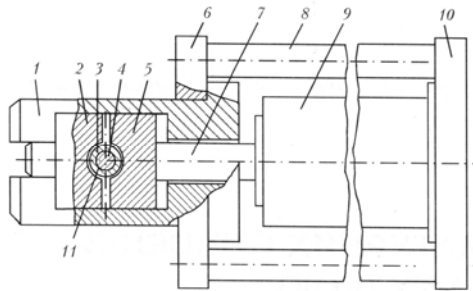


Рис.2. Пристрій для з'єднання арматурних стержнів:

1 – робоча головка; 2 – верхній пуансон; 3 – стальна втулка; 4 – кінці стержнів арматури; 5 – нижній пуансон; 6 – верхня опорна плита; 7 – шток; 8 – колони; 9 – силовий гідроциліндр; 10 – нижня опорна плита; 11 – перехідна вставка

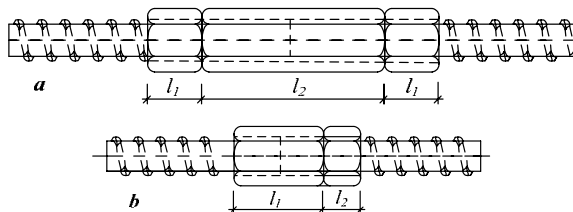


Рис.3. Гвинтові з'єднання арматурної сталі періодичного профілю:

a – розтягнений; *b* – стиснений контактний стик

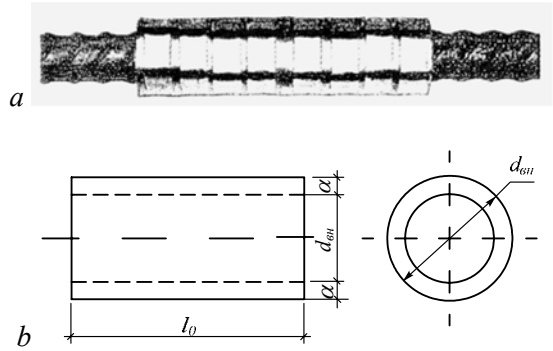


Рис.4. Запресований стик арматури, виконаний на будівельному майданчику на мобільному обладнанні багаторазовим поперечним деформуванням з'єднувальної муфти проміжками:

a – загальний вигляд; *b* – з'єднувальна муфта для запресування стиків

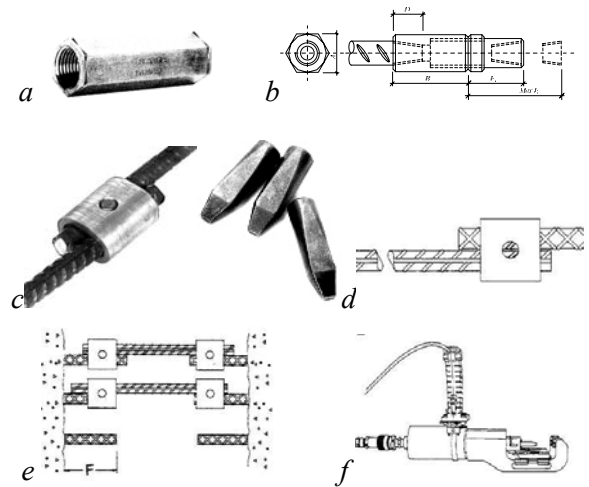


Рис.5. З'єднання арматурних стержнів виробництва фірми «ERICO»:

a – стандартне з'єднання з конічною різьбою типу А12; *b* – позиційне з'єднання стержнів з конусною різьбою типу Р13; *c* – загальний вигляд з'єднання типу Quick Wedge; *d, e* – схема з'єднання стержнів Quick Wedge; *f* – апарат для влаштування з'єднання Quick Wedge;

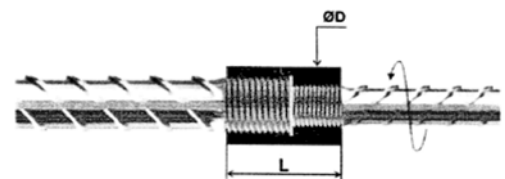


Рис.6. Перехідне з'єднання BARTEC виробництва фірми «DEXTRA»

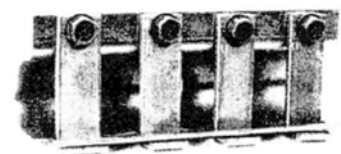


Рис.7. З'єднання Speed Sleeve

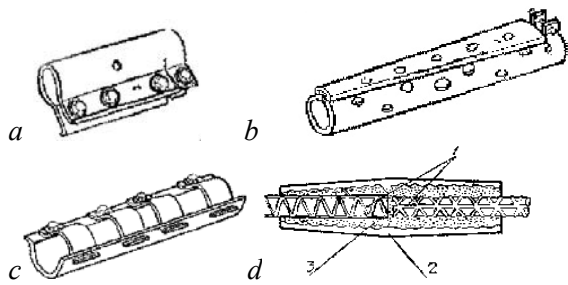


Рис.8. З'єднання арматурних стержнів фірм США:

a, b, c – за допомогою фрикційно-затискних пристроїв;
d – за допомогою муфти, заповненої розчином;

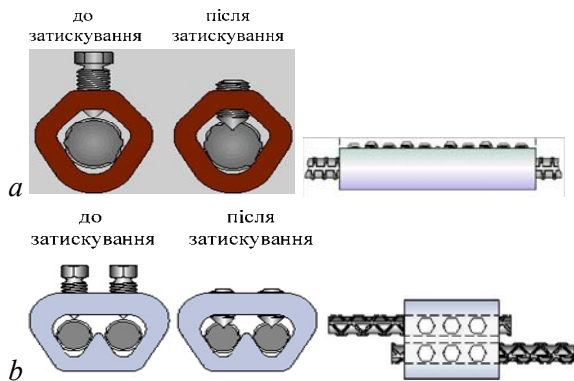


Рис.9. З'єднання арматурних стержнів системою Zap Screwlock System:

a – в стик; *b* – в напуск

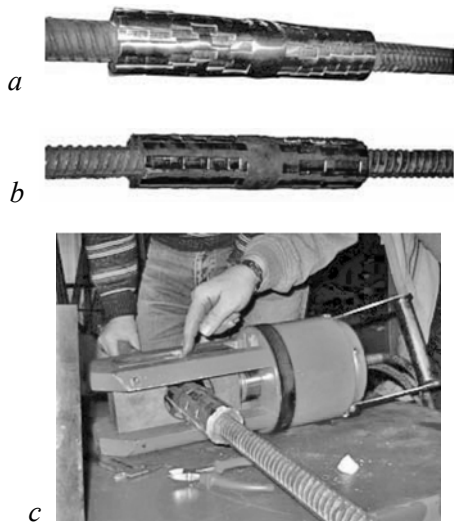


Рис.10 З'єднання арматури фірмою «Следящие тест-системы» (Росія):

a, b – вигляд арматурного стику муфтами;
c – гідравлічний прес для стикування арматури;

Лабораторією арматури НДІЗБ розроблені Технічні умови і проведені сертифікаційні випробування механічних впресованих з'єднань (ТОВ «Спрут»), гвинтових з конусною різьбою («Еріко-Лентон») і з циліндричною різьбою («Бартех-Декстра»), номери сертифікатів сис-

теми «Мосстройсертификация» відповідно RU.MCC.190.620.2.ПР.11647;
RU.MCC.190.620.5.ПР.3.10884;
RU.MCC.190.620.5.ПР.11020.

Вартість механічних з'єднань для розтягнутої у стадії експлуатації арматури співмірна з вартістю арматури, яка має перевитрати при використанні з'єднань на зашморг, але нижче вартості стиків, виконаних ванним або ванношовним зварюванням, а трудовитрати на будівельному об'єкті нижчі, ніж при будь-якому виді зварювання. Так, тривалість стикування розтягнутого стику опресовуванням арматури на устаткуванні фірми «Спрут» складає близько 20 хв., а виготовлення гвинтового з'єднання фірми «Лентон» з конусною різьбою – менше 10 хв.

Вартість стиснутих контактних з'єднань істотно нижче за рахунок менших довжин муфт і можливості використання клинових і інших найпростіших пристроїв [36]. Разом з тим, при використанні механічних з'єднань потрібна підготовка арматури, наприклад, обов'язкове торцювання стержнів для стиснутих контактних стиків, нарізка або накатка різьби на торцях арматурних стержнів при різьбових з'єднаннях і їх затягування динамометричним ключами з певним зусиллям і т.ін. Словом, це інший, більш високий рівень технології, що вимагає якісного виконання комплексу підготовчих заходів і робіт безпосередньо на об'єкті.

У лабораторії арматури НДІЗБ були досліджені залізобетонні елементи з деякими видами механічних з'єднань, що згинаються і стиснуті. Встановлено, що при відповідності з'єднувальних елементів відповідним нормам і точному виконанні технологічного регламенту міцність залізобетонних елементів з такими з'єднаннями арматури не відрізнялася від міцності аналогічних залізобетонних елементів із суцільними стержнями – стержнями без стику. Ці дослідження в міру можливості будуть продовжені і на інших видах з'єднань.

Встановлено, що використання механічних з'єднань економічно виправдане при використуванні арматури діаметром 25...40 мм і у будь-якому випадку забезпечує більш високу надійність залізобетону, перевірену багаторічною практикою інших країн [30, 32–34].

Як бачимо в Україні проведені серйозні дослідження в цьому напрямку, отримані патенти [15, 17], згадані технічні умови та стандарт засвідчує про високий науковий рівень розробки в цьому напрямку.

Числове розв'язування осесиметричної задачі з'єднання арматурних стержнів пружною обтискною втулкою. Великогабаритні конструкції часто потребують укріплення чи армування за допомогою дуже довгих стержнів. Технологічно такі стержні виготовляються з окремих кусків арматури, та їхнє з'єднання є важливим виробничим завданням. Існуючий метод такого з'єднання за допомогою зварювання не є досконалим для високовуглецевої арматури, оскільки при накладанні і подальшому зварюванні втрачається частина поперечного перерізу арматури, тобто міцність з'єднання за недостатньо доброї зварюваності може бути значно зниженою.

У даній роботі за допомогою числового моделювання обґрунтовується технологія іншого способу механічного з'єднання арматури за допомогою накладання на стержні пружної циліндричної обтискної втулки.

Нижче наведемо основні дані з'єднання арматурних стержнів обтискною втулкою, які покладені в основу цього методу з'єднання. На рис. 11 представлено розрахункову схему з'єднання.

1. Розглядається задача теорії пружності про обтискання за допомогою навантаження P співосних абсолютно жорстких циліндричних стержнів, що дотикаються торцем і охоплені пружною циліндричною втулкою, що займає тривимірну область V , обмежену поверхнею Σ (рис. 12). З математичного погляду вона полягає у розв'язуванні рівнянь рівноваги у втулці.

$$\left(C_{ijkl} u_{k,l} \right)_{,j} + X_i = 0 \quad (1)$$

при використанні мішаних крайових умов на її поверхні $\sum (\Sigma_u \cup \Sigma_\sigma = \Sigma)$:

$$u_i \Big|_{\Sigma_u} = u_i^0, \quad C_{ijkl} u_{k,l} n_j \Big|_{\Sigma_\sigma} = S_i^0. \quad (2)$$

Тут C_{ijkl} – компоненти тензора модулів пружності; u_i , X_i , S_i^0 , n_j – компоненти векторів переміщень, об'ємних та поверхневих сил, а також зовнішньої нормалі до поверхні Σ_σ , відповідно; $u_{i,j} \equiv \partial u_i / \partial x_j$. За однаковиими індексами, які зустрічаються в одному виразі двічі, відбувається підсумовування від одиниці до трьох.

У випадку ізотропного тіла компоненти тензора модулів пружності матимуть вигляд

$$C_{ijkl} = \alpha \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}),$$

де α, μ – параметри Ляме; δ_{ij} – компоненти одиничного тензора.

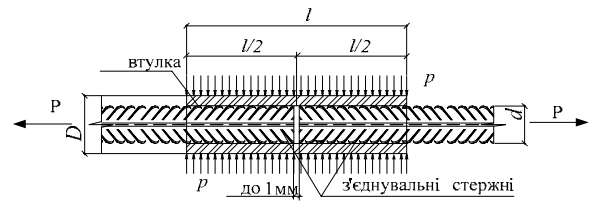


Рис. 11. Розрахункова схема з'єднання арматурних стержнів обтискною втулкою

2. Для числового розв'язування задачі (1), (2) зручно використовувати її варіаційну постановку [37], яка полягає у мінімізації лагранжіана

$$L = \int_V W dV - \int_V X_i u_i dV - \int_{\Sigma_\sigma} S_i^0 u_i d\Sigma \quad (3)$$

де $W = \frac{1}{2} C_{ijkl} u_{i,j} u_{k,l}$ – питома енергія пружної деформації.

Далі в (3) перейдемо до циліндричних координат z, r, φ

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi, \quad z = z.$$

Враховуючи симетричність області V і зовнішніх сил \bar{X}, \bar{S}^0 відносно осі Oz , достатньо обмежитися аналізом відповідної прямокутної області (рис. 12), в якій лагранжіан (3) набуде вигляду

$$L_0 = \int_{V_0} r W(\vec{v}) dV + \int_{V_0} r X_i v_i dV - \int_{\Sigma_0} r S_i^0 v_i d\Sigma; \quad (4)$$

$$W(\vec{v}) = \frac{1}{2} \tilde{C}^{ijkl} \nabla_j v_i \nabla_l v_k,$$

де V_0 – двовимірна область (Σ_0 – одновимірна її межа), отримана перерізом області V площинною, яка проходить через вісь Oz (рис. 12). Тут $\vec{v}(v_1, v_2)$, $v_1 \equiv u_z(z, r)$, $v_2 \equiv u_r(z, r)$, $u_\varphi \equiv 0$; \tilde{C}^{ijkl} – компоненти тензора C в циліндричній системі координат; $\nabla_j v_i$ – коваріантні похідні компонент вектора переміщень v_i за відповідною координатою.

Застосовуючи детально описану в [38] процедуру варіаційно-різницевого методу для осесиметричних задач для кожного типу крайових умов на Σ_0 , отримаємо різницеву схему $A^h \vec{u}^h + \vec{F}^h = 0$, яка є системою лінійних алгеб-

раїчних рівнянь. Цю систему розв'язуємо ітераційним методом [39].

Описаний метод реалізований у вигляді пакету програм, які дають можливість враховувати різні крайові умови, параметри області та середовища.

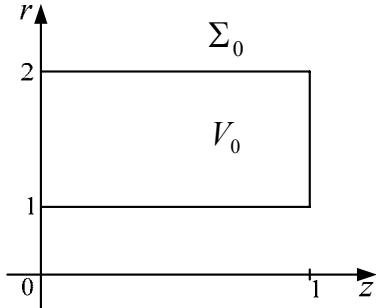


Рис. 12. Верхня половина області V_0

3. Використовуючи наведений вище метод, розв'язана осесиметрична пружна задача про механічний контакт арматури з обтискною втулкою. Всі розрахунки проводились у безрозмірних величинах. З огляду на це вважалось, що товщина втулки $d=1$, її модуль пружності $E=1$, а коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$. З огляду на ребристу поверхню арматури, контакт між втулкою та арматурою був неповним. Оскільки стержні арматури припускались абсолютно жорсткими, то при контакті ребер арматури (рис. 13) із втулкою були відсутні радіальні переміщення u_r . Довжини ребер арматури дорівнювали відстані між ними.

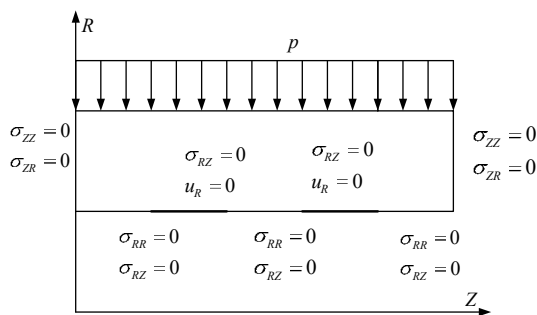


Рис. 13. Пружна обтискна втулка з вказаними крайовими умовами

Отримані значення радіальних переміщень u_r/d і напружень σ_{rr}/E при відповідному значенні стискувального навантаження P зображені на рис. 14. На цьому рисунку також показано, як буде змінюватись внутрішня поверхня втулки.

Числовий аналіз засвідчив, що найбільші за абсолютною величиною нормальні радіальні напруження σ_{rr}/E виникають на краях ребер арматури. Радіальні переміщення u_r/d , навпаки, найбільші на краях пружної муфти.

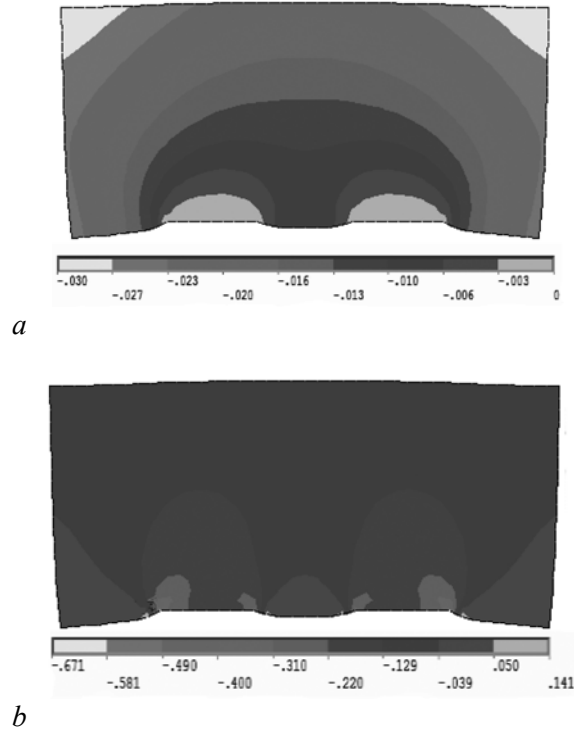


Рис. 14. Діаграми: a – переміщень u_r/d при заданому навантаженні $P=1$; b – напружень σ_{rr}/E при тому ж навантаженні

Експериментальні дослідження міцності з'єднань арматурних стержнів. Програма досліджень включає в себе виготовлення залізобетонних балок, що армовані стержнями, з'єднаними обтиснутою втулкою. Конструкція дослідних балок та схема армування приведені на рис. 15. Каркас залізобетонних балок складається з робочої арматури $\varnothing 12$ та $\varnothing 14$ мм класу 500С довжиною 2080 мм. В крайніх третях прогону забезпечено поперечне армування арматурою $\varnothing 3$ мм класу Вр-1 довжиною 180 мм.

Крок поперечних стержнів становив 100 мм, загальна кількість стержнів поперечної арматури 16 шт., верхнє армування виконане в крайніх третях прогону зі стержнями $\varnothing 3$ мм класу Вр-1 довжиною 730 мм. Відсоток армування поперечного перерізу конструкції становить 0,542 %. Перед виготовленням балок здійснювали попередній натяг робочої арматури, що з'єднана за допомогою опресованих втулок [20, 36, 40] електромеханічним способом.

Для перевірки і контролю напружень у з'єднанні арматурних стержнів на арматурі і на втулці були наклеєні тензорезистори.

Паралельно проводили заміри деформації, які здійснювали за допомогою індикатора годинникового типу. Для цього на робочій арматурі закріплено два стержні з базою 100 мм. За величиною деформації і значення модуля Юнга для арматурного стержня і втулки можна визначити напруження, як окремо в елементах, так і в з'єднанні у цілому при їх випробуванні. Дослідження балок виконували у випробувальній лабораторії ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України на випробувальній машині ЕУО20. Результати цих досліджень описані у праці [40].

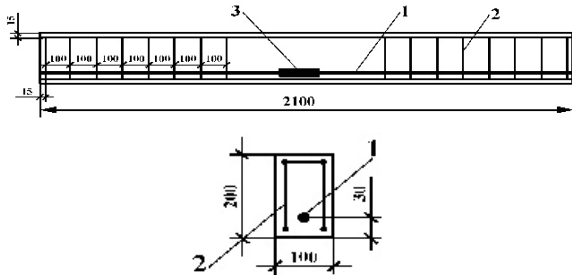


Рис. 15. Конструкція залізобетонної балки:
1 — робоча арматура; 2 — конструктивна поперечна арматура; 3 — втулка

На рис. 16 наведені діаграми втоми різних способів з'єднання арматури. Зокрема, показано, що з'єднання втулкою з пластичною вставкою за характеристиками близьке до арматури без з'єднання, а стикування зварюванням має суттєві відхилення.

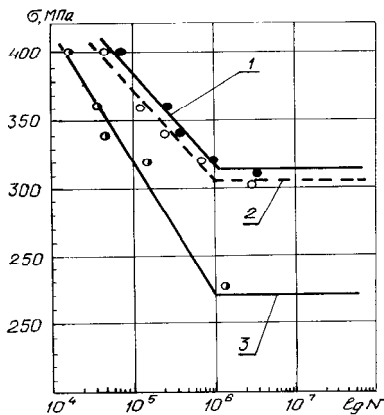


Рис. 16. Діаграми втоми різних способів з'єднання арматури:
1 — суцільна арматура; 2 — втулка з пластичною вставкою; 3 — стикувальна зварка

Характер руйнування при втомному випробуванні показано на рис. 17.

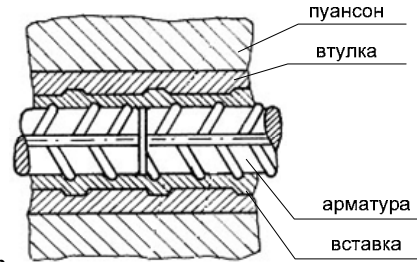


Рис. 17. Характер руйнування при втомному випробуванні

В процесі експериментальних досліджень також проводились випробування з'єднання арматури з пластичною вставкою (рис. 18).



a



b

Рис. 18. Схема з'єднання арматури втулкою з пластичною вставкою:

a — загальний вигляд; b — схема влаштування пластичної вставки

Загальний вигляд випробувальної установки та балкові зразки після випробування наведено на рис. 19, 20.



Рис. 19. Загальний вигляд випробувальної установки

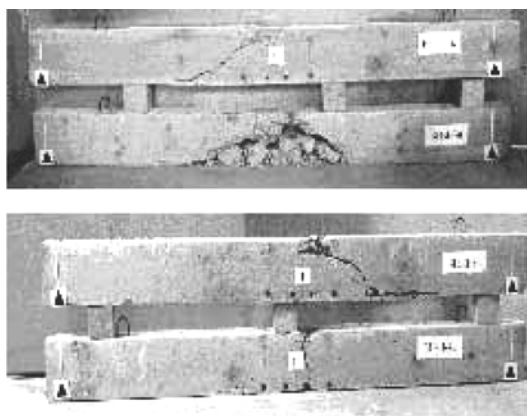


Рис. 20. Балкові зразки після випробування

Геометричні та фізико-механічні характеристики балок наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики балок

Шифр балок	b , мм	h , мм	h_0 , мм	d , мм	μ , %	σ_{sp} , МПа
БНІ-1к	102	215	190	12	0,58	529
БНІ-2в	100	197	172	12	0,66	529
БНЗІ-3в	102	196	171	12	0,65	529
БНЗІ-4в	104	201	176	12	0,62	529
БНІІ-1к	101	198	173	14	0,88	433
БНІІ-2в	103	196	171	14	0,87	433
БНЗІІ-3в	102	197	172	14	0,87	433
БНЗІІ-4в	102	200	175	14	0,86	433

Аналіз результатів та висновки.

У даний час тільки впресовані стики виготовляються в Росії на вітчизняному устаткуванні фірм «Спрут» і «СТС». Інші види з'єднань вимагають використання імпортного устаткування і муфт. Тому для дійсно масового використання стиків методом обтиску металевих обойм необхідна організація виробництва в Україні втулок та гвинтових муфт і устаткування для нарізки або накатки різьби на арматурі.

Ще одним, абсолютно необхідним заходом для забезпечення зниження витрати металу і бетону та підвищення надійності будівель і споруд з монолітного залізобетону, особливо в умовах можливого прогресуючого руйнування, є використання систем попереднього натягу арматури на бетон «без зчеплення», але ця тема вимагає більш докладного обговорення.

Обґрунтовано доцільність переходу на арматурну сталь класу А500С (В500С). Розглядається проблема стикування арматури для монолітного залізобетону. Порівнюються різні способи з'єднання арматури, показані переваги механічних з'єднань.

У роботі також наведена характеристика матеріалів, конструкція зразків та технологія їх виготовлення. Описана методика та схема випробування балкових залізобетонних зразків на втомну міцність та фізико-механічні характеристики балок, армованих з'єднаною арматурою.

Отже, числовий розв'язок осесиметричної задачі з'єднання арматурних стержнів пружною обтискнуою втулкою показав, що найбільші за абсолютною величиною нормальні радіальні напруження σ_{rr}/E виникають на краях ребер арматури. Радіальні переміщення u_r/d , навпаки, найбільші на краях пружної муфти.

Арматура залізобетонних конструкцій і арматурні роботи при виготовленні будівель різного призначення з монолітного залізобетону переживають в даний час революційні зміни, пов'язані з реалізацією найсучасніших досягнень науки і техніки в цій області.

Підсумовуючи результати наведених досліджень, можна стверджувати, що маючи методичні рекомендації, технічні умови та стандарт організації України (СОУ) на з'єднання арматурних стержнів та перевірку працездатності конструкцій на різні силові фактори з таким армуванням можна пропонувати до застосування у будівництві будівель і транспортних споруд.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. СТО АСЧМ 76-93 «Прокат периодического профиля из арматурной стали» // ТУ / Асе. – Черметстандарт, 04.10.1993.
2. Мадатян С. А. Арматура железобетонных конструкций. – М.: Воентехлит, 2000. – 256 с.
3. Дегтярев В. В. Прочность сцепления арматуры периодического профиля с бетонами классов прочности В-10-В-100 // Бетон и железобетон, 2005. – № 6. – С. 13-18.
4. Дегтярев В. В. Изменчивость механических свойств и площади поперечного сечения арматуры класса А500С // Бетон и железобетон, 2005. – № 1. – С. 2-7.
5. Мадатян С. А. Новая горячекатаная свариваемая арматура класса А500С / С. А. Мадатян, В. В. Дегтярев, Л. А. Зборовский и др. // Бетон и железобетон, 2001. – № 6. – С.12-14.
6. Звіт № держ. реєстр. 0197V003094 по темі: Розробка методів довготривалої міцності, корозій-

- ної стійкості пресованих з'єднань арматурних стержнів у залізобетонних конструкціях. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 1996. – 145 с.
7. Лучко Й. Й. Методи оцінки несучої здатності і підвищення тріщиностійкості залізобетонних елементів конструкцій. – Львів: Слово і комерція, 1997. – 435 с.
 8. Лучко Й. Й. Методологічні аспекти з'єднання арматури обтиснутою втулкою / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, М. Д. Куцигін, Ю. М. Беклемішев // П Міжн. симп. «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». – Вип. 2. – Львів, 1996. – С. 347-349.
 9. Лучко Й. Й. Міцність, тріщиностійкість та деформативність балок, армованих з'єднаною арматурою // Зб. наук. пр. «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». – Вип. 4. – Львів: Каменяр, 2000. – С. 371-378.
 10. Лучко Й. Й. Міцність, тріщиностійкість та деформативність залізобетонних плит, армованих з'єднаною арматурою // Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 3. – Львів: Каменяр, 2001. – С. 148-153.
 11. Лучко Й. Й. Розрахунок фізико-механічних, геометричних та силових параметрів пластичного деформування товстостінних трубчатих з'єднань арматурних стержнів // Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 4. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 112-122.
 12. Лучко Й. Й. Оцінка працездатності втулкового з'єднання арматурних стержнів / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, М. М. Гвоздюк // Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 5. – Львів: Каменяр, 2003. – С. 137-142.
 13. Ігнатишин М. І. Сучасний стан проблеми з'єднання арматури періодичного профілю у залізобетонних конструкціях / М. І. Ігнатишин, М. М. Гвоздюк // Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 6. – Львів: Каменяр, 2004. – С. 42-47.
 14. Лучко Й. Й. Дослідження арматурного прокату із серповидним профілем / Й. Й. Лучко, І. В. Мельник, С. Т. Штаюра // Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 6. – Львів: Каменяр, 2004. – С. 82-86.
 15. Лучко Й. Й. Деклараційний патент на винахід України № 63168А (УЩЧСБ/03) «Спосіб з'єднання арматурних стержнів періодичного профілю та пристрій для його реалізації» / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, М. І. Ігнатишин. – Бюл. № 1 від 15.01.2004.
 16. Лучко Й. Й. Методичні рекомендації з проектування та технології виготовлення залізобетонних конструкцій армованих стержнями, що з'єднані обтиснутими втулками / Й. Й. Лучко, В. В. Гембара, Я. Л. Іваницький та ін. – Львів: ФМУ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 27 с.
 17. Іваницький Я. Л. Деклараційний патент на винахід України № 10126 «Спосіб механічного з'єднання арматури» / Я. Л. Іваницький, М. М. Гвоздик, В. В. Варський, Й. Й. Лучко. – Бюл. № 11 від 15.11.2005.
 18. Коваль П. М. Дослідження витривалості зразків арматури класу А500С / П. М. Коваль, І. П. Бабяк // Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 7. – Львів: Каменяр, 2005. – С. 57-62.
 19. Іваницький Я. Л. Втомна міцність з'єднань арматурних стержнів / Я. Л. Іваницький, В. В. Варський, Й. Й. Лучко, М. М. Гвоздюк, У. А. Вергун // Зб. наук. пр. «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». – Вип. 6. – Львів: Каменяр, 2005. – С. 334-338.
 20. Іваницький Я. Л. Спосіб з'єднання арматурних стержнів, обтиснутих втулкою / Я. Л. Іваницький, Й. Й. Лучко, М. М. Гвоздюк, У. А. Вергун // Зб. наук. пр. «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», 2006. – С. 435-439.
 21. МР В.2.3-218-03534506-510:2006. Методичні рекомендації «З'єднання арматурних стержнів обтискними втулками». – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2006. – 18 с.
 22. ТУ У В.26.6-00018112-257:2006. З'єднання стержнів арматурних обтискними втулками. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2006. – 15 с.
 23. Лучко Й. Й. СОУ 45.2 – 10018112 – 016: 2007. З'єднання арматурних стержнів обтискними втулками / Й. Й. Лучко, А. Я. Пенцак, О. О. Стабравський. – Львів: ЛРНТУ Держдор НДІ, 2007. – 14 с.
 24. ДБН. В. 2.3 – 14: 2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування.
 25. СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции» / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.
 26. Территориальные строительные нормы г. Москвы (ГСП 102-00) «Железобетонные конструкции с арматурой классов А500С и А400С». – М., 2000. – 52 с.
 27. Рекомендации по применению в железобетонных конструкциях термомеханически упроченной свариваемой стержневой арматуры новых видов. – М.: ГНЦ «Строительство». НИИЖБ, 1997. – 16 с.
 28. СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». – М.: ФГУП ЦПП. – 23 с.
 29. Свод правил по проектированию и строительству (СП 52-101-2003) «Бетонные и железобетон-

- ные конструкции без предварительного напряжения арматуры». – М.: ФГУП ЦПП. – 53 с.
30. Eurocode 2. Design of concrete structures. – Part 1.1: General rules for buildings. CEN / 225 p., April 2003.
 31. Гурова Г. Г. Опыт применения ультразвукового контроля качества сварной арматуры / Г. Г. Гурова, В. П. Павлов, Л. Н. Уварова // Новые виды арматуры и ее сварка. – М.: НИИЖБ, 1982. – С. 208-211.
 32. Cagley J. R. Comparing costs – butt splices versus lap splices / J. R. Cagley, R. Apple // Concrete International. – July 1998. – P. 55-56.
 33. Mechanical connection of reinforcing bars // ACI Structural Journal, 1991. – V. 88, № 2.
 34. ACI318 / Building Code. Requirements for Structural Concrete and Commentary. – Farmington Hills: American Concrete Institute, 1985.
 35. Самокрутов А. А. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхометодом: состояние и перспективы / А. А. Самокрутов, В. Г. Шевальдин, В. Н. Козлов // В мире НК, 2002. – № 2 (16). – С. 6-10.
 36. Лучко Й. Й. Нові технології і матеріали для арматурних робіт в монолітних залізобетонних конструкціях та спорудах / Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 9. – Львів: Каменярь, 2007. – С. 12-25.
 37. Победря Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981.
 38. Шешенин С. В. Применение вариационно-разностного метода к осесимметричным задачам теории упругости / С. В. Шешенин, И. С. Кузь // Упругость и неупругость. – М., 1987. – С. 39-44.
 39. Шешенин С. В. О прикладных итерационных методах / С. В. Шешенин, И. С. Кузь // Вычислительная механика деформируемого твердого тела. – Вып. 1. – М., 1990. – С. 63-75.
 40. Лучко Й. Й. Матеріали та балкові зразки, армовані з'єднаною арматурою для дослідження втомної міцності / Й. Й. Лучко, І. І. Вергун, С. М. Сендерський // Зб. наук. пр. «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». – Вип. 8. – Львів: Каменярь, 2007. – С. 79-83.

Надійшла до редколегії 22.10.2007.

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНОГО НАСИПУ ІЗ ВАРІАНТАМИ ПІДСИЛЕННЯ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ

В статті наведені результати числового аналізу напружень і деформацій залізничного насипу із варіантами його підсилення залізобетонними плитами і компенсаційним шаром.

В статье приведены результаты численного анализа напряжений и деформаций железнодорожной насыпи с вариантами ее усиления железобетонными плитами и компенсационным слоем.

In the article the results of numerical analysis of tensions and deformations of railway embankment with the variants of its strengthening by reinforced concrete plates and compensative layer are presented.

Земляне полотно повинно забезпечувати безперервну роботу колії – складної системи з динамічним впливом рухомого складу. Воно повинно бути міцним, стійким та не допускати значних залишкових деформацій [1]. При проектуванні конструкції земляного полотна необхідно враховувати вплив вібродинамічних навантажень від поїздів та зміну властивостей ґрунтів, з яких воно складається, особливо глинистих. Основна площадка земляного полотна є одним із важливих елементів залізничної колії, який визначає стабільність її геометрії. Разом з тим, складні умови роботи ґрунтів основної площадки є основною причиною появи і розвитку дефектів та деформацій, що потребує підвищення витрат на утримання колії.

Стан земляного полотна значною мірою визначає довговічність залізничної колії і об'єми виправочно-рихтувальних робіт з поточного утримання. Оскільки земляне полотно є спорудою, яка експлуатується тривалий час, то всі роботи по його підсиленню повинні проводитися під максимальні очікувані навантаження і швидкості руху поїздів.

Для того, щоб науково обґрунтувати варіан-

ти 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) [2].

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. Таким чином, розроблена просторова модель базується на реальних характеристиках земляного полотна двоколіїної дільниці, які отримані при спорудженні існуючого насипу.

Для досліджень залізничного насипу розроблена розрахункова схема земляного полотна, яка змодельована у комплексі SCAD (рис. 1).

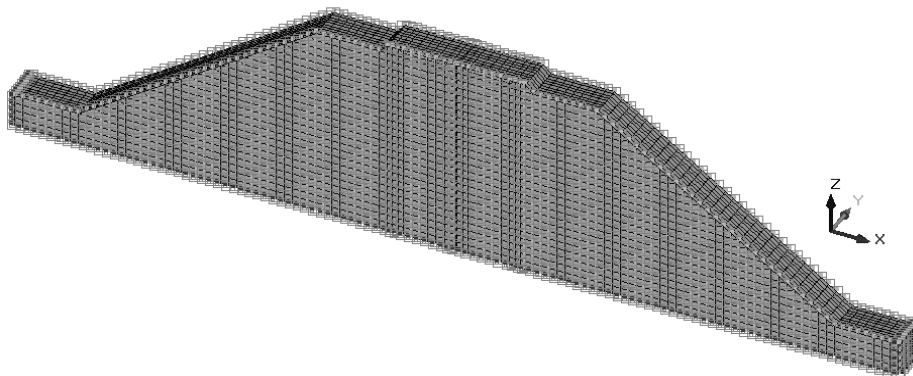


Рис. 1. Розрахункова схема земляного полотна високого насипу

Загальна кількість вузлів схеми – 19 940 шт. (біля 55 тисяч ступенів волі), кількість скінченних елементів – 17 073 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 земляного полотна – 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 [2]. У схемі застосовані як призматичні СЕ із трикутною основою (у моделюванні укусу), так і паралелепіпеди (у моделюванні земляного полотна та основи). Призматичні СЕ із трикутною основою перевірені на умови вироджених та «голчастих» елементів, кути трикутника не менше 45° .

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всіх трьох 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 [3].

Деформаційні характеристики обрані у відповідності із дослідженими ґрунтами земляного полотна:

Жорсткість 1: суглинок щільний, густина

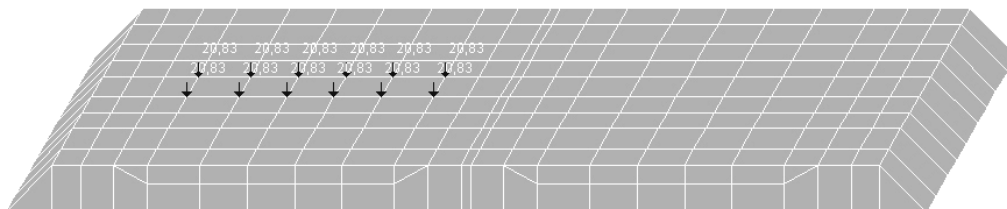


Рис. 3. Розташування навантажень на верхню будову колії (ВБК)

Було прийнято дві схеми завантаження СЕ-моделі: 1-а схема – локомотив без додатку власної ваги земляного полотна; 2-а схема – навантаження схеми лише власною вагою.

2-а схема навантаження надається для контролю переміщень та напружень в моделі, які викликані власною вагою земляного полотна, 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.

Надана розроблена модель приймається як базовий контрольний варіант (Варіант 0), з яким у подальшому порівнюються інші варіанти розрахунків із зміненою конструкцією зем-

$\gamma = 2,0 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E = 30\,000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,3$;

Шар 2 – щебінь, густина $\gamma = 2,3 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E = 100\,000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,3$;

Шар 3 – залізобетон шпали, густина $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$, приведений модуль пружності $E = 3,51 \cdot 10^7 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,03$.

У ролі навантаження моделі було прийнято локомотивне, тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від локомотиву ($P = 20 \text{ т}$) із урахуванням коефіцієнту динамічності $\mu = 1,25$ (рис. 2).



Рис. 2. Схема поїздного навантаження

На рис. 3 показано розташування навантажень 1-ї схеми на головній площадці насипу. Навантаження на вісь локомотива розподілене по ширині шпали, на яку воно прикладене, причому воно розподілене по 12-ти вузлах СЕ, які входять до геометричного місця розміщення шпали, і складає 20,83 кН.

ляного 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 [2].

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...5 наведені результати розрахунку МСЕ земляного полотна із поїздним навантаженням (Варіант 0).

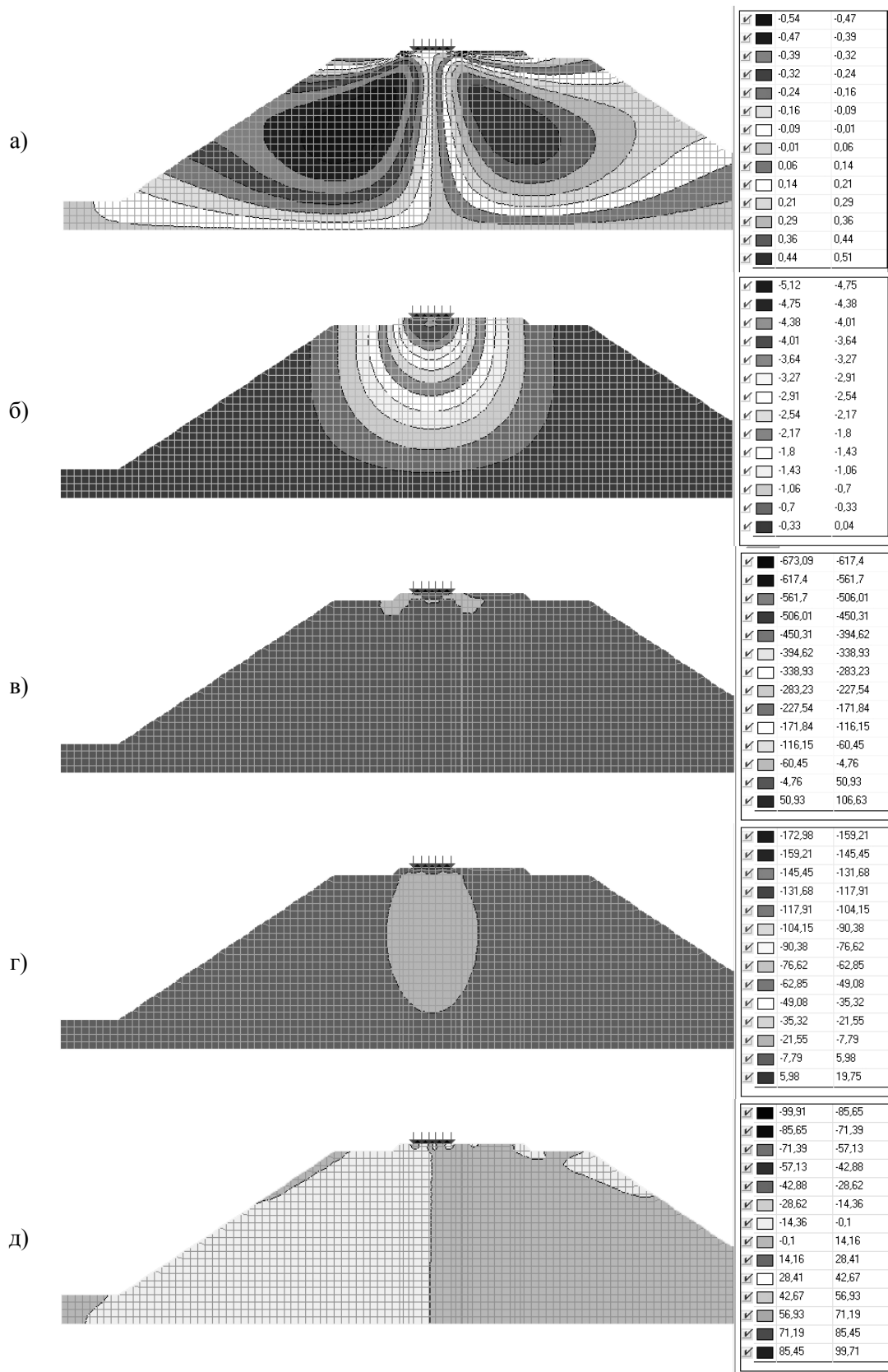


Рис. 4. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 0, 1-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна); в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

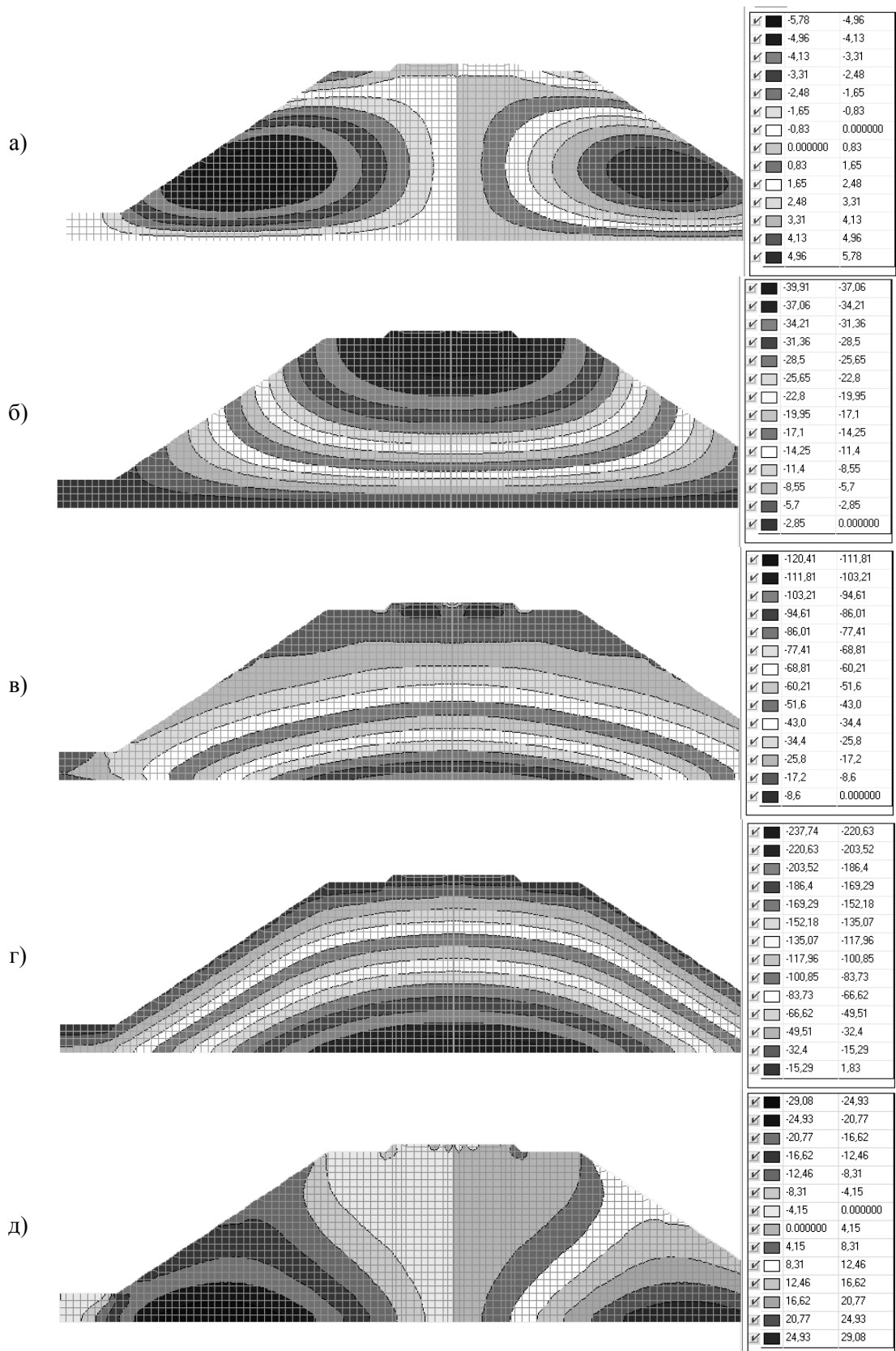


Рис. 5. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 0, 2-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);
 в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

В якості першого варіанту для дослідження взято варіант зміни конструкції земляного полотна із розміщенням в ньому шару з більшими

на відміну від матеріалу масиву деформаційними характеристиками, наприклад, щебенево-бітумного компенсаційного шару (рис. 6).



Рис. 6. Схема земляного полотна із шаром зі збільшеними деформаційними характеристиками (компенсаційний шар)

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 – щебенево-бітумна суміш (товщина компенсаційного шару – 0,5 м): густина $\gamma = 2,0 \text{ т/м}^3$, модуль пружності

$E = 80\,000 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu = 0,3$. Всі інші характеристики моделі (граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними.

В якості другого варіанту для дослідження взято варіант залізобетонного кріплення баластної призми, конструкція земляного полотна показана на рис. 7.

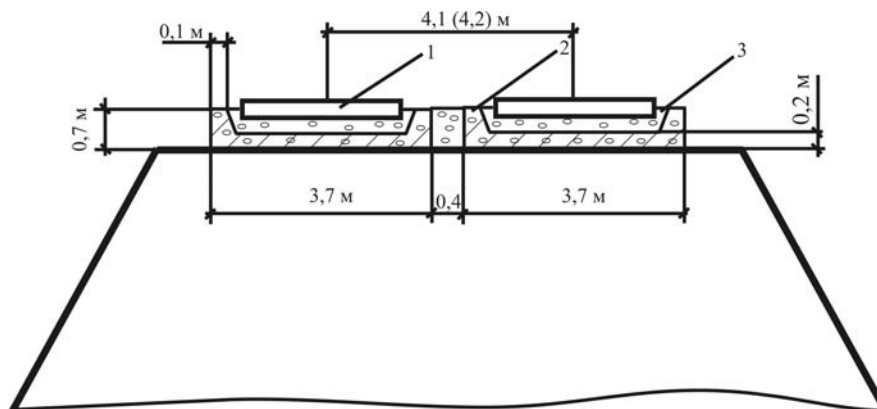


Рис. 7. Схема земляного полотна із залізобетонним кріпленням баластної призми: 1 – залізобетонна шпала; 2 – залізобетонне кріплення; 3 – шар щебеню

Для дослідження Варіанту 2 базова модель (Варіант 0) була змінена у відповідності до конструкції та деформаційних властивостей

земляного полотна із залізобетонним кріпленням баластної призми (рис. 8).

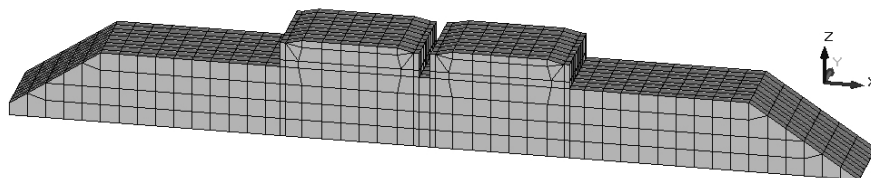


Рис. 8. Відображення конструкції укріплення земляного полотна в SE-моделі (фрагмент)

Всі інші характеристики моделі (деформаційні характеристики, граничні умови, навантаження та їх сполучення) залишилися відповідно до моделі Варіанту 0 незмінними.

На рис. 9. наведені результати розрахунку моделі Варіанту 1, на рис. 10 – результати розрахунку моделі Варіанту 3.

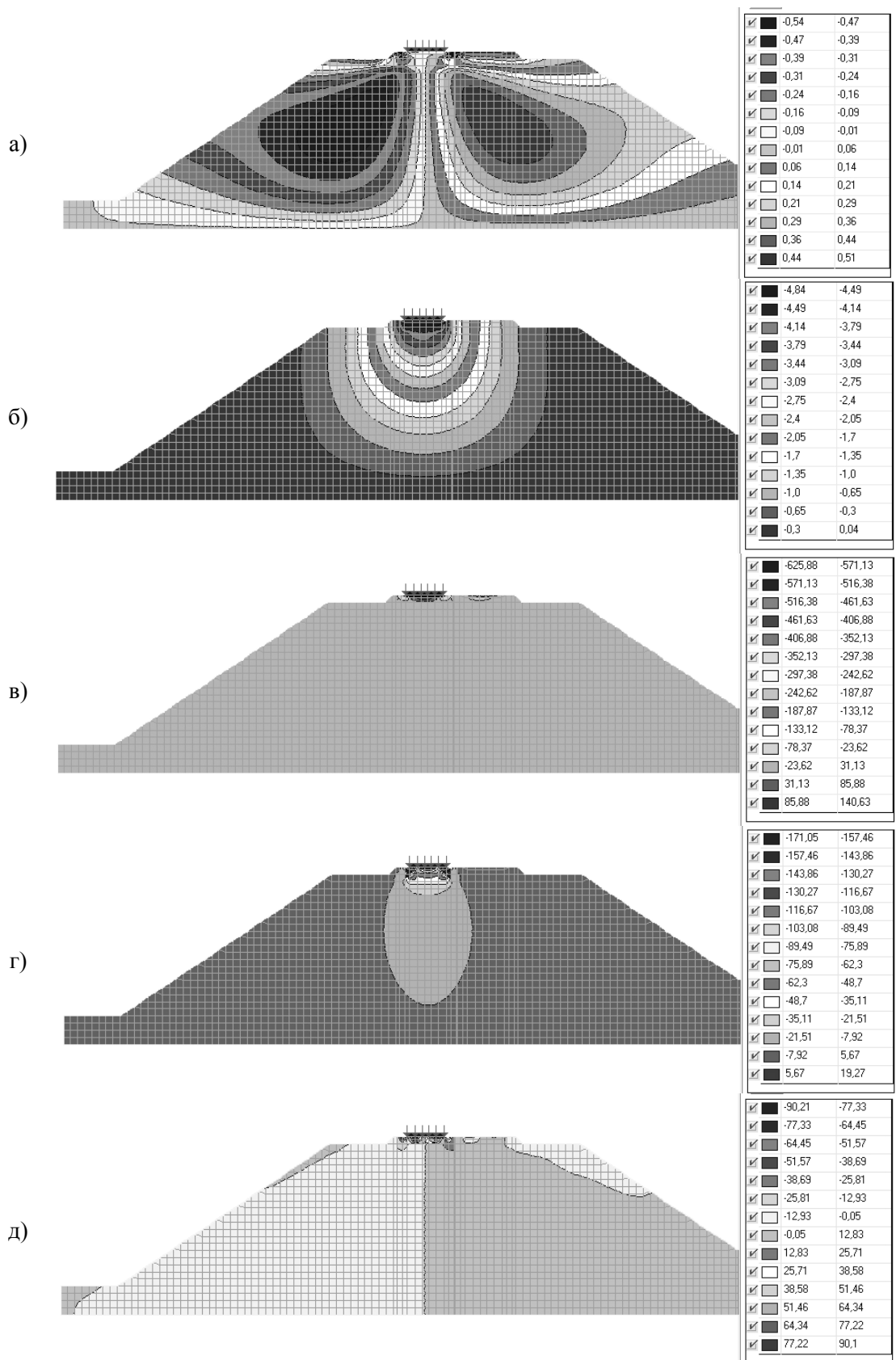


Рис. 9. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 1, 1-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);
 в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

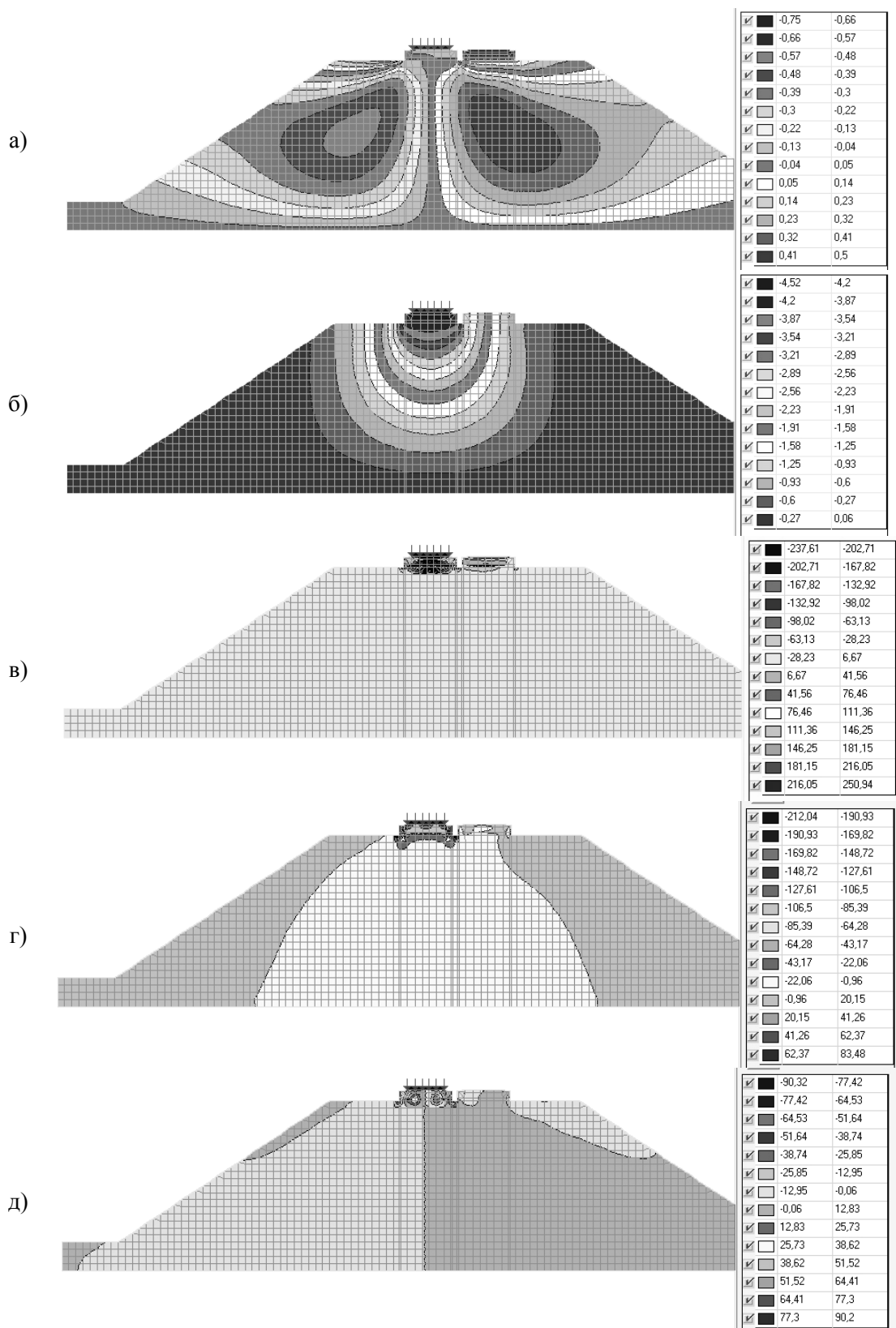


Рис. 10. Ізолінії та ізополя переміщень та напружень у випадку Варіанту 2, 1-а схема завантаження:
 а) переміщення по осі X (горизонтальна); б) переміщення по осі Z (вертикальна);
 в) нормальні напруження по осі X (горизонтальна); г) нормальні напруження по осі Z (вертикальна);
 д) дотичні напруження в площині XZ

Таким чином, після проведених розрахунків двох варіантів підсилення конструкції насипу проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану Варіантів 1 і 3 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. 5, а і б) і напружень (рис. 5, в-д) близький до аналітичного, і це підтверджує вірність розробленої СЕ-моделі та її адекватність аналітичним рішенням. Картини переміщень та напружень симетричні, без флуктуацій, що доводить вірність дискретизації розрахункової області на скінченні елементи та високу збіжність скінченно-елементного рішення.

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. 5, в) – ізополе темно-сірого кольору із значенням напруження $-8,6 \text{ кН/м}^2$ ($-0,0086 \text{ МПа}$) та рис. 5, г – викривлення ізополя темно-сірого кольору із напруженням $-15,29 \text{ кН/м}^2$ ($-0,0153 \text{ МПа}$) 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. 5, в, г), а максимальне переміщення верху моделі складає $39,9 \text{ мм}$ (рис. 5, а). Таким чином, аналіз НДС насипу при дії власної ваги свідчить про те, що розроблена модель відповідає вимогам до скінченно-елементної моделі та 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 (компенсаційний шар) змінює картину вертикальних переміщень, дещо їх зменшуючи. Це слідує 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. 9, б), тобто зменшення переміщень незначне (в $1,05$ рази), причому горизонтальні пере-

міщення в двох варіантах не змінилися. Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 1 слід відмітити характерне викривлення ізоліній на межі шарів (рис. 9, б). 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 ньому зменшилася площа їх розповсюдження (лише в області баластної призми, рис. 9, в). Також відмічається незначне зменшення вертикальних та дотичних напружень (рис. 9, г, д).

Напружений стан тіла насипу неоднорідний ($0,007 \text{ МПа}$, стиск).

3. Порівняльний аналіз НДС Варіантів 0 та 2 свідчить про те, що застосування залізобетонного кріплення баластної призми значно змінює картину горизонтальних і вертикальних переміщень. Причому горизонтальні переміщення на відміну від Варіанту 0 збільшуються приблизно в $1,3 \dots 1,38$ рази (рис. 10, а), що пояснюється тим, що залізобетонне кріплення, маючи значно більші деформаційні характеристики ніж тіло насипу, виконує роль жорсткого штампу, який витісняє ґрунт під собою в сторони. Але абсолютне значення горизонтальних переміщень не є екстремальним, так як складає $0,75 \text{ мм}$. При цьому максимальне значення вертикальних переміщень у Варіанті 0 складало $5,12 \text{ мм}$ (рис. 4, б), а у Варіанті 2 – $4,52 \text{ мм}$ (рис. 10, б), тобто відмічається зменшення переміщень в $1,1 \dots 1,13$ рази.

Аналізуючи вертикальні переміщення у Варіанті 3, також слід відмітити їх розподіл, який характерний для розподілу напружень під жорстким штампом. Напружений стан Варіанту 2 на відміну від Варіанту 0 значно покращився: так, стискаючи горизонтальні напруження зменшилися в $2,6 \dots 2,8$ рази з $673,09 \text{ кН/м}^2$ ($0,673 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $237,61 \text{ кН/м}^2$ ($0,237 \text{ МПа}$) у Варіанті 3, але в $2,35 \dots 2,4$ рази збільшилися горизонтальні напруження розтягу з $+106,63 \text{ кН/м}^2$ ($0,106 \text{ МПа}$) у Варіанті 0 до $+250,94 \text{ кН/м}^2$ ($0,250 \text{ МПа}$) у Варіанті 3 (рис. 4 та 10, в).

Слід також відмітити, що загальні напруження в тілі насипу у Варіанті 3 стали однорідними ($0,028 \text{ МПа}$, стиск), що пояснюється тим, що основні горизонтальні напруження від дії локомотивного навантаження сприймає залізобетонне кріплення. Також відмічається незначне збільшення вертикальних напружень (рис. 10, г, д) – в $1,23$ рази в середньому, але напружений стан тіла насипу став більш одно-

рідним (0,023 МПа, стиск). Дотичні напруження розповсюджені на межі залізобетонного кріплення та насипу (рис. 10, д). Картина розподілу горизонтальних, вертикальних нормальних та дотичних напружень свідчить про те, що їх більша частина сприймається залізобетонним кріпленням баластної призми.

Після проведеного порівняльного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена просторова скінченно-елементна модель насипу дозволила провести ряд числових розрахунків, результати яких після порівняльного аналізу дали змогу свідчити про вплив на загальний напружено-деформований стан 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) свідчить про те, що така зміна незначно покращує загальний НДС насипу, дещо зменшуючи вертикальні переміщення та компоненти напружень, але це зменшення незначне (1,02...1,05 разів).

3. Впровадження залізобетонного кріплення баластної призми значно покращує загальний НДС насипу, так як воно сприймає значну частину поїздного навантаження. На відміну від Варіанту 1 Варіант 2 найбільш позитивно впливає на НДС земляного полотна і може бути рекомендований до подальшої розробки та впровадження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила і технологія виконання робіт при поточному утриманні залізничної колії. ЦП/0084. – К., 2002. – 156 с.
2. Карпиловский В. С. SCAD для пользователя / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, А. Н. Трофимчук. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
3. Петренко В. Д. Численное моделирование состояния оснований транспортных сооружений / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. Л. Тюткин, С. В. Цепак, В. С. Андреев Т. А. Селихова // Залізничний транспорт України, 2005. – № 2 (47). – С. 68-70.

Надійшла до редколегії 01.04.2008.

А. Ю. ПРОКОПОВ, М. В. ПРОКОПОВА (ШИ(ф) ЮРГТУ (НПИ), г. Шахты, Российская Федерация)

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Розглянута актуальність створення методичного забезпечення проектування фундаментів будівель, що зводяться поряд з тими, що існують, заснована на вивченні причин розвитку деформацій будівель і споруд в умовах щільної міської забудови. Приведені деякі рекомендації, що забезпечують збереження споруд.

Рассмотрена актуальность создания методического обеспечения проектирования фундаментов зданий, возводимых рядом с существующими, основанная на изучении причин развития деформаций зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки. Приведены некоторые рекомендации, обеспечивающие сохранность сооружений.

The urgency of methodical provision of planning of foundations for buildings erected next to existing ones is considered. It is based on studying the causes of extension of deformations of structures in conditions of dense city building system. Some recommendations providing safety of buildings are given.

В последние годы стало актуальным строительство зданий вблизи существующих. Это касается, прежде всего, центральной части городов, где получило развитие строительство новых домов между существующими, многие из которых являются памятниками архитектуры. Часто под существующими зданиями или возле них возводят подземные сооружения или крупные и сложные здания. Подобное строительство проблематично, поскольку необходимо обеспечить устойчивость нового сооружения и полную сохранность конструкций существующих зданий.

При уплотнении городской застройки существующие здания получают дополнительную осадку. Причин дополнительной осадки много. Наиболее опасными являются технологические воздействия и изменения напряженного состояния основания соседних зданий.

Первоначальные осадки здания довольно равномерны по пятну застройки и возникают в процессе возведения. Эти осадки предусматриваются проектом, они, как правило, не превышают допустимых, и на конструкции зданий не оказывают большого влияния, поскольку вызванные ими повреждения устраняются на завершающем этапе строительства.

Дополнительные осадки возникают вследствие воздействия на грунты рядом строящегося здания:

– от вибраций грунта, фундаментов, надземных конструкций, возникающих от работы машин и механизмов;

– откопки котлована глубже подошвы существующего здания;

– отклонения стен котлована;

– возникновения вокруг строящегося здания осадочной воронки.

Все дополнительные осадки неравномерны и непредсказуемы. К тому же, чувствительность старого здания к развитию осадок различна и зависит от многих причин, учесть которые достаточно сложно.

Согласно натурным наблюдениям, проводимым в гг. Санкт-Петербург и Москва, первоначальная осадка зданий приводит к развитию прогиба здания, а дополнительная – к развитию выгиба, перекоса, в кладке стен появляются трещины. Возможны сдвиги перекрытий. Попадающие в воронку оседания здания испытывают два типа деформаций: излом с вертикальной трещиной и перекося с множественными наклонными трещинами. Т.е., вид деформаций зданий от дополнительной осадки существенно отличается от деформаций, вызванных собственной осадкой.

Существенное различие между напряженно-деформированным состоянием оснований, фундаментов и других конструкций зданий в случаях одинарного строения и близлежащих строений подтверждается исследованиями, проведенными авторами в Шахтинском институте ЮРГТУ (НПИ) на численных моделях с применением конечно-элементного анализа. Так, после строительства одиночного здания (здания, основание которого не испытывает

воздействий со стороны других строений) в основаниях и фундаментах возникают напряжения, качественное распределение которых показано на рис. 1, а.

При строительстве в непосредственной близости другого здания (даже меньшей этажности и с меньшей нагрузкой, передаваемой на фундамент и основание), происходит существенное перераспределение напряжений в основаниях, которое значительно увеличивает напряжения, возникающие изначально под первым объектом

(рис. 1, б). Кроме увеличения напряжений, при возведении близлежащих зданий существенно увеличиваются деформации оснований, вызывающие увеличение деформаций строительных элементов зданий, что и было зафиксировано в ряде вышеописанных натуральных наблюдений. Выявленное на моделях изменение деформаций при строительстве близлежащих объектов по сравнению с одиночным строением показано на рис. 2, а, б.

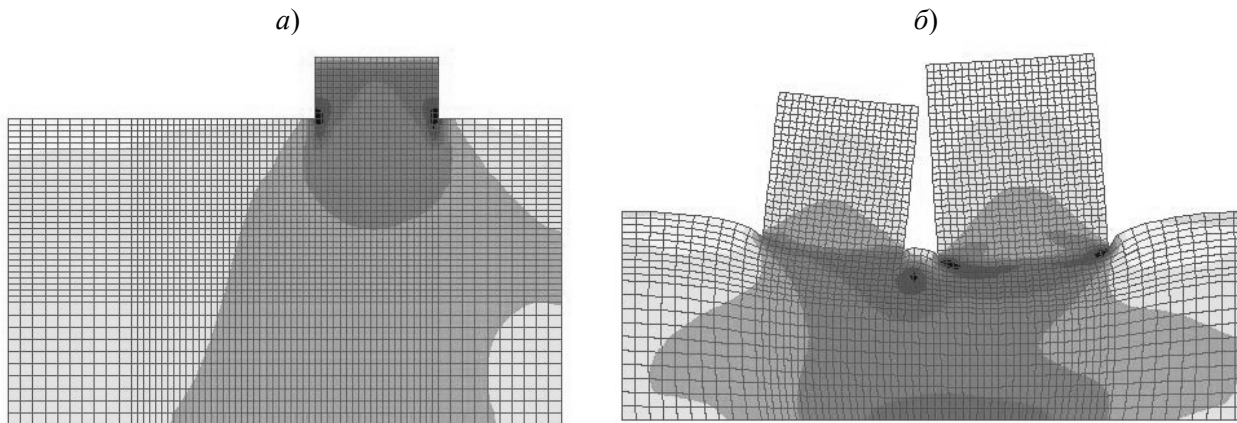


Рис. 1. Изополя эквивалентных напряжений в основаниях и фундаментах: а – при возведении одиночного здания; б – при возведении двух близлежащих зданий

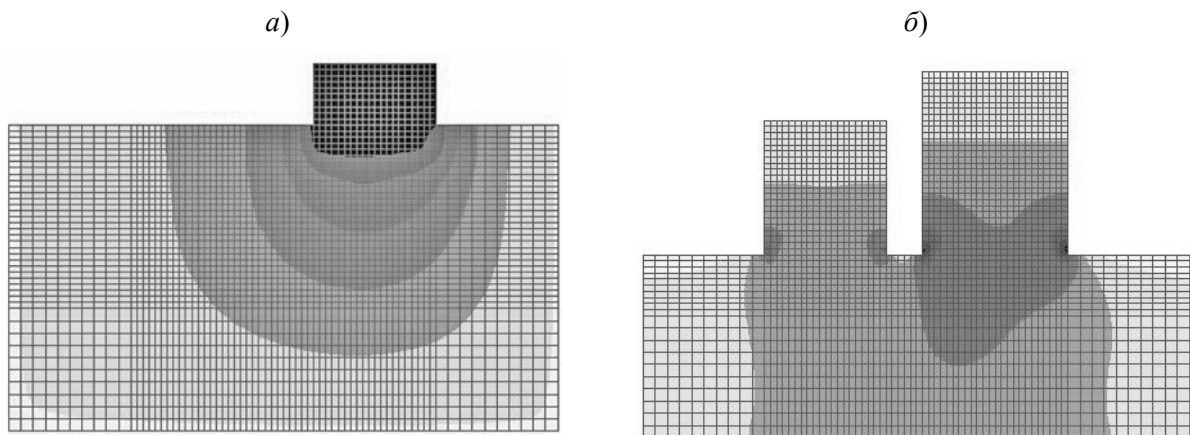


Рис. 2. Изополя перемещений в основаниях и фундаментах: а – при возведении одиночного здания; б – при возведении двух близлежащих зданий

Наблюдения показывают, что кирпичные здания I, II категории состояния (20 % и 40 % физического износа, соответственно), при дополнительной осадке до 5 см, что является допустимым значением, получают повреждения. В стенах появляются сквозные трещины, раскрытие вертикальной трещины разлома в уровне верхних этажей и т.п.

К сожалению, нормативных документов, регламентирующих методики расчетов деформаций зданий и сооружений, нет. Разработаны только территориальные строительные нормы

для гг. Москвы и Санкт-Петербурга, основанные на натуральных наблюдениях. Данные нормы для района Восточного Донбасса не пригодны, поскольку существенно отличаются грунтовые условия.

Кроме того, для условий шахтерских городов актуальной является проблема учета деформаций зданий от подработки территории горными выработками. Таким образом, при проектировании зданий в центральной части рядом с существующими строениями необходимо учитывать все возможные деформации и

принимать различные конструктивные и архитектурно-строительные мероприятия. В настоящее время в Шахтинском институте ЮР-ГТУ (НПИ) ведется изучение напряженно-деформированного состояния оснований и фундаментов зданий и сооружений, учитывающего совместное влияние подработки и взаимовлияние близлежащих объектов.

При разработке проектов зданий рядом с существующими домами необходимо рассматривать ряд вариантов, обеспечивающих сохранность соседних домов и сооружений:

1) Проектирование зданий на ленточных фундаментах, с глубиной заложения не больше, чем у существующих. Обязательный расчет дополнительных осадок. При этом новое здание должно быть не выше существующих.

2) Проектирование зданий с консольным примыканием к существующим.

3) Устройство разъединительных конструкций (шпунтовые ограждения, стена из свай,

прорезь в грунте, заполненная прочным материалом).

4) Проектирование свайных фундаментов под новое здание (погружение вдавливанием или ввинчиванием).

5) Усиление фундаментов соседних домов.

6) Различные способы уплотнения и закрепления грунтов оснований под фундаментами (цементными растворами, буроинъекционными сваями).

Для разработки проектов новых домов в условиях плотной городской застройки важным этапом является расчет дополнительной осадки примыкающих старых зданий, методику которого необходимо скорректировать с учетом особенностей грунтовых условий района и его подработки горными выработками.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРРАСТВОРОМ

Наведено теоретичне обґрунтування дослідження параметрів процесу ін'єктування та призначення режиму руху розчину по трубопроводу в струмені стиснутого повітря.

Приведено теоретическое обоснование исследования параметров процесса инъекирования и назначения режима движения раствора по трубопроводу в струе сжатого воздуха.

The theoretical justification of research of injection parameters and setting the regime of mortar motion in a pipeline by compressed air jet is presented.

Одним из важнейших параметров процесса инъекирования является назначение режима движения раствора по трубопроводу в струе сжатого воздуха. Для исключения потерь напора следует учитывать влияние касательных, инерционных и вязкостных напряжений на движение по трубопроводу растворной смеси в воздушном потоке.

В связи с этим возникла необходимость определения зависимостей, устанавливающих по-

тери напора при перемещении смеси сплошным потоком.

С момента начала движения растворной смеси по трубопроводу возникают касательные напряжения, величина которых обуславливается одновременно рядом факторов: физическими свойствами движущегося раствора, скоростью его перемещения, диаметром трубопровода и степенью шероховатости его внутренней поверхности (рис. 1).

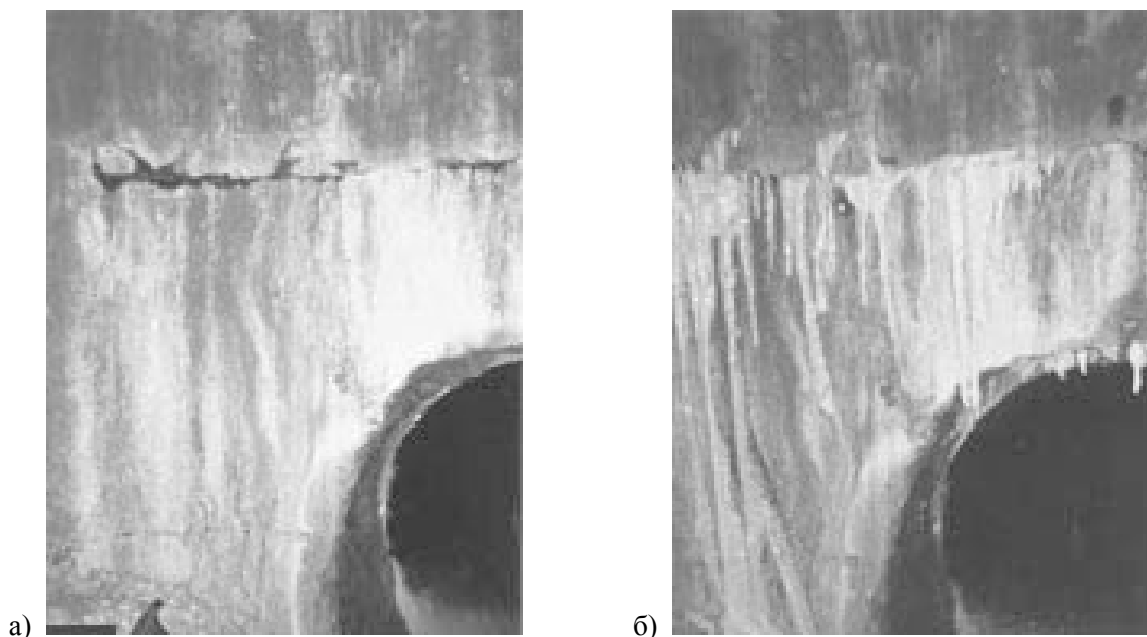


Рис. 1. Пример ошибочного выбора реологических свойств инъекционного раствора:
а) начало инъекирования;
б) окончание инъекирования

При этом касательные напряжения слагаются из вязкостных и инерционных напряжений, которые изменяются в зависимости от условий транспортирования раствора и могут характеризоваться в одно и то же время различными величинами. С повышением скорости транспортирования вязкостные напряжения снижа-

ются [1, 2], но одновременно увеличиваются инерционные, так как последние одновременно являются функцией скорости. В общем виде можно записать, что общие касательные напряжения слагаются из вязкостных и инерционных:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{и}} . \quad (1)$$

Определение величин этих напряжений позволит вывести уравнения сопротивления трубопровода при различных режимах пневмотранспорта инъекционного полимерного раствора. Поскольку перемещение аэросмеси, какой является раствор при перемещении в струе сжатого воздуха, представляет собой движение сложной среды – материальной части и воздуха, величину касательных напряжений следует рассчитывать отдельно для каждого компонента.

При этом принимаем, что их сумма в любом режиме транспортирования составит общую величину касательных напряжений.

Изменение вязкостных напряжений при движении структурированных пластично-вязких систем соответствует закону Бингама. Однако он больше относится к таким вязкопластичным материалам, в которых соблюдается пропорциональная зависимость между градиентом скорости и касательным напряжением.

Наполненный раствор на основе алкилрезорциновой смолы в случае перемещения его по трубопроводу вследствие разрушения структуры не может быть отнесен к идеальным пластично-вязким телам. А. Кассон предложил описать движение таких тел следующим уравнением [3]

$$\sqrt{\tau_{\text{в}}} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta \frac{dV}{dy}} . \quad (2)$$

Возведя в квадрат уравнение (2), получим выражение для вязкостных напряжений:

$$\tau_{\text{в}} = \tau_0 + \eta \frac{dV}{dy} + 2\sqrt{\tau_0 \cdot \eta \frac{dV}{dy}} . \quad (3)$$

Инерционное напряжение, возникающее в турбулентном потоке, равно

$$\tau_{\text{и}} = \gamma \cdot l^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 , \quad (4)$$

где γ – плотность раствора, кг/м³;

l – длина пути перемещения раствора, м.

Тогда касательные напряжения, возникающие при движении материальной части аэросмеси (раствора), равны сумме (3) и (4):

$$\tau_{\text{р}} = \tau_{\text{р.в}} + \tau_{\text{р.и}} . \quad (5)$$

Касательные напряжения, возникающие от движения воздуха, также складываются из вязкостных и инерционных напряжений:

$$\tau_{\text{возд}} = \tau_{\text{возд.в}} + \tau_{\text{возд.и}} . \quad (6)$$

При производстве ремонтных работ необходимо учитывать режимы транспортирования полимерного раствора по трубопроводу, поскольку в одних случаях преобладают вязкостные напряжения, в других – инерционные, или же они могут быть равны между собой. Например, при больших значениях Re, когда турбулентный режим сопровождается интенсивным перемешиванием, вязкостные напряжения резко снижаются, и в расчетах ими можно пренебречь [4]. В этом случае можно принять, что величина инерционного напора воздуха подчиняется известной закономерности [5] и определяется из уравнения

$$\tau_{\text{возд.и}} = \gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 . \quad (7)$$

Зная, что

$$\tau_{\text{возд.в}} = \eta_{\text{возд}} \frac{dV}{dy} , \quad (8)$$

касательные напряжения, возникающие при движении воздушной части аэросмеси, определяются из выражения

$$\tau_{\text{возд}} = \eta_{\text{возд}} \frac{dV}{dy} + \gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 . \quad (9)$$

Для преодоления суммарных касательных напряжений (вязкостных и инерционных), возникающих от движения аэросмеси, необходимо затратить силу, зависящую от разности давлений в начале и конце трубопровода

$$F = S_0 \cdot \Delta p , \quad (10)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения трубопровода, м²;

$\Delta p = p_{\text{н}} - p_{\text{к}}$ – разность давлений в начале и конце трубопровода, соответственно, Па.

С учетом того, что величины напряжений от движения растворной части аэросмеси и воздуха для трубопровода диаметром d_0 на участке L равны, соответственно, $\tau_{\text{р}} \pi d_0 L$ и $\tau_{\text{возд}} \pi d_0 L$, уравнение импульсов для движения аэросмеси по трубопроводу примет вид

$$S_0 \cdot \Delta p - \tau_p \pi d_0 L - \tau_{\text{возд}} \pi d_0 L = \\ = \frac{G_p}{g} (V_{\text{р.н}} - V_{\text{р.к}}) + \frac{G_{\text{возд}}}{g} (V_{\text{возд.н}} - V_{\text{возд.к}}), \quad (11)$$

где G_p – масса транспортируемого раствора, кг;
 $G_{\text{возд}}$ – масса воздуха, кг;
 $V_{\text{р.н}}$ – скорость раствора в начале трубопровода, м/с;
 $V_{\text{р.к}}$ – то же, в конце трубопровода, м/с.
Правая часть уравнения (11) представляет сумму количества движения. При установившемся движении в коротком трубопроводе скорости аэросмеси в начале и конце трубопровода условно можно принять равными, тогда

$$\frac{G_p}{g} (V_{\text{р.н}} - V_{\text{р.к}}) = 0, \quad (12a)$$

$$\frac{G_{\text{возд}}}{g} (V_{\text{возд.н}} - V_{\text{возд.к}}) = 0. \quad (12b)$$

С учетом уравнений (4), (7), (9) и (11), после деления на S_0 обеих частей уравнения (11) и преобразования общего выражения получим полное уравнение сопротивления движению раствора по трубопроводу

$$\Delta p = \left[\tau_{0p} + 2 \sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \left(\frac{dV}{dy} \right)} + \eta_p \frac{dV}{dy} + \gamma_p \cdot l_p^2 \left(\frac{dV_p}{dy} \right)^2 \right] \frac{4L}{d} + \\ + \left[\gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \left(\frac{dV_{\text{возд}}}{dy} \right)^2 + \eta_{\text{возд}} \left(\frac{dV_{\text{возд}}}{dy} \right) \right] \frac{4L}{d}. \quad (13)$$

Преобразуя уравнение (13) путем деления всех членов уравнения на $\tau_{\text{возд}}$, а последнего члена умножением на $\tau_{\text{возд}}$, получим

$$\Delta p = \left[\frac{\tau_{0p}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{2 \sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \left(\frac{dV_p}{dy} \right)}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{4L \tau_{\text{возд}}}{d} + \right. \\ \left. + \left[\frac{\eta_p \left(\frac{dV_p}{dy} \right)}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{\tau_{\text{р.и}}}{\tau_{\text{возд}}} + 1 \right] \frac{4L \tau_{\text{возд}}}{d} \right]. \quad (14)$$

Сомножитель уравнения (14), вынесенный за скобку, характеризует потерю напора, вызванную касательными напряжениями от дви-

жения сжатого воздуха ($p_{\text{н.возд}} - p_{\text{к.возд}}$) в трубопроводе, приведенную к единице площади поперечного сечения и обозначенную H_0 :

$$H_0 = \frac{4L \tau_{\text{возд}}}{d}. \quad (15)$$

Зная значение весовой концентрации $\mu = \frac{G_p}{G_{\text{возд}}}$, получим

$$\gamma_p = \gamma_v \frac{V_{\text{возд}}}{V_p} \mu. \quad (16)$$

С учетом (16) можно записать

$$\frac{\tau_{\text{р.и}}}{\tau_{\text{возд}}} = \mu \frac{\gamma_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}} \cdot l_p^2 \left(\frac{dV_p}{dy} \right)^2}{\gamma_{\text{возд}} \cdot l_{\text{возд}}^2 \cdot V_p \left(\frac{dV_{\text{возд}}}{dy} \right)^2 + \eta_{\text{возд}} \frac{dV_{\text{возд}}}{dy}}. \quad (17)$$

Обозначим

$$\frac{V_{\text{возд}} \cdot l_p^2 \left(\frac{dV_p}{dy} \right)^2}{l_{\text{возд}}^2 \cdot V_p \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 + \eta_{\text{возд}} \frac{dV_{\text{возд}}}{dy}} = k, \quad (18)$$

тогда выражение четвертого члена уравнения (14) примет вид $k\mu$. Значение коэффициента k не может быть определено теоретически и определяется опытным путем.

Преобразуем первый член уравнения (1), умножив и разделив его на величину $\frac{4L}{d}$:

$$\frac{\tau_{0p} \frac{4L}{d}}{\tau_{\text{возд}} \frac{4L}{d}}. \quad (19)$$

Знаменатель представляет собой выражение (15), тогда первый член уравнения (14) примет вид

$$\frac{\tau_{0p} \frac{4L}{d}}{H_0} = \frac{\tau_{0p} \cdot 4L}{H_0 \cdot d}.$$

При больших скоростях воздуха происходит взвешивание твердой составляющей раствора и в трубопроводе движется поток аэроsmеси, при этом структура материалов нарушается. В процессе перемещения основное значение имеют силы инерции и силы тяжести [6]

$$\frac{\mu}{Fr^4} = \text{const} . \quad (20)$$

В этом случае вязкостные напряжения от растворной части аэроsmеси резко снижаются, тогда второй и третий члены уравнения (14) можно принять равными нулю.

Таким образом, возможны три экстремальных случая транспортирования инъекционного полимерного раствора: 1) V_{\min} при $\tau_b = \text{max}$, $\tau_n = \text{min}$; 2) $V_{\text{ср}}$ при $\tau_b = \tau_n$; 3) V_{max} при $\tau_b = \text{min}$, $\tau_n = \text{max}$. Во всех трех случаях сумма τ_b и τ_n равна $\tau_{\text{общ}}$.

Для каждого случая с учетом проведенных выше преобразований необходимо определить величины сопротивления горизонтального и вертикального транспортного трубопровода.

Первый случай. Смесь движется сплошным потоком V_{\min} при максимальных вязкостных и минимальных инерционных напряжениях. Тогда уравнение (14) с учетом (15) примет вид

$$\Delta p = \left(\frac{\tau_{0p}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}}}{\tau_{\text{возд}}} + \frac{\eta_p \cdot \frac{dV}{dy}}{\tau_{\text{возд}}} + 1 \right) H_0 . \quad (21)$$

Преобразуем его, проведя упрощения:

$$\frac{\tau_0 \cdot H_0 \cdot \frac{4L}{d}}{H_0} + \frac{2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV}{dy}} \cdot \frac{4L}{d} \cdot H_0}{H_0} + \frac{\eta_p \cdot \frac{dV}{dy} \cdot \frac{4L}{d} \cdot H_0}{H_0} + H_0 , \quad (22)$$

$$\Delta p = \left(\tau_{0p} + 2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV}{dy}} + \eta_p \cdot \frac{dV}{dy} \right) \frac{4L}{d} + H_0 , \quad (23)$$

$$\Delta p = \left(\sqrt{\tau_{0p}} + \sqrt{\eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}} \right)^2 \cdot \frac{4L}{d} + H_0 \quad (24)$$

Во всех выражениях величина $\frac{dV}{dy}$ пред-

ставляет собой изменение скорости в направлении, нормальном к направлению самой скорости, т.е. является скоростью скольжения или градиентом скорости, который может быть вы-

ражен $\frac{dV}{dy} \approx \frac{V}{d} = \frac{2V}{d}$, где V – максимальная

скорость; $d/2$ – расстояние от стенки трубопровода до слоя раствора, движущегося с максимальной скоростью. Подставив это значение в уравнение (1.24), получим окончательную расчетную формулу для определения сопротивления движению полимерного раствора сплошным потоком

$$\Delta p = \frac{4L}{d} \left(\sqrt{\tau_{0p}} + \sqrt{\eta_p \cdot \frac{2V_p}{d}} \right)^2 + H_0 . \quad (25)$$

Второй случай. Смесь движется с частично взвешенными компонентами со средней скоростью $V_{\text{ср}}$. При этом вязкостные и инерционные напряжения равны между собой. Требуемое условие приобретает вид:

$$\frac{\tau_{0p} + 2\sqrt{\tau_{0p} \cdot \eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}} + \eta_p \cdot \frac{dV_p}{dy}}{\tau_{\text{возд}}} = k\mu .$$

Следовательно, уравнение (14) имеет вид расчетной формулы для рассматриваемого случая

$$\Delta p = H_0 (1 + 2k\mu) . \quad (26)$$

Третий случай. Смесь движется полностью во взвешенном состоянии со скоростью V_{max} . Взвешенное состояние аэроsmеси при движении с такой скоростью сопровождается полным разрушением структуры, режим транспортирования турбулентный, характеризуемый минимальными вязкостными и максимальными инерционными напряжениями. Вторым и третьим членами уравнения (14) можно пренебречь, тогда с учетом (15)

$$\Delta p = \frac{\tau_{0p} \cdot 4L}{H_0 \cdot d} + (k\mu + 1)H_0 . \quad (27)$$

После его преобразования получим

$$\Delta p = \frac{4L\tau_{0p}}{d} + H_0(1 + k\mu). \quad (28)$$

Выражение $\frac{4L\tau_{0p}}{d}$ соответствует потере напора на преодоление начального напряжения сдвига, обозначим его H_1 . Тогда

$$\Delta p = H_1 + H_0(1 + k\mu). \quad (29)$$

Особенность транспортирования смесей во взвешенном состоянии состоит в том, что смесь попадает в струю уже движущегося с большой скоростью воздуха. В этом случае сдвигающие усилия чрезвычайно малы, и ими можно пренебречь, тогда сопротивление движению аэро-смеси во взвешенном состоянии описывается уравнением

$$\Delta p = H_0(1 + k\mu). \quad (30)$$

Потеря напора от движения воздуха определяется по формуле, приведенной в работе [5]:

$$H_0 = \frac{L \cdot V_{\text{возд}}^2 \cdot \gamma_{\text{возд}}}{2dg}. \quad (31)$$

Таким образом, для определения H_0 по формулам (25), (26) и (30) при расчете сопротивления движению полимерного раствора при различных скоростях используется приведенная формула (31).

Для вертикального участка трубопровода наряду с общими сопротивлениями, возникшими от касательных напряжений движущегося раствора, учитывается также сила тяжести раствора и воздуха. В связи с этим

$$S_0 \cdot \Delta p - (\tau_p - \tau_{\text{возд}})L\pi d_0 - \frac{LG_p}{V_p} - \frac{LG_{\text{возд}}}{V_{\text{возд}}} = \frac{G_p \cdot \Delta V_p}{g} + \frac{G_{\text{возд}} \cdot \Delta V_{\text{возд}}}{g} \quad (32)$$

или с учетом (14)

$$\Delta p = \frac{(\tau_p + \tau_{\text{возд}})\pi dL}{S_0} + \frac{LG_p}{V_p \cdot S_0} + \frac{LG_{\text{возд}}}{V_{\text{возд}} \cdot S_0}.$$

Рассмотрим второй и третий члены уравнения (33), представляющие собой силы тяжести воздуха и растворной части аэро-смеси, приходящиеся на единицу площади сечения трубо-

провода. С учетом того, что $G_p = S_0 \cdot \gamma_p \cdot V_p$ и $G_{\text{возд}} = S_0 \cdot \gamma_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}}$, и приняв $L = 1$ м, второй и третий члены уравнения (33) будут иметь следующий вид

$$\frac{LS_0 \cdot \gamma_p \cdot V_p}{V_p \cdot S_0} + \frac{LS_0 \cdot V_{\text{возд}} \cdot \gamma_{\text{возд}}}{V_{\text{возд}} \cdot S_0} = \gamma_p + \gamma_{\text{возд}}, \quad (34)$$

а с учетом (16) выражение (34) может быть представлено в виде

$$\mu\gamma_{\text{возд}} \frac{V_p}{V_{\text{возд}}} + \gamma_{\text{возд}} = \gamma_{\text{возд}} \left(\mu \frac{V_p}{V_{\text{возд}}} + 1 \right) \quad (35)$$

и является дополнительным членом уравнений (25), (26) и (30), который учитывается при расчете сопротивления на вертикальном участке трубопровода:

а) для первого случая

$$\Delta p = \frac{4L}{d} \left(\sqrt{\tau_{0p}} + \sqrt{\eta_p \frac{2V_p}{d}} \right)^2 + H_0 + (\mu + 1)\gamma_{\text{возд}}; \quad (36)$$

б) для второго случая

$$\Delta p = H_0(1 + 2k\mu) + (\mu + 1)\gamma_{\text{возд}}; \quad (37)$$

в) для третьего случая

$$\Delta p = H_0(1 + k\mu) + (\mu + 1)\gamma_{\text{возд}}. \quad (38)$$

Вывод. Исследованы закономерности движения полимерного наполненного раствора на основе алкилрезорцина по трубопроводу и определены зависимости, устанавливающие потери напора при перемещении смеси сплошным потоком.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вулис Л. А. Теория струй вязкой жидкости / Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров. – М.: Наука, 1965. – 276 с.
2. Федяевский К. К. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости / К. К. Федяевский, А. С. Гиневский, А. В. Колесников. – Л.: Судостроение, 1973. – 256 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
4. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1970. – 215 с.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
6. Семенов И. Н. Энергия и химический процесс / И. Н. Семенов, Р. В. Богданов. – Л.: Химия, 1973. – 112 с.

Поступила в редколлегию 30.01.2008.

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ УЛАШТУВАННЯ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ У ВОДОНАСИЧЕНИХ ҐРУНТАХ

У даній статті викладені матеріали дослідження технології та організації улаштування буронабивних палей в водонасичених ґрунтах.

В данной статье изложены материалы исследования технологий и организации установки буронабивных свай в водонасыщенных грунтах.

In the paper the materials of research of technology and organization of mounting the drilling-and-filling piles in water-saturated soils are presented.

Введення

При улаштуванні буронабивних палей у водонасичених ґрунтах виникають проблеми в дотриманні технологічних процесів та організації таких робіт.

Постановка задачі

У зв'язку з цим була поставлена актуальна задача удосконалення технології та організації вищезазначених робіт. Основою дослідження було вирішення технологічної послідовності виконання операцій та розробка лінійної моделі виконання робіт.

Результат дослідження

Технологія виготовлення палей включає наступні основні операції (рис. 1):

а) установка бурового верстата на вісь свердловини з подальшим бурінням свердловини (1) в межах асфальтобетонного покриття бурової коронки, а нижче шнеком до несучого шару і заглибленням в нього не більш, ніж на 10...15 см. При цьому верхній асфальтобетонний шар виконує роль кондуктора.

Буріння свердловин і пристрій буронабивних палей виробляють, як правило, через одну з повернень на пропущені свердловини після закінчення схоплювання бетонної суміші у виконаних палях, але не раніше ніж через 24 години або набір міцності бетоном не менш як 25 % від проектної.

Основні дані по бурінню свердловин заносять у відповідні графи «Журналу виготовлення буронабивних палей з розширеною основою зі щебеню».

б) установка в свердловину (1) обсадної труби (2) з частковим задушенням її в несучий

шар ґрунту з подальшим відкачуванням води із свердловини насосом і частковою зачисткою забою желонкою, після чого в свердловину відсипляється порція сухої бетонної суміші (3) на висоту 35...40 см об'ємом 0,025...0,035 м³;

в) підйом обсадної труби (2) на висоту 20...35 см і трамбування трамбуючим снарядом (4) сухої бетонної суміші в забій свердловини до рівня первинної глибини свердловини, внаслідок чого в нижній частині свердловини створюється маловодопроникна бетонна пробка-розширення (5) і ущільнена зона (6), що практично повністю виключає в подальшому приток води у свердловину (1);

г) пошарові підсипання при піднятій трамбівці щебеню і втрамбування його в дно свердловини (1) трамбівкою (4) до стану «відмови». Об'єм кожної порції щебеню, що підсипається, складає 0,020...0,025 м³, тобто на висоту 30...35 см. Для створення розширення (5) використовується щебінь фракцією 20...40 мм і міцністю не менш як 30 МПа. За стан «відмови» приймають пониження ущільнюваної поверхні рівним 0,8...1 см за 1 удар трамбівки. В результаті втрамбування 3...4 порцій спочатку сухої бетонної суміші, а потім щебеню в нижній частині свердловини створюється розширена основа (5) палей діаметром до 0,45 м і заввишки до 0,50 м, а також ущільнена зона (6).

В процесі підсипання і втрамбування щебеню заміряються, обчислюються і заносяться до «Журналу ...» основні параметри, вказані у відповідних графах. Ці параметри визначаються таким чином: висота скидання трамбівки по мітках, що наносяться на трос з точністю ±10 см; повна величина пониження щебеню по різниці між даними; кількість ударів безпосереднім їх підрахунком; величина «відмови», як

середня величина пониження поверхні щебеню на останніх 5 ударах трамбівки.

В тому випадку, якщо 1-а порція щебеню повністю втрамбована у ґрунт, то необхідно приступити до втрамбування 2-ї порції щебеню до стану «відмови».

д) установка в свердловину (1) усередині обсадної труби (2) арматурного каркаса (7) з його частковим задушенням в розширення (5) і

заливка в свердловину через воронку (8) литого бетону (9) з осіданням конуса 18...20 см класу В15 шляхом вільного його скидання на проектну висоту.

Арматурні каркаси перед їх установкою в свердловину повинні бути очищені від іржі і ґрунту. Основні параметри по установці арматурних каркасів у свердловини заносять до «Журналу ...».

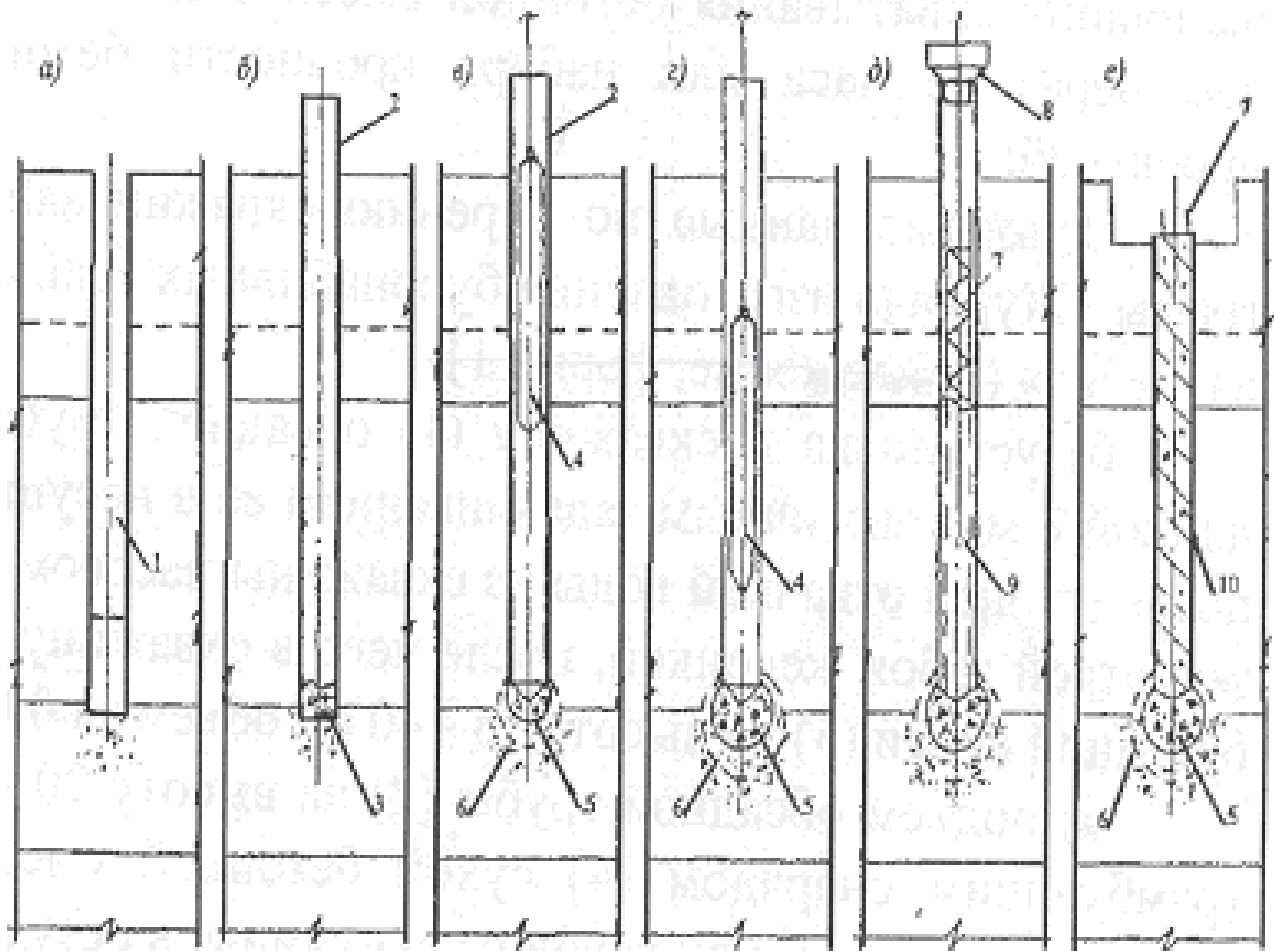


Рис. 1. Технологічна схема пристрою буронабивної палі:

- 1 – свердловина; 2 – обсадна труба; 3 – суха бетонна суміш; 4 – трамбуєчий снаряд;
5 – маловодопроникна бетонна пробка; 6 – ущільнена зона; 7 – арматурний каркас;
8 – воронка; 9 – литий бетон; 10 – буронабивна палля

е) діставання обсадної труби (2), в т. ч. з вібрацією, і утворення буронабивної палі (10) з подальшим видаленням верхнього шару ґрунту і пристроєм ростверку.

Залежно від конкретних ґрунтових умов і оснащення бетонування стовбура палі може здійснюватися після діставання обсадної труби або з одночасним її діставанням.

Не допускаються перерви в укладанні бетонної суміші в свердловину на якийсь час не більш як 0,5 години.

Верхня опорна частина палі у випадку відривки котловану до відмітки низу підготовки під ростверк бетонується в спеціальному оголовку.

Бетон готується на місці в малогабаритній бетономішалці.

Організаційно-технологічна лінійна модель виконання робіт

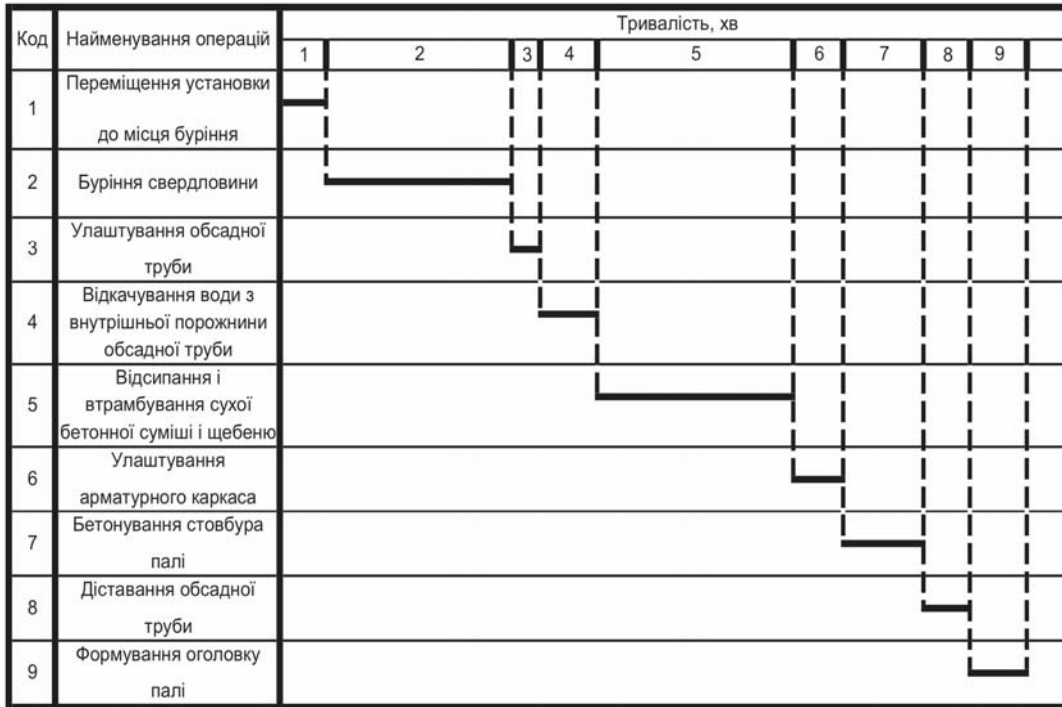


Рис. 2.

Тривалість улаштування однієї палі визначаємо за формулою

$$T = \sum_{i=1}^n t_{i-j},$$

де T – тривалість улаштування однієї палі;

t_{i-j} – тривалість $i - j$ -ої операції;

n – кількість операцій.

Висновок

Таким чином, запропонована технологічна схема в значній мірі сприяє підвищенню ефективності і надійності буронабивних паль у водонасичених ґрунтах та може бути покладена в основу розробки технологічних карт при виконанні даного виду робіт.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДБН. Д. 2. 4-2-2000.

Надійшла до редколегії 02.04.2008.

КОНЕЧНО-ГРАФОВЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На основі лінійної теорії графів, метода початкових параметрів та асоційованих матриць запропонований універсальний аналітичний підхід до розрахунку вільних та вимушених коливань стержневих конструкцій. Показана формальна однозначна відповідність між структурою конструкції та структурою рівнянь, що отримані. Досліджені особливості представлення графу для моделювання сумісних коливань стержневих систем.

На основе линейной теории графов, метода начальных параметров и ассоциированных матриц предложен универсальный аналитический подход к расчету свободных и вынужденных колебаний стержневых конструкций. Показано формальное однозначное соответствие между структурой конструкции и структурой получаемых уравнений. Исследованы особенности представления графа для моделирования совместных колебаний стержневых систем.

On the basis of a linear graph theory, a method of initial parameters and associated matrices the universal analytical approach to calculation of free and forced vibrations of rod constructions is offered. A formal one-to-one correspondence between the structure of a construction and the structure of obtained equations is shown. Features of representation of the graph for modeling of joint vibrations of rod systems are researched.

Методи, використовувані в теорії графів, являються ефективним засобом формалізації сучасних інженерних задач, що виникають при вивченні складних механічних систем. Так, бінарні відношення між різними підсистемами зручно виражати графами, а їх описання проводити з допомогою теорії матриць. В цій зв'язі представляє інтерес дослідження коливань стержневих конструкцій з допомогою математических моделей, оснований на теорії графів.

К настоящему времени имеется множество публикаций, посвященных приложениям линейной теории графов к различным техническим областям, например [1–5]. Применение топологических методов, элементов булевой алгебры, электромеханических аналогий приведены в работах [6–9]. В задачах статики графы использовали авторы [4, 10, 11], динамики – [3, 12, 13]. Наиболее полный обзор применения связных графов можно найти в [14].

Целью данной статьи является построение конечно-графовых моделей для расчета свободных и вынужденных колебаний стержневых систем с распределенными параметрами.

Рассмотрим вначале свободные колебания одиночного призматического стержня постоянного сечения с одним заделанным и другим свободным концами (рис. 1). В последующем такой стержень будем называть оригинальным [10].

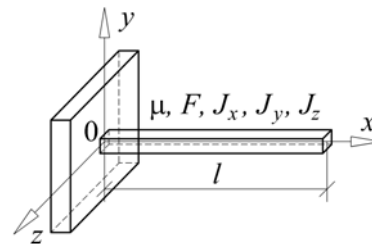


Рис. 1. Оригинальный консольный стержень

Представим каждый из видов колебаний стержня связным графом $G = (V, E)$, который состоит из множества вершин, включающих подмножества v_i, v_j ($i, j = 1, 2, \dots, n$), обозначающих начальные (НП) и конечные (КП) граничные параметры стержня, и ориентированных дуг e_s , направленных от одной вершины к другой.

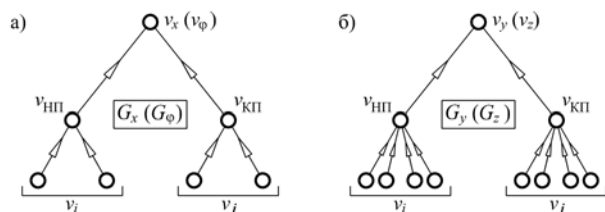


Рис. 2. Связные графы $G_x (G_\phi)$ и $G_y (G_z)$

На рис. 2 представлены графы в виде обратно ориентированных деревьев, моделирующих продольные (крутильные) колебания стержня

(рис. 2,а), а также изгибные (поперечные) колебания (рис. 2,б). Следуя [15], каждая вершина v_i, v_j может принимать либо фиксированное значение (0), либо произвольное (1). Таким образом, совокупность состояний n граничных параметров одного конца стержня выражается булевой функцией двух переменных для G_x, G_φ и четырех переменных для G_y, G_z . Соответственно, входные последовательности для $v_{НП}, v_{КП}$ могут быть реализованы на множествах $\{0,1\}$ – для G_x, G_φ и $\{0,0,1,1\}$ – для G_y, G_z . Вершины $v_x (v_\varphi)$ и $v_y (v_z)$ образуют топологический код графа G [16] и состоят из набора кодов НП и КП стержня.

Задаваясь граничными условиями для однородных стержней [15, 17], можно составить топологический код графа G из одинакового количества произвольных и фиксированных параметров. К примеру, для консольного стержня (рис. 1) графы $G_x (G_\varphi)$ и $G_y (G_z)$ будут иметь вид (рис. 3).

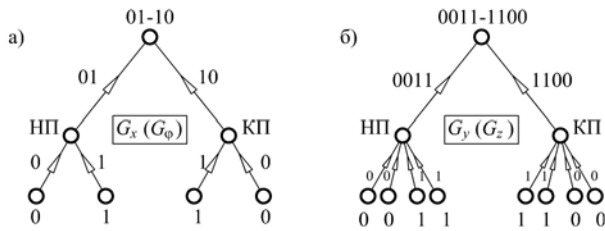


Рис. 3. Графы для консольного стержня

При изгибно-продольных колебаниях стержня (изгиб в плоскости xu) количество начальных и концевых граничных параметров будет равно шести: перемещения u_x, u_y вдоль осей x, y соответственно, угол поворота сечения φ_z , изгибающий момент M_z , поперечная и продольная силы N_y, N_x . Следовательно, вершины v_i, v_j будут соответствовать параметрам $\{u_x, u_y, \varphi_z, M_z, N_y, N_x\}$. Аналогично, при изгибно-крутильных колебаниях стержня (изгиб в плоскости xz) параметры будут следующими – $\{\varphi_x, u_z, \varphi_y, M_y, N_z, M_x\}$. Графы G_x, G_φ и G_y, G_z можно рассматривать как связанные подграфы графов GL и GT , характеризующих продольные (крутильные) и изгибные (поперечные) колебания. Графы $GL (GT)$ для

совместных изгибно-продольных (изгибно-крутильных) колебаний представлены на рис. 4.

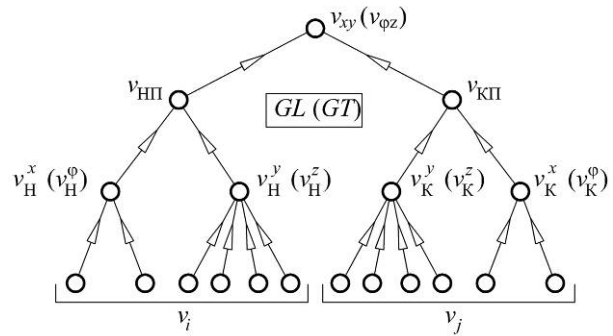


Рис. 4. Графы GL, GT для совместных колебаний стержня

Для рассмотренного выше примера (рис. 1) код НП будет состоять из набора 000111, КП – 111000. Топологический код графа $GL (GT)$, соответствующий вершине $v_{xy} (v_{\varphi z})$, равен 000111–111000.

В случае пространственных колебаний входные параметры стержня будут представлены n переменными для НП и n – для КП ($n=12$): перемещения в направлении осей x, y, z – u_x, u_y, u_z , углами поворота сечения $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$, внутренними моментами M_x, M_y, M_z и силами N_x, N_y, N_z . Общее число вершин v_i, v_j и, следовательно, входных переменных, будет равно 24. Соответствующий граф GR изображен на рис. 5.

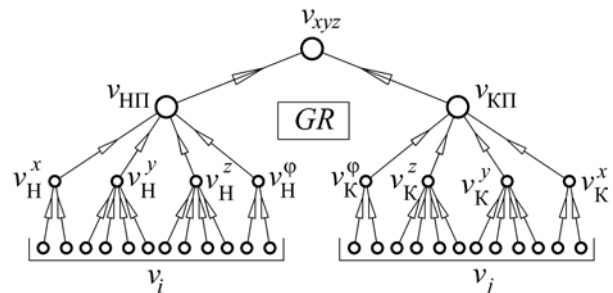


Рис. 5. Граф GR для пространственных колебаний стержня

Графы GR, GL и GT можно представить в более простой форме путем удаления смежных ребер, входящих в вершины $v_{НП}, v_{КП}$, и включением в них вершин $(v_{Н}^x, v_{Н}^y, v_{Н}^z, v_{Н}^\varphi)$ и $(v_{К}^x, v_{К}^y, v_{К}^z, v_{К}^\varphi)$. Такая модель стержня более близко подходит его физическому изображению (рис. 6).

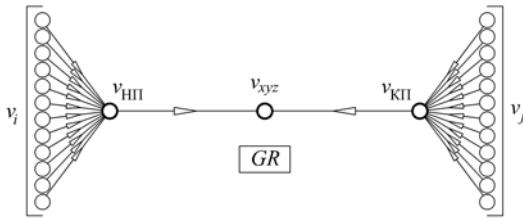


Рис. 6. Ориентированный граф GR

Полустепени исхода $d^+(v_i)$, $d^+(v_j)$ вершин v_i , v_j , а также $d^+(v_{НП})$, $d^+(v_{КП})$ полученных ориентированных графов (рис. 6) равны единице, а полустепени захода $d^-(v_{НП})$, $d^-(v_{КП})$ вершин $v_{НП}$, $v_{КП}$ – равны n . Вершины v_x (v_ϕ), v_y (v_z), v_{xy} ($v_{\phi z}$), v_{xyz} имеют нулевую полустепень исхода и являются точками сочленения графа G .

Набор входных переменных для НП (КП) графа GR можно представить следующей схемой (рис. 7). Верхняя часть схемы содержит кинематические (К), а нижняя – силовые (С) входные параметры.

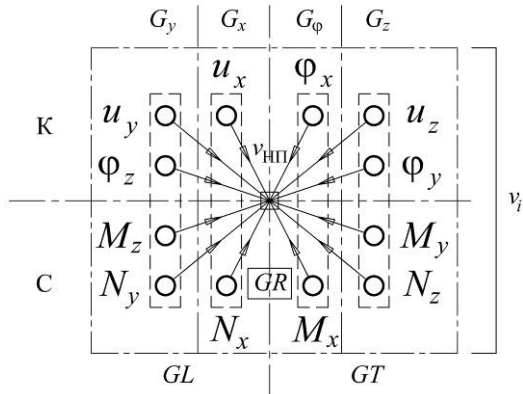


Рис. 7. Входные параметры графа GR

Последующее преобразование графа G получается в результате снятия ориентации с дуг ориентированных графов (рис. 2, б). При этом несложно заметить (рис. 2, а), что последовательные ребра $e=(v_{НП}, v_x)$ и $e=(v_x, v_{КП})$, инцидентные вершине v_x (v_ϕ), можно заменить одним ребром e_x (e_ϕ)= $(v_{НП}, v_{КП})$, удалив вершину v_x (v_ϕ). В результате такого слияния последовательности [2] ребро e_x (e_ϕ) будет нести полную информацию о топологическом коде графа G_x (G_ϕ). Аналогичным образом поступаем и для графов G_y (G_z), GL (GT) и GR , которые также будут простыми связными гра-

фами (рис. 8), топологически эквивалентными графам (рис. 2, б).

Полученные для отдельных видов колебаний графы отличаются только количеством вершин v_i , v_j и смежных ребер e_i , e_j , что дает возможность использовать их в различных сочетаниях при моделировании совместных колебаний стержня. Степени вершин v_i , v_j , обозначаемые как $d(v_i)$, $d(v_j)$, равны единице, а вершин $v_{НП}$, $v_{КП}$ – $(n+1)$. Соответственно порядок графов, представленных на рис. 8, равен $2(n+1)$. В общем случае граф G на $2(n+1)$ вершинах и $2n+1$ ребрах имеет одну компоненту $k=1$. Поэтому ранг $\rho(G)$ графа G будет равен числу ребер $2n+1$, а цикломатическое число $\mu(G)=0$. Все графы являются связными ациклическими графами и имеют форму дерева [2].

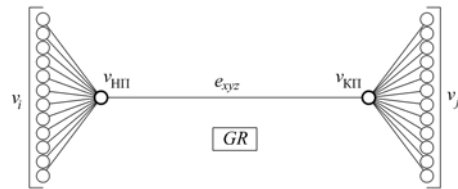


Рис. 8. Неориентированный граф GR

Для каждого из графов $G=(V, E)$ можно выполнить двудольное разбиение с разделением множества вершин V на два подмножества X , Y , включающие начальные и конечные параметры стержня

$$X = \sum_{i=1}^n v_i + v_{НП}; Y = \sum_{j=1}^n v_j + v_{КП}. \quad (1)$$

Ребра e_i , e_j ($i, j=1, 2, \dots, n$) в двудольном графе $G=(X, Y, E)$ являются независимыми и образуют максимальное паросочетание M в графах G_x , G_ϕ , G_y , G_z . Число паросочетания $\alpha(G)$ графа G равно $2n$. Вершины v_i , v_j являются конечными и насыщенными, а паросочетание M – полным паросочетанием X с Y .

Определим матрицу достижимости $M=[a_{ij}]$ графа G на n вершинах v_i и n вершинах v_j как $n \times n$ (0,1)-матрицу, имеющую только нулевые и единичные элементы. Строки

матрицы M будут соответствовать НП стержня с вершинами $v_i \in X$, а столбцы – КП стержня с вершинами $v_j \in Y$. Тогда элементы a_{ij} определяются следующим образом:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (v_i, v_j) \in E; \\ 0, & \text{если } (v_i, v_j) \notin E. \end{cases}$$

Другими словами, каждый элемент a_{ij} матрицы M равен 1 при условии, что существует ориентированный путь из вершины v_i в вершину v_j .

Так, матрицы M_x, M_φ и M_y, M_z графов G_x, G_φ и G_y, G_z будут матрицами второго и четвертого порядков с единичными элементами. Для графов GL, GT соответствующие матрицы M_{GL}, M_{GT} примут вид:

$$M_{GL} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{КП} \\ \text{НП} \end{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{matrix} & & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (2)$$

где $X = \left\{ \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 \\ N_x & N_y & M_z & \varphi_z & u_y & u_x \end{matrix} \right\}$ для графа GL и

$X = \left\{ \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 \\ M_x & N_z & M_y & \varphi_y & u_z & \varphi_x \end{matrix} \right\}$ для графа GT .

Паросочетание графа GL состоит из двух паросочетаний M_x, M_y и содержит компоненты двух видов – для продольных и изгибных колебаний

$$M_{GL} = M_x \oplus M_y, \quad (3)$$

где $M_x = \{e_{H1}, e_{H6}, e_{K1}, e_{K6}\}$,

$M_y = \{e_{H2}, e_{H3}, e_{H4}, e_{H5}, e_{K2}, e_{K3}, e_{K4}, e_{K5}\}$.

Соответственно для графа GT можно записать

$$M_{GT} = M_\varphi \oplus M_z. \quad (4)$$

Кольцевая сумма графов G_x, G_y и G_φ, G_z представляет собой графы GL и GT (рис. 9)

$$G_x \oplus G_y = GL; G_\varphi + G_z = GT. \quad (5)$$

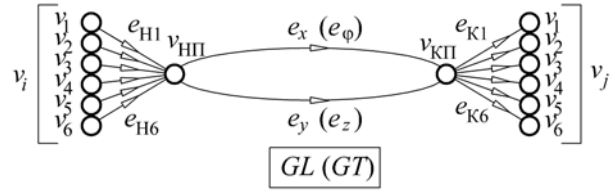


Рис. 9. Ориентированные графы GL и GT

Если представить величины v_i, v_j как компоненты векторов $V_{HП}, V_{КП}$, то матрицу M можно рассматривать как матрицу влияния или переходную матрицу [18, 19], которая преобразует параметры оригинального стержня в сечении $x=0$ (рис. 1) в параметры в сечении $x=l$. В этом случае каждый ненулевой элемент матрицы M будет иметь свой вес ω_{ij} , выражаемый определенными функциями из уравнений метода начальных параметров в матричной форме

$$a_{ij} = \begin{cases} \omega_{ij}, & \text{если } (v_i, v_j) \in E; \\ 0, & \text{если } (v_i, v_j) \notin E. \end{cases} \quad (5)$$

Значения ω_{ij} соответствуют элементам матрицы влияния [19, 20], а зависимость между граничными НП и КП стержня в сечениях 0, 1 (рис. 1) определяется выражением

$$V_1 = M_1 V_0. \quad (6)$$

Таким образом, переменная, соответствующая вершине v_j , равна сумме произведений весов дуг, которые заходят в вершину v_j и переменных, соответствующих вершинам v_i , из которых эти дуги исходят.

Рассмотрим цепочку стержней с кусочно-постоянными характеристиками в виде логической схемы (рис. 10):

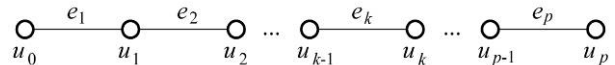


Рис. 10. Одномерная стержневая система

Тогда зависимость между граничными параметрами и их значениями в сечении p представляется с помощью цепочки матриц [17, 18]:

$$V_p = M_p M_{p-1} \dots M_1 V_0. \quad (7)$$

Следует заметить, что путь от одной вершины к другой может быть необязательно ориентированным от 0 к p . Возможна и обратная ориентация с учетом принятой системы координат и перемены знаков в элементах матрицы M . Поэтому, если между любыми смежными вершинами расположить по две противоположно ориентированные дуги, то можно рассматривать граф G как неориентированный граф, представляющий симметричное бинарное отношение R в виде $v_i R v_j$ и $v_j R v_i$.

На рис. 11 представлен планарный граф GR и двойственный ему граф GR^* . Принцип теоретической двойственности используемых графов [10] позволяет более детально исследовать их структуру, исходя из подпространств циклов и разрезов графа G .

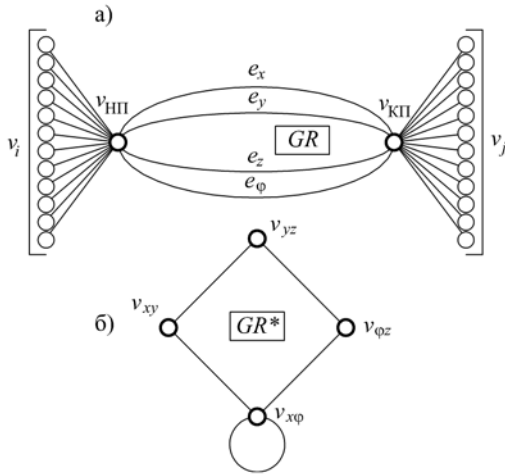


Рис. 11. Планарный и двойственный графы

Матрица достижимости M_{GR} графа GR имеет порядок $n=12$ и определяется множеством параметров

$$X = \begin{Bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 \\ N_x & M_x & N_y & M_z & N_z \\ M_y & \phi_y & u_z & \phi_z & u_y & \phi_x & u_x \end{Bmatrix}.$$

$$M_{GR} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{КП} \\ \text{НП} \end{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 & v_9 & v_{10} & v_{11} & v_{12} \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \\ v_{10} \\ v_{11} \\ v_{12} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (8)$$

или, в сокращенной форме, через компоненты M_x, M_ϕ, M_y, M_z и M_{GL}, M_{GT}

$$M_{GR} = M_x \oplus M_\phi \oplus M_y \oplus M_z; \quad (9)$$

$$M_{GR} = M_{GL} \oplus M_{GT}. \quad (10)$$

Соответствующая матрице M_{GR} функциональная матрица влияния M_B приведена в работе [15]. Эти матрицы примечательны тем, что они дают базовое описание всех величин, характеризующих поведение колеблющегося стержня, из которого получают другие описания для отдельных видов колебаний путем удаления некоторых строк и столбцов матриц M_{GR}, M_B .

Связные подграфы G_x, G_ϕ, G_y, G_z будут являться основными компонентами графа GR , для которого можно записать

$$GR = G_x \oplus G_\phi \oplus G_y \oplus G_z, \quad (11)$$

или

$$GR = GL \oplus GT. \quad (12)$$

Также отметим, что графы GL и GT (рис. 9) будут нести параллельные (циклические) ребра e_x, e_y и e_ϕ, e_z , которые могут быть заменены одним ребром e_{xy} и $e_{\phi z}$. Соответственно для графа GR (рис. 11,а) параллельные ребра e_x, e_y, e_z, e_ϕ можно заменить одним ребром e_{xyz} , инцидентным вершинам $v_{НП}, v_{КП}$. И в том и другом случае приходим к графу, представленному на рис. 8.

Следующим шагом является построение алгоритма определения топологического кода графа G и его идентификация с помощью ассоциированных матриц. Каждый элемент такой матрицы является выражением частотного определителя стержня при определенных входных параметрах v_i, v_j . Соответствующие определители состоят из миноров порядка $k=n/2$, порождаемых матрицей влияния начальных параметров M_B порядка n . Для графа GR $k=6$; GL, GT $k=3$; G_y, G_z $k=2$; G_x, G_ϕ $k=1$. Возможные комбинации кодов начальных и конечных граничных параметров стержня определяются в каждом конкретном случае с помощью таблиц переходов [15].

Ассоциированная блочная матрица M_{xyz} для пространственных колебаний стержня состоит из четырех подматриц, описывающих отдельные виды колебаний стержня, соответствующих компонентам графа GR и вершинам двойственного графа GR^* , который является удобным графическим представлением потока переменных в системе. При построении структуры матрицы M_{xyz} использовался каскадный алгоритм формирования ее блоков и кодирования состояний. Полученные матрицы кодов, ассоциированные матрицы, а также методика их использования для расчета свободных пространственных колебаний стержневых систем приведены в работе [15].

Для решения системы n неоднородных линейных алгебраических уравнений с n неизвестными начальными параметрами x_m ($m = 1, 2, \dots, n$), описывающих вынужденные колебания стержневой системы, можно применить теоретико-графовый метод, предложенный Коутсом и Мэзоном [2]. Однако, вместо используемых ими матриц смежности удобнее сразу же перейти через матрицы достижимости и влияния к ассоциированным матрицам с последующим определением значений x_m по правилу Крамера [22].

$$x_m = D_{zm} / D_z, \quad (13)$$

где $D_z = |a_{im}|_1^n$ – определитель системы уравнений $\sum_{m=1}^n a_{im} x_m = b_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, составленный из коэффициентов левой части; D_{zm} – определитель, получаемый из D_z заменой элементов $a_{1m}, a_{2m}, \dots, a_{nm}$ m -го столбца, соответствующего определяемому неизвестному, свободными членами b_1, b_2, \dots, b_n , или

$$D_{zm} = \sum_{i=1}^n A_{im} b_i, \quad (14)$$

где A_{im} – алгебраическое дополнение элемента a_{im} в определителе D_z .

Использование ассоциированных матриц позволяет значительно упростить процедуру формирования выражений D_z и D_{zm} . Так, для цепной стержневой системы (рис. 10) при периодическом внешнем воздействии выражение (13) можно представить в следующем виде:

$$x_k = \frac{W_1 \prod_{k=2}^{p-1} T_k W_p}{V_1 \prod_{k=2}^{p-1} M_k V_p}, \quad (15)$$

где V_1, M_k, V_p и W_1, T_k, W_p – ассоциированные матрицы участков-стержней, характеризующих свободные и вынужденные колебания системы соответственно.

В целом, структура графов, моделирующих вынужденные колебания стержня, остается без изменений. Отличие заключается только лишь в кодах граничных параметров, которые находятся в состоянии силового или кинематического возмущения и параметров, которые подлежат вычислению. Такие параметры могут быть выражены функцией в виде двузначного предиката [6]. Если задано какое-либо возмущение в сечении стержня k , то предикат $F(x_k)$ принимает значение 1, если возмущения нет – значение 0. И наоборот – для параметра, который подлежит вычислению, предикат $F(x_k)$ принимает значение 0, если нет – 1.

В этом случае возможные комбинации кодов граничных условий на каждом из концов стержня могут содержать различное число фиксированных и произвольных параметров. Следовательно, входные последовательности НП, КП стержня могут быть также реализованы на множествах $\{0, 0, 0, 1\}$, $\{1, 1, 1, 0\}$ для графов G_y, G_z и $\{0, 1\}$ – для G_x, G_ϕ . Следовательно, элементы ассоциированных матриц, соответствующих топологическому коду графа G , будут состоять из определителей миноров матрицы M_B , имеющих порядок $k = 8$ для графа GR ; $k = 4$ – для GL, GT ; $k = 3$ – для G_y, G_z и $k = 1$ – для G_x, G_ϕ . Полученная таким образом блочная ассоциированная матрица R_{xyz} и ее подматрицы приведены в работе [21].

В заключение, можно сделать вывод о широких перспективах представления стержневых конструкций с помощью математических моделей, основанных на теории конечных графов. Сочетание комбинаторных методов и классических методов строительной механики позволяет формализовать и систематизировать динамический расчет, открывает альтернативную возможность к исследованию поведения таких систем. Следует также отметить высокую эффективность представления топологической

информации в терминах теории матриц и конечных множеств.

В дальнейших исследованиях предполагается использовать конечно-графовые модели в динамических расчетах стержневых и балочных конструкций с непрерывно-дискретными параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Басакер Р. Конечные графы и сети: Пер. с англ. / Р. Басакер, Т.Саати. – М.: Наука, 1973. – 368 с.
2. Свами М. Графы, сети и алгоритмы: Пер. с англ. / М. Свами, К. Тхуласираман – М.: Мир, 1984. – 455 с.
3. Maschke В. Geometrical Formulation of Bond Graph Dynamics with Application to Mechanism // J. Franklin Inst., v. 328, N 5-6. – 1991. – P. 723-740.
4. Brown Forbes T. Hamiltonian and Lagrangian bond graphs // J. Franklin Inst., v. 328, N 5-6. – 1991. – P. 809-831.
5. Karnopp D. An approach to derivative causality in bond graph models of mechanical systems // J. Franklin Inst., v. 329, N 1. – 1992. – P. 65-75.
6. Рвачев В. Л. Геометрические приложения алгебры логики. – К.: Техника, 1967. – 212 с.
7. Эйхе Г. Н. Особенности структуры уравнений частот и форм установившихся колебаний рамных мостов и других плоских ортогональных стержневых систем // Вопросы статики и динамики мостов: Межвуз. сб. науч. тр. – Д.: ДИИТ, 1987. – С. 83-94.
8. Shai O. Design Through Common Graph Representations // Proc. of DETC'03 ASME 2003 Design Engin. Tech. Conf. – Chicago, Illinois, USA, 2003. – 10 pp.
9. Бобыльченко В. Ю. Определение собственных колебаний балок с сосредоточенными регулярными массами методом электромеханических аналогий / В. Ю. Бобыльченко, П. М. Чеголин // Рост. гос. акад. стр-ва, 1996. – 12 с.; Деп. в ВИНТИ 09.08.96, № 2652-В96.
10. Та'асех N., Shai O. Graph theoretical duality perspective on conjugate structures and its applications // Eur. J. Mech. A, 2005. – 24, N 6. – P. 974-986.
11. Филин А. П. Алгоритмы построения разрешающих уравнений механики стержневых систем. – Л.: Стройиздат, 1983. – 232 с.
12. Watanuki Kelichi. Automatic generation of equations of motion for mechanical system using linear graph theory. Application to mechanical vibration systems / Kelichi Watanuki, Hideyuki Ohtaki // Nihon kikai gakkai ronbunshu. C. = Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C., 1993. – 59, N 562. – P. 1960-1965.
13. McPhee J. J. On the Use of Linear Graph Theory in Multibody System Dynamics // Nonlinear Dynamics, 9. – 1996. – P. 73-90.
14. Montbrun-Di Filippo J. A survey of bond graphs: theory, applications and programs / J. Montbrun-Di Filippo, M. Delgrado // J. Franklin Inst., v. 328, N 5-6. – 1991. – P. 565-606.
15. Распопов А. С. Конечно-автоматное моделирование пространственных колебаний стержневых и балочных конструкций // Вестник Днепроп. нац. ун-та жел.-дор. тр-та. – Вып. 19. – Д.: ДНУЖТ, 2007. – С. 125-133.
16. Gheng-Ho Hsu. Topological Code of Graphs / Hsu Gheng-Ho, Lam Kin-Tak // J. Franklin Inst., v. 329. – 1992. – P. 99-109.
17. Ивович В. А. Переходные матрицы в динамике упругих систем: Справочник. – М.: Машиностроение, 1981. – 183 с.
18. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
19. Распопов А. С. Изгибно-продольные колебания стержневых конструкций с распределенными параметрами // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. – Вып. 43. – Д.: ПГАСА, 2007. – С. 413-421.
20. Распопов А. С. Совершенствование расчета изгибно-крутильных колебаний неразрезных балок и рам // Вестник Днепроп. нац. ун-та жел.-дор. тр-та. – Вып. 18. – Д.: ДНУЖТ, 2007. – С. 161-166.
21. Распопов А. С. Конечно-автоматное моделирование вынужденных колебаний недиссипативных стержневых систем // Опір матеріалів та теорія споруд: Наук.-техн. збірка / Київськ. нац. ун-т буд. та арх. (КНУБА). – Вип. 67. – К., 2007.
22. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. 4-е изд. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

Поступила в редколлегию 05.03.2008.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БУРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОХОДКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВолов

Наведена модель руйнування гірських порід вибухом у вертикальних стволах, на базі якої розраховано найважливіші параметри техніко-економічних показників буро-вибухової технології.

Приведена модель разрушения горных пород взрывом в вертикальных стволах, на базе которой рассчитаны важнейшие параметры технико-экономических показателей буровзрывной технологии.

The model of destruction of rocks by explosion in vertical shafts is presented. On its basis the most important parameters of technical-and-economical indices of the drilling-and-blasting technology are calculated.

Успешная реализация мероприятий по реконструкции действующих и строительству новых угольных шахт невозможна без проведения капитальных горных выработок. При этом сооружение вертикальных стволов, количество которых в обозримом будущем существенно возрастет в связи с реконструкцией действующих и со строительством новых шахт, относится к категории наиболее сложных и трудоемких. Из всех сооружаемых стволов примерно 95 % проходится буровзрывным способом.

Одним из важнейших параметров взрывных работ является длина заходки $l_{\text{зах}}$ – подвигание забоя выработки за одно взрывание в вертикальных стволах, которое характеризуется двумя составляющими:

$$l_{\text{зах}} = l_{1\text{ф}} + l_{2\text{ф}}, \quad (1)$$

где $l_{1\text{ф}}$, $l_{2\text{ф}}$ – углубление забоя ствола за счет первой и второй фаз уборки породы.

Отношение длины заходки к глубине шпуров называется коэффициентом использования шпуров (КИШ), которым характеризуется эффективность взрыва.

При проходке вертикальных стволов применяют глубокие шпуровые (4.2...4.5 м), что обусловлено высотой применяемой опалубки [1]. Результатом этого является различное действие взрыва на слои обуренного горного массива. На практике последствия такого действия взрыва проявляются в том, что процесс уборки разрушенной взрывом породы обычно разделяется на две фазы. В первой фазе выдвигается, как правило, до 80...90 % породы; при этом погрузочные и подъемные машины используются наиболее эффективно. Во второй фазе производительность грейферных погрузчиков резко пада-

ет, и они не обеспечивают самостоятельной зачистки забоя без дополнительных затрат ручного труда проходчиков [2, 3].

Повышение технико-экономических показателей (ТЭП) проходки вертикальных шахтных стволов в скальных горных породах по буровзрывной технологии невозможно без интенсификации процесса уборки разрушенной взрывом породы во 2-й фазе. Несмотря на накопленный опыт ведения взрывных работ в этих условиях, еще не разработаны надежные методы определения параметров обуренного массива, в пределах которого окажется после взрывания участок ствола с упомянутой фазой уборки. Для этого необходимо теоретически обосновать и подтвердить практикой модель осевого деформирования массива горных пород взрывом и на ее основе получить формулы для расчета каждой из установленных при этом зон разрушения. Методически эта задача решается путем систематизации известной модели радиального деформирования массива горных пород взрывом с учетом временных параметров протекания механических процессов, происходящих при внутреннем действии взрыва цилиндрического шпурового заряда, установленных МакНИИ.

Целью данной работы является построение модели разрушения горных пород вдоль обуренного массива и на ее основе установление зависимостей длины заходки и коэффициента использования шпуров при буровзрывных работах в вертикальных стволах от основных влияющих факторов. Для ее выполнения поставлены следующие задачи: 1) разработать модель разрушения горных пород в вертикальных шахтных стволах; 2) установить аналити-

ческие зависимости для расчета глубины «стаканов» шпуров и воронки рыхления.

Основываясь на современных теоретических представлениях, экспериментальных исследованиях и многолетнем опыте проходки

вертикальных шахтных стволов можно предложить следующую качественную модель разрушения массива скальных горных пород (рис. 1).

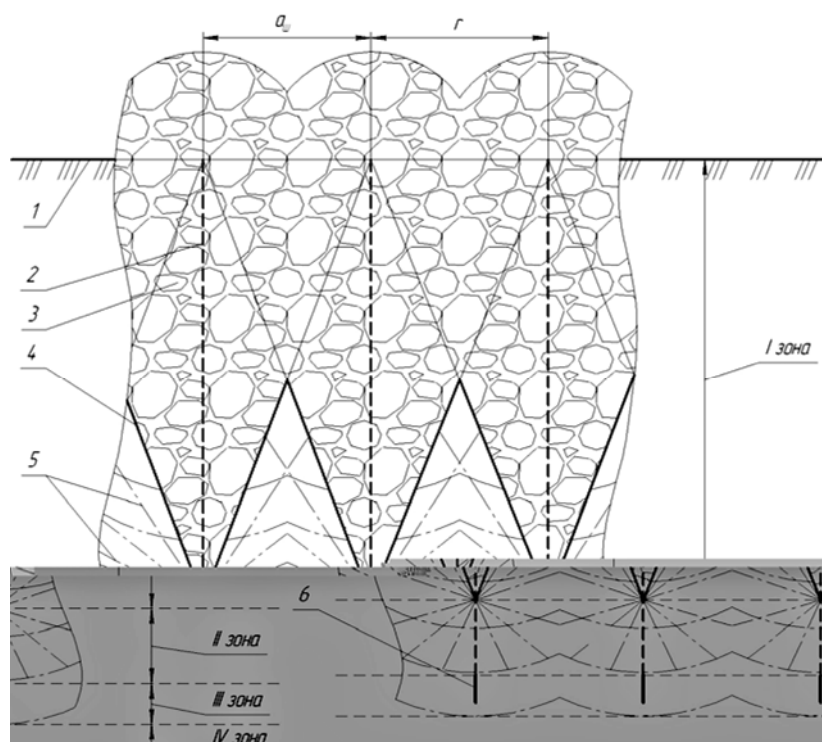


Рис. 1. Общий характер взрывного разрушения горного массива в вертикальных шахтных стволах
1 – забой вертикального ствола; 2 – участок шпура, разрушенный взрывом размещенного в нем заряда ВВ; 3 – горная порода, разрушенная и приведенная в движение (размещенная в пределах воронки рыхления); 4 – боковая поверхность воронки рыхления; 5 – радиальные и кольцевые трещины; 6 – «стаканы» шпуров, оставшиеся в неразрушенном горном массиве; $a_{ш}$ – расстояние между шпурами; r – радиус воронки рыхления горных пород; I – зона образования воронки рыхления; II – зона разрушения и дробления; III – зона растрескивания; IV – зона сотрясения.

Качественная модель разрушения горных пород взрывом вертикальных шпуровых зарядов

Основываясь на современных теоретических представлениях, экспериментальных исследованиях общепринятых положений и многолетнем [1-3] опыте проходки вертикальных шахтных стволов, можно предложить следующую качественную модель и временные параметры процесса рыхления и разрушения массива скальных горных пород при производстве взрывных работ, показанную на рис. 1 на примере взрыва трех соседних шпуровых зарядов.

На представленной модели условно показано, что радиус воронки рыхления (r) равен расстоянию между шпурами ($a_{ш}$). В действительности, в зависимости от условий взрывания, он может быть или меньше, или больше этого расстояния. Как показано в работе [4], максимально возможный радиус воронки рыхления в вертикальных стволах при взрывании

одиночного шпурового заряда в «сухих» скальных горных породах равен 0.82 м, а в обводненных – 1.05 м. С подтоплением забоя ствола водой радиус воронки взрыва уменьшается и, например, при высоте слоя воды, равной 0.20 м, он составляет 0.25 м. В этом плане следует заметить, что эффективность взрывных работ при проведении горных выработок определяется не раствором, а глубиной воронки взрыва (в отличие от взрывных работ на выброс, когда радиус воронки является чуть ли не основным проектным параметром [1]). Разрушение пород в этом случае происходит в режиме так называемого «выпирающего горна» [3].

В соответствии с предлагаемой моделью, процесс разрушения скальных пород протекает так. При инициировании шпурового (цилиндрического) заряда ВВ вдоль него распространяется детонационная волна, за которой следует область продуктов взрыва. Одновременно с расширением продуктов взрыва формируется взрывная волна сжатия, состоящая из ударной

волны и сопутствующего потока продуктов взрыва, обладающих высокими температурой и давлением, и распространяющихся во все стороны от места взрыва. Взрывная волна практически мгновенно наносит по окружающей среде резкий удар огромной силы. В момент выхода детонационной волны на поверхность заряда ВВ давление на ее фронте имеет значение порядка $1.01 \cdot 10^{10}$ Па при температуре около 3000 °С.

Чтобы применить предложенную модель разрушения для установления искомым аналитических зависимостей, цилиндрический шпуровой заряд представим как заряд, составленный из примыкающих друг к другу своими торцами сосредоточенных зарядов. При этом вокруг каждого такого «элементарного» заряда формируется своя сфера разрушения. В своей совокупности они образуют цилиндр с полусферическим основанием радиусом R_p , сопрягающимся с горизонтальной плоскостью, проходящей через нижнюю границу зоны разрушения, располагаемую несколько ниже дна шпуров – за пределами дна шпура глубина трещинообразования не превышает диаметра шпура [4].

Приняв такую схему взрывного разрушения горных пород в вертикальных стволах, представилось возможным впервые в инженерной практике аналитически определить глубину «стакана» шпура. Общеизвестно, что при совместном действии близко расположенных шпуровых зарядов глубина «стакана» будет меньшей, чем при взрыве одиночного заряда. Поэтому за величину «стакана» принимаем придонную часть шпура, на которую воздействует только взрыв заряда рассматриваемого шпура (ниже пересечения передних фронтов зоны разрушения всех соседних шпуров забойного комплекта).

Сильная взрывная волна вызывает интенсивное дробление и сильнейшие пластические деформации среды, непосредственно примыкающей к заряду. Вдоль заряда образуется котловая (камуфлетная) полость, со стенками из мелкодробленой, уплотненной породы, радиус которой в скальных породах может достигать 2...4 радиусов заряда. По мере потери энергии, давление взрывных газов ослабевает и деформация породы сжатием на некотором расстоянии от места взрыва прекращается. Фронт ударной волны сглаживается и она переходит в волну напряжений. Начало деформаций в массиве происходит через 2.0 мс после взрыва. Волновые процессы в массиве завершаются за

4...6 мс. Однако все еще большое давление взрывных газов приводит к возникновению растягивающих усилий. Вокруг камуфлетной полости наступает лавинообразный процесс роста микродефектов и разрушения горных пород, происходят разрывы массива при средней скорости распространения деформаций в массиве, равной 7.5 мм/мс.

В результате этого, в первую очередь, образуются радиальные трещины в виде лучей, суживающихся по мере удаления от места взрыва шпурового заряда. В то же время на некотором расстоянии от взорвавшегося заряда ВВ взрывные газы значительно расширяются и охлаждаются, давление резко падает, а растягивающие усилия становятся недостаточными, чтобы вызвать такой характер разрушения породы. Поэтому сильно сжатая упругая порода значительно смещается обратно в направлении места взрыва соответствующего шпурового заряда, т.е. вслед за волной сжатия в породе возникает волна растяжения, под действием которой между радиальными трещинами образуются кольцевые трещины (прерывистые, сферические)

Время начала сдвижения массива (формирования системы радиальных и кольцевых трещин) после взрыва, например, для песчаников равно в зависимости от условий взрывания 4.3...10.0 мс. Одновременно с этим происходят откольные явления (под действием отраженной ударной волны) на открытых поверхностях, в том числе на стенках сближенных шпуров, в которых заряды еще не взорвались. Давление, которое действует на заряды в упомянутых шпурах более 10 мс, условно называют остаточным или статическим (его величина может достигать 30 МПа). С течением времени раствор трещин возрастает. Максимальная радиальная скорость смещения частиц породы (расхождение берегов трещин) за фронтом волны напряжений изменяется от 16.0 до 0.5 м/с. Через 13...25 мс их сеть достигает такого предела, что продукты взрыва прорываются через них в призабойное пространство.

В результате взрывания комплекта зарядов в массиве возникает сложная картина интерференции волн напряжений (прямых и отраженных от взрыва последующих зарядов), образуются дополнительные открытые поверхности. Поэтому в зоне, в которой радиусы разрушения горных пород взрывом соседних шпуровых зарядов накладываются друг на друга, увеличивается эффект разрушения массива, ослабляется массив и тем самым облегчается его оконча-

тельное разрушение давлением газов взрыва. Через 25...46 мс после взрыва образуются дополнительные открытые поверхности. Часть энергии взрывной волны преобразуется в кинетическую, расходуемую на приведение в движение горного массива до открытой поверхности в объеме воронки взрыва – в вертикальных стволах это воронка рыхления. Таким образом, верхний (ближайший к устью шпуров) объем обуренного горного массива не только подвергается интенсивному разрушению взрывом, но и приходит в движение, образуя воронку рыхления. Скорость разлета пород переднего фронта составляет 60...70 м/с, а последующих – 3...6 м/с. Ниже этого участка располагается область растрескивания пород (радиальными и кольцевыми трещинами) без полного разделения горного массива на отдельные. По мере приближения к дну шпура, трещиноватость уменьшается и постепенно переходит в породу, сохранившую свою структуру. Придонная

часть шпуров остается практически в ненарушенной взрывом породе в виде так называемых «стаканов». С течением времени происходит резкое торможение процесса сдвижения горной породы. В это время ударная волна опережает волну сжатия, уходит за пределы радиуса разрушения и распространяется на значительные расстояния. При этом она не вызывает нарушений связи между частицами породы, но создает значительные упругие колебания и сотрясение окружающих пород (переходит в сейсмическую). Для смягчения такого сейсмического воздействия на поверхностный комплекс строящегося ствола проходчики перед взрыванием открывают ляды, а в обшивке копра делают разгрузочные окна.

Для наглядности нанесем на прямую АВ, определяющую общее время нахождения массива горных пород в напряженном состоянии от взрыва шпуровых зарядов, последовательность деформации массива (рис. 2).

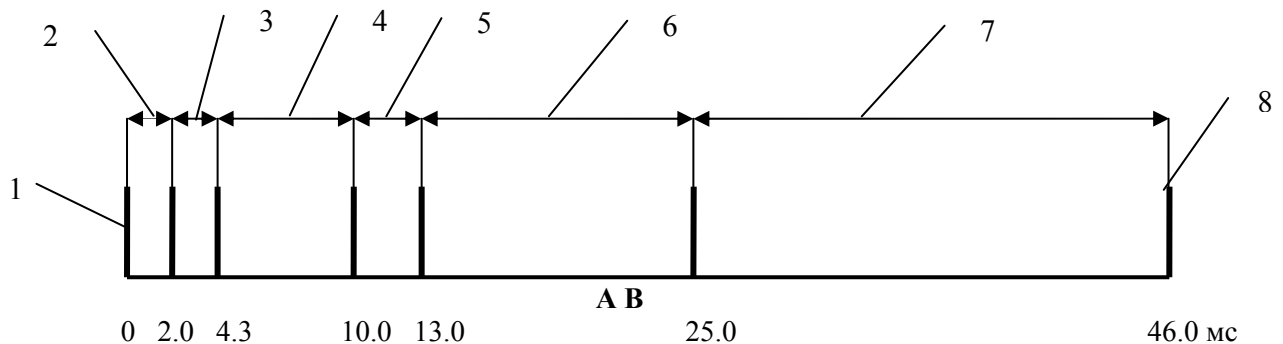


Рис. 2. Область нахождения массива горных пород в напряженном состоянии

1 – взрыв шпуровых зарядов ВВ; 2 – пластические деформации среды, непосредственно примыкающей к заряду; 3 – начало деформаций обуренного массива горных пород, не примыкающего непосредственно к заряду; 4 – начало разрушения и дробления среды; 5 – интенсификация откольных явлений на открытых поверхностях; 6 – сдвижение горных пород (истечение продуктов взрыва из зарядных полостей); 7 – образование дополнительных открытых поверхностей; 8 – начало формирования воронки рыхления

Из представленной модели четко просматриваются вертикальные зоны характера деформации массива горных пород под действием взрыва вертикальных шпуровых зарядов, а именно:

- I зона – зона образования воронки рыхления;
- II зона – зона разрушения и дробления массива горных пород;
- III зона – зона растрескивания горных пород – характеризуется отдельными трещинами с малым раствором;
- IV зона – зона сотрясения (образования и распространения в массиве сейсмических волн).

Установление принципиально различного характера разрушения по глубине обуренного массива позволяет определить физические истоки появления двух фаз уборки разрушенной взрывом породы в вертикальных стволах: I фаза – это уборка породы в пределах воронки рыхления (зона I), а II фаза – разборка разрушенного, но не приведенного в движение горного массива (зона II). В зоне III располагаются «стаканы» шпуров.

Необходимо обосновать параметры вертикальных зон деформации массива взрывом с тем, чтобы разработать технические предложения по усилению динамического воздействия на нижнюю часть обуренного массива.

При такой постановке задачи глубину «стакана» нетрудно определить, решая соответствующую геометрическую задачу. Конечная формула примет вид:

$$l_{\text{ст}} = R_p - d_{\text{ш}} - \sqrt{R_p^2 - a_{\text{ш}}^2}, \quad (2)$$

где R_p – радиус разрушения горных пород, м; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шпура, м; $a_{\text{ш}}$ – расстояние между шпурами, м.

Глубину «стаканов» по этой формуле можно рассчитывать только для условий, когда расстояние между шпурами будет меньше радиуса разрушения, т.е. при условии $a_{\text{ш}} < R_p$.

Задача по расчету радиуса зоны разрушения горных пород (под зоной разрушения понимается совокупность зон вытеснения и трещинообразования) решалась многими учеными. Например, системный анализ данных, взятых из опубликованных работ по разрушению горных пород взрывом, позволил в работе [5] установить размеры зоны интенсивного трещинообразования при совместном взрывании комплекта шпуровых зарядов ВВ, равной в зависимости от прочности пород на сжатие 18.7...34.0 радиусов заряда. Корреляционная зависимость размеров зоны трещинообразования от прочности пород на растяжение установлена в работе [6]. Она оказалась равной $3.88 \cdot 10^4 (\sigma_p)^{-0.43}$. Теоретические исследования, изложенные в работе [7], рассматривают только конкретную задачу расчета зарядов выброса. В то же время известные расчетные схемы основаны на эмпирических зависимостях и поэтому, естественно, получены с учетом дефектности и трещиноватости горных пород, т.е. для каких-то конкретных условий, когда разрушение происходит по поверхности естественной трещиноватости. Это означает, что расчеты по существующим зависимостям не дадут точных значений радиуса разрушения для определенного забоя. Кроме того, недостатком известных зависимостей является то, что они не разделяют размеры зоны разрушения «сухих» и обводненных скальных горных пород.

Модель, учитывающая упомянутые особенности, базируется на том, что прочность горных пород определяется только величиной потенциала бинарного взаимодействия между кластерами глинозема (α - Al_2O_3) в кластерной решетчатой структуре кремнезема (α - SiO_2) [8]. Существует критическое давление, при котором происходит разрыв бинарной связи между кластерами α - Al_2O_3 в процессе сжатия, равное $1.75 \cdot 10^6$ Па. Если взрывом воздействовать на

горную породу давлением большим, чем критическое, то порода будет разрушена. Следовательно, исходя из данного механизма разрушения горных пород взрывом, все полученные на его основе аналитические зависимости и количественные параметры будут справедливы для скальных алюмосиликатных пород с любым значением коэффициента крепости по шкале проф. М. М. Протоdjяконова. Дополнительно к этому необходимо добавить следующее. После разрыва бинарных связей между кластерами берега микротрещин могут при определенных условиях (в зависимости от длительности действия критического давления, раствора трещин и других факторов) сомкнуться с возрастанием потенциала бинарного взаимодействия. Однако, при взрывном разрушении водонасыщенных горных пород такое явление полностью исключается из-за наличия молекул воды в межкластерном пространстве. Поэтому построенная модель является вполне достоверной для условий взрывного разрушения водонасыщенных скальных горных пород.

Основываясь на работе [8], определено численное значение радиуса разрушения скальных горных пород от взрывания заряда из аммонала скального № 1, прессованного ($Q_V = 5.4 \cdot 10^6$ Дж/кг) для случая расположения заряда в шпуре на полное его сечение (без радиального зазора). Он оказался равным: для «сухих» скальных горных пород – $R_{p,c} = 0.58$ м, для обводненных скальных пород – $R_{p,b} = 1.02$ м.

Для проверки установленной зависимости (3) в условиях разрушения обводненных скальных горных пород использованы фактические данные, полученные при проходке вертикальных шахтных стволов, обобщенные в работе [9]. В качестве ВВ во всех проходках использовался аммонал скальный № 1 прессованный в диаметре $d_{\text{п}} = 45$ мм при диаметре шпуров $d_{\text{ш}} = 52...53$ мм. Масса заряда в отбойных и «длинных» оконтуривающих шпурах составляла 4.0 кг (длина заряда 1.8 м). Учитывая, что в реальных условиях проходки стволов коэффициент заряжения $(d_{\text{п}} / d_{\text{ш}})^2$ численно равен 0.75, фактическая энергия воздействия на горный массив сосредоточенного заряда, а следовательно, и объем разрушенной взрывом породы окажутся меньше приведенных выше значений на 25 %, а именно: для обводненных скальных горных пород $R_{p,b} = 0.93$ м. Фактические результаты взрывания и расчетные данные (глубина стаканов рассчитана для $a_{\text{ш}} \leq R_{p,b}$) сведены в табл. 1.

**Фактические и расчетные данные проходки вертикальных шахтных стволов
по буровзрывной технологии**

№ п/п	Место производства взрывных работ	Расстояние $a_{ш}$, м		$l_{ш}$, м	КИШ/длина заходки, м $(\frac{\eta}{l_{зах}})$	Подвигание забоя за счет I фазы уборки породы ($l_{ф}$), м	l_p^{**} , м	Глубина «стаканов» ($l_{ст}$), м	
		между окружностями	между шпурами вдоль окружности					фактическая	расчетная
1.	Клетевой ствол, ш. им. 60-летия Октября	0.88	0.80	4.2	0.85/3.57	3.29	0.91	0.63	0.41...0.58
2.	Клетевой ствол, ш. им. 50-летия СССР	–	0.75*	4.5	0.89/4.00	3.34	1.16	0.50	0.33
3.	Вентиляционный ствол, ш. «Бутовка-Донецкая»	–	0.92*	4.5	0.80/3.60	3.14	1.36	0.90	0.87
4.	Вентиляционный ствол, ш. им. Калинина	0.65	1.00	4.5	0.93/4.18	3.88	0.62	0.32	0.22
5.	Вертикальный ствол, ш. «Пролетарская-Глубокая»	1.0...1.1	0.77...0.86	4.5	0.90/4.07	3.35	1.15	0.72	0.36...0.53
6.	Вентиляционный ствол, ш. № 17-17 бис	0.87...1.05	0.84...1.05	4.5	0.88/3.96	3.47	1.03	0.54	0.49...0.56
7.	Воздухоподающий ствол № 2, ш. «Красноармейская-Западная»	0.60...0.75	1.14...1.18	4.2		3.52	0.68	0.20	0.17...0.32
8.	Восточный вентиляционный ствол № 2, АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»	0.50	0.91...1.04	4.2	0.88/3.70	3.34	0.86	0.50	0.11...0.71
9.	Воздухоподающий ствол № 2, АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»	0.60...0.90	0.82...0.94	4.2	0.84/3.53	2.88	1.32	0.67	0.17...0.62

* рассчитано по площади поперечного сечения ствола и числу шпуров.

** $l_p = l_{ш} - l_{ф}$

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных убедительно подтверждает достоверность предложенной модели разрушения горных пород взрывом вертикальных зарядов в обводненном массиве скальных горных пород, а также выдвинутого определения понятия «стакан шпура» – придонная часть шпура, на которую не воздействует взрыв соседних шпуровых зарядов.

При расстоянии между шпурами больше радиуса разрушения, глубина «стаканов» может достигать величины, равной глубине разрушения горных пород ниже отметки (забоя) ствола по завершению I-й фазы уборки породы (l_p). Фактическая же глубина стаканов в этом случае будет определяться подвиганием забоя ствола во II-й фазе уборки породы. Из формул (1) и (2) следует, что для определения этой величины необходимо знать подвигание забоя ствола за счет I-й фазы уборки породы, которое, как следует из предложенной модели разрушения (см. рис. 1), взаимосвязана с глубиной воронки рыхления (h_p).

Решение задачи по определению глубины воронки рыхления, выполненное методом «крупных частиц», отличается от известных методов учетом работоспособности применяемого для производства взрывных работ ВВ, глубины шпуров и величины заряда в них, а также крепости разрушаемых горных пород [10], а именно:

$$h_p = \frac{P^{0.6} \cdot l_{ш}^{0.8} \left[0.1 \ln(q_3)^{1.5} - 0.029 \ln(q_3)^3 \right]}{\sqrt{f}}, \quad (3)$$

где f – коэффициент крепости пород по шкале проф. М. М. Протодяконова ($f = 7 \dots 20$); P – работоспособность ВВ ($P = 380 \dots 460 \text{ см}^3$); $l_{ш}$ – глубина шпура ($l_{ш} = 2.5 \dots 4.5 \text{ м}$); q_3 – масса шпурового заряда ($q_3 = 1.2 \dots 4.0 \text{ кг}$).

Результаты расчета глубины воронки рыхления по фактическим данным, полученным при проходке вертикальных шахтных стволов [9], сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты взрываний и расчета при проходке вертикальных шахтных стволов Донбасса

Ствол	Коэффициент крепости пород	Масса шпурового заряда, кг	Длина шпура, м	Коэффициент использования шпуров (КИШ)	Подвигание забоя за счет I-й фазы уборки пород, м	Глубина воронки рыхления, м
Клетевой, шахта им. 50-летия СССР	10	4.4	4.5	0.89	3.34	3.88
Воздухоподающий, шахта «Ново-Бутовская»	10	4.0	4.2	0.91	3.55	3.43
№ 2, «Красноармейская-Западная»	6	4.0	4.2	0.95	3.52	3.78
№ 2, АП «Шахта им. Засядько»	15	4.0	4.2	0.84	2.88	2.80
Вентиляционный, шахта № 17/17-бис	12	4.4	4.5	0.88	3.47	3.54

Анализ полученных результатов показывает, что фактическая величина подвигания забоя вертикального ствола по завершению I-й фазы уборки породы совпадает с расчетной глубиной воронки рыхления, полученной рассмотренным методом, т.е.

$$l_{1ф} = h_p. \quad (4)$$

Таким образом, глубина «стаканов» шпуров может достигать при $a_{ш} > R_p$ величины, равной:

$$l_{ст} < l_{ш} \frac{P^{0.6} \cdot l_{ш}^{0.8} \left[0.1 \ln(q_3)^{1.5} - 0.029 \ln(q_3)^3 \right]}{\sqrt{f}}. \quad (5)$$

Следовательно, для получения высокого КИШ необходимо, чтобы расстояние между соседними шпуровыми зарядами, размещенными в пределах одной концентрической окружности или в двух последовательных окружностях (в идеальном случае там и там), было не

меньше радиуса разрушения, равного для разрушения обводненных скальных пород взрывом аммонала скального № 1, прессованного – 0.93 м.

Выводы

1. Построенная физическая модель взрывной технологии проходки вертикальных шахтных стволов соответствует практике и позволила впервые установить вертикальные (осевые) зоны характера и степени воздействия взрыва шпуровых зарядов на обуренный массив горных пород в вертикальных стволах, что дает возможность решить различные технические и технологические задачи, одной из которых является установление расстояния между шпурами, при котором обеспечивается получение, по меньшей мере, нормативного значения КИШ, равного 0.8.

2. Решена задача по определению глубины воронки рыхления, выполненная методом «крупных частиц»; установленная закономерность отличается учетом работоспособности применяемого для производства взрывных работ ВВ, глубины шпуров и величины заряда в них, а также крепости разрушаемых горных пород.

3. Разработанный метод расчета глубины воронки рыхления позволяет прогнозировать протяженность I-й фазы уборки породы, а следовательно, управлять технологией сооружения вертикальных шахтных стволов.

4. Применительно к модели разрушения горных пород взрывом в вертикальных стволах наиболее близко соответствует практике гипотеза, состоящая в том, что прочность горных пород определяется величиной потенциала бинарного взаимодействия между кластерами. Полученные на ее основе значения радиуса трещинообразования после взрывания шпуровых зарядов в различных горно-геологических условиях и формулы для расчета «стаканов» шпуров в полной мере отражают фактические результаты взрывания.

5. Расстояние между шпурами должно быть не больше радиуса разрушения скальных горных пород, равного в случае производства взрывных работ в обводненном массиве аммоналом скальным № 1, прессованным 0.93 м, а аммонитом АП-5ЖВ – 0.59 м.

6. Разработанный метод расчета глубины «стаканов» шпуров позволяет на уровне составления паспорта БВР (проекта БВР) впервые прогнозировать длину заходки ($l_{\text{зах}}$) и КИШ.

Данную работу необходимо продолжить в направлении разработки способов и средств процесса разрушения горных пород на II фазе уборки породы (во второй зоне).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новик Е. Б. Опыт проведения буровзрывных работ при скоростной проходке воздухоподводящего ствола шахты им. А. Ф. Засядько / Е. Б. Новик, В. В. Левит, И. В. Купенко // Уголь Украины, 2002, № 4. – С. 44-46.
2. Тюркян Р. А. Обобщение передового опыта и пути совершенствования технологии проходки вертикальных стволов с высокой производительностью труда. – М.: ЦНИЭИуголь, 1972. – 10 с.
3. Стоев И. С. Технология и организация строительства вертикальных стволов шахт. / И. С. Стоев, П. И. Стоев. – Донецк: ЦБНТИ, 1994. – 212 с.
4. Андреев Б. М. Наукове обґрунтування технології і параметрів вибухової відбійки при підземному добуванні руд в умовах техногенезу: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.15.12 / Криворізький техн. ун-т. – Кривий Ріг, 2006. – 36 с.
5. Фам Ван Лан. Обоснование безопасных параметров камуфлетного взрывания при открытом способе разрушения горных пород и строительных конструкций: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.01 / Донецкий нац. техн. ун-т. – Донецк, 2001. – 20 с.
6. Черныгина Л. Ф. Эффективность способов управления взрывным разрушением напряженных пород / Л. Ф. Черныгина, К. С. Ищенко, А. Г. Бутырин // Уголь Украины, 2003, № 6. – С. 8-11.
7. Литвинский Г. Г. Геомеханика взрыва заряда на выброс // Матеріали міжн. конф. «Форум гірників-2006». – Д.: Нац. гірн. ун-т, 2006. – С. 65-73.
8. Гречихин Л. И. Взрывные технологии в шахтном строительстве // Современные проблемы шахтного и подземного строительства: Вестник Отраслевого отделения «Строительство шахт, рудников и подземных сооружений» Академии строительства Украины (материалы междунауч.-практ. симпозиума 27 мая – 2 июня 2006 г., Крым, Алушта, Украина). Вып. 7. / Л. И. Гречихин, О. И. Рублева – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – С. 85-96.
9. Пронин В. И. Основные причины значительной продолжительности уборки породы в вертикальных стволах при производстве взрывных работ // Прогрессивные технологии строительства, безопасности и реструктуризации горных предприятий: Материалы региональной науч.-практ. школы-семинара 24-26.11.2005 г. / В. И. Пронин, О. И. Рублева – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – С. 80-92.
10. Налисько Н. Н. Действие отбойных зарядов ВВ в забое вертикальных стволов // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов: Сб. науч. ст. НГУ. / Н. Н. Налисько, А. В. Черный, В. В. Левит, О. И. Рублева. – Д.: АРТ ПРЕСС, 2007. – С. 320-328.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕТЫРЕХХЛОРИСТОГО ТИТАНА

У статті наведено опис досліджень, присвячених фізико-хімічному підходу по переробці відходів виробництва чотирьохлористого титану. Запропонована інноваційна схема, яка забезпечує безвідходність титанового виробництва.

В статье описаны исследования, посвященные физико-химическому подходу по переработке отходов производства четырехлористого титана. Предложена инновационная схема, которая обеспечивает безотходность титанового производства.

In the article the studies devoted to a physical-chemical approach on treatment of wastes of titanium tetrachloride production are described. An innovation scheme providing the wasteless titanium production is proposed.

При производстве четырехлористого титана используют титаносодержащий шлак, в котором всегда присутствуют незначительные количества редких и редкоземельных элементов – ванадия, скандия, ниобия, тантала, хрома и др. Значительно больше в шлаке содержится примесей железа, алюминия, магния, кремния, кальция, марганца. Общее количество всех примесей достигает 15...20 %. Практически все эти примеси отделяют и вывозят в виде отходов на участки хлорирования, конденсации и ректификации. При хлорировании большинство этих примесей переходит в хлориды и оксихлориды и в зависимости от физико-химических свойств концентрируется в отдельных полупродуктах и отходах производства. Это приводит к большим бесполезным расходам хлора, дополнительным затратам и к загрязнению окружающей среды, т.е. к изменению химии среды обитания всего живого [1]

Отходами производства четырехлористого титана являются [2, 3] отработанный расплав титановых хлораторов; возгоны пылевых камер и рукавного фильтра; огарок шахтных хлораторов; расплав свечей переработки пульпы; кубовые остатки ректификации; вторичный дистиллят колонн; кислые газы, которые после очистки водой и известковым «молоком» образуют солянокислые стоки и гипохлоритную пульпу и др. Таким образом, в процессе производства четырехлористого титана образуются твердые и кислые хлорсодержащие отходы. Составы отходов приведены в [3-5].

Разработано [6-8], испытано в лабораторных и полупромышленном масштабах определенное количество технологических схем, которыми предусматривается частичная или полная ликвидация отходов горно-металлургических

комплексов производство титана, чугуна, стали и др. Другими словами, отсутствуют инновационные технологии от добычи и переработки природного сырья (ильменита, арizonита, рутила, анафаза, брунита, лейкоксена, липарита, сорена, перовскита и др.), всего известно около 70 минералов титана.

Пути утилизации отходов, по нашему мнению, можно разделить на два направления: пирометаллургические процессы, проходящие при высоких температурах, и гидрометаллургические процессы (в водных растворах при обычной температуре). При этом пирометаллургическими способами можно решать частичные, отдельные задачи переработки отходов. Они не охватывают такие виды отходов, как кислые стоки, гипохлоритные пульпы. В связи с этим, без разработки инновационных технологий по вовлечению титаносодержащих отходов в жизненный цикл объектов промышленного, гражданского, жилищно-коммунального, транспортного, гидротехнического строительства, а также для ремонта и восстановления искусственных инженерных сооружений и конструкций не ликвидировать титановые отходы Вольногорского горно-металлургического и Запорожского титано-магниевого комбинатов (Крымского завода «Титан» и др.).

Одновременно с этим значимая роль отводится гидрометаллургическим процессам, которых отличает высокая гибкость, универсальность, сочетание высокой эффективности с простотой аппаратного оформления; кроме того, эти технологии легче поддаются механизации и автоматизации. Поэтому не случайно, что значительное количество технологических схем переработки всех видов титановых отходов базируется на основе гидрометаллургии.

При этом предложено несколько технологических схем переработки всех видов отходов титано-магниевого производства [4–7]. По одной из них в образовавшиеся кислые стоки титано-магниевого производства загружают отвальный расплав солевого хлоратора, а также все твердые отходы магниевого передела. Доводят рН пульпы до 7,0. Выпавший осадок отфильтровывают и, поскольку он безвреден и не радиоактивен, направляют для производства эмалевых фритт, глазури и др. [8]. Раствор, содержащий в основном хлориды магния и калия, корректируют хлористым магнием или хлористым калием до карболитового соотношения $KCl : MgCl_2 = 1 : 1$ и направляют в керамические ликера. В лабораторном масштабе разработана технологическая схема переработки медно-ванадиевых кеков для улучшения физико-химических и механических свойств различных силикатных материалов и изделий из них. В отвальном расплаве титановых хлораторов наряду с другими ценными компонентами (магний, калий) присутствует скандий, ниобий, тантал. Предложена технология переработки отвального расплава солевого хлоратора. Разработанная инновационная технология позволяет получать новые полупродукты из отходов в виде новых строительных материалов для строительства, ремонта и восстановления архитектурного вида памятников культуры и т.д. Отработанный расплав и возгоны, содержащие ниобий и тантал, дают возможность получать тантал-ниобиевый концентрат, который используется по нашей схеме для улучшения огнеупорности и увеличения срока эксплуатации фундаментов и других элементов сооружений и конструкций. Предложена переработка отвального расплава титановых хлораторов, ванадий-содержащих кубовых остатков, кислых стоков, гипохлоритных пульп, улучшающих товарные показатели портландцемента и бетона.

Таким образом, нами предложена инновационная схема для того, чтобы титановое производство стало безотходным – с полным комплексным использованием титаносодержащего сырья и защиты окружающей среды от физико-химического загрязнения. Источником химического загрязнения является титановая промышленность, и основным сырьем для получения титановой губки является четыреххлористый титан. $TiCl_4$ используют также для получения пигментной окиси титана хлорным методом, применяют в качестве катализатора при производстве полимерных материалов (полиэтилен, полиизопрен), при производстве эмалевых фритт, глазури в виде шликерных и высокотемпературных добавок в химических технологиях керамики и огнеупоров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бокрис Дж. Химия окружающей среды. – М.: Мир, 1982.
2. Сергеев В. В. Металлургия титана / В. В. Сергеев, Н. В. Галицкий. – М.: Металлургия, 1971.
3. Лугинский Г. П. Четыреххлористый титан. – М.-Л.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1939.
4. Зеликман А. Н. Металлургия редких металлов / А. Н. Зеликман, Г. А. Меерсон. – М.: Металлургия, 1973.
5. Гармат В. А. Металлургия титана. – М.: Металлургия, 1968.
6. Лугинский Г. П. Химия титана. – М.: Химия, 1971.
7. Гордон Г. М. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов. – М.: Металлургия, 1977.
8. Савин Л. С. Использование достижений теоретического и прикладного материаловедения при подготовке экологов / Л. С. Савин, А. П. Приходько, Ю. Л. Савин // Вестник ПГАСА. – № 11. – Д.: ПГАСА, 2002. – С. 42-46.

Поступила в редколлегию 07.11.2007.

С. Г. СТРАДАНЧЕНКО, А. Ю. ПРОКОПОВ, М. С. ПЛЕШКО (ШИ(ф) ЮРГТУ (НПИ), г. Шахты, Российская Федерация)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КРЕПИ И АРМИРОВКИ ГЛУБОКИХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Рассмотрены недостатки совмещенной схемы строительства вертикальных стволов. Предложены новые подходы и решения в проектировании стволов.

Розглянуті недоліки суміщеної схеми будівництва вертикальних стволів. Запропоновані нові підходи і рішення в проектуванні стволів.

Disadvantages of the combined chart of building vertical shafts are considered. New solutions in planning of shafts are offered.

В экономически развитых и интенсивно развивающихся странах доля угля в выработке электроэнергии остается высокой. В США – 51.9 %; в Австралии – 75 %; в КНР – 78 %; в Индии – 77 %; в ЮАР – 92 %; в Польше – 94.7 %, в странах Евросоюза – 40...60 %. В Японии, где не добывается это сырье, с помощью угля вырабатывается 24.5 % электроэнергии. В России в настоящее время сложился явный энергетический дисбаланс с долей угля в выработке электроэнергии всего 18 %, несмотря на то, что Россия по-прежнему входит в группу ведущих государств мира по добыче этого полезного ископаемого [1].

Одной из важнейших задач, стоящей перед топливно-энергетическим комплексом России в XXI веке является возвращение угля в электрогенерацию, что повлечет, в частности, необходимость строительства новых угольных шахт, отвечающих современным рыночным условиям.

Сформулируем ряд очевидных требований, которые будут предъявляться к строительству и эксплуатации шахты нового технического уровня:

Максимально быстрый ввод горнодобывающего предприятия в эксплуатацию с минимально возможными затратами;

Максимальная концентрация горных работ с минимальными потерями полезного ископаемого;

Максимальный объем добычи с минимальными затратами энергии и ресурсов;

Максимальная производительность транспорта с минимальными плановыми и ремонтными остановками.

Таким образом, на оптимальное соотношение между максимумом полезных показателей

и минимумом негативных факторов будут направлены усилия проектировщиков, строителей и работников угольных предприятий.

Рассмотрим более подробно комплекс вертикального ствола, как один из основных объектов шахты, на сооружение которого приходится 20...25 % стоимости и 30...50 % общей продолжительности строительства комплекса подземных выработок современной шахты. В период функционирования предприятия ствол является основной транспортной и вентиляционной артерией, со сроком службы равным сроку эксплуатации всего горнодобывающего объекта.

Под комплексом вертикального ствола понимают систему оснащения на поверхности, непосредственно ствол с приствольными выработками, армировку и подъемное оборудование. Сюда же можно отнести и примыкающее шахтное поле.

Известно, что максимальные объемы потерь угля приходится на потери в околоствольных целиках, размеры которых находятся в зависимости от глубины заложения ствола, параметров деформирования и разрушения пород в пределах мульды сдвижения, угла падения и количества принятых к отработке пластов.

Так, например, только на шахтах Российского Донбасса в околоствольных целиках сконцентрировано около 60 млн. т угля, что не отвечает сформулированному выше требованию 2.

В этой связи проект строительства современного ствольного комплекса должен предусматривать возможность отработки этих запасов.

Выполненные исследования [2] позволили установить, что применение традиционных тех-

нологий для отработки околоствольных целиков на периоде строительства горного предприятия не представляются возможным и выявить целесообразность применения короткозабойных технологий.

На базе камерных, камерно-столбовых систем и систем короткими столбами разработаны принципиальные технологические схемы ведения очистных работ с пневматической закладкой выработанных пространств, адаптированные к комплексу околоствольных выработок и выработок главных направлений, позволяющие производить эффективную и безопасную отработку

околоствольных целиков в различных горно-геологических условиях при обеспечении безаварийной эксплуатации шахтных стволов.

Перейдем далее к проблемам строительства стволов. Анализ данных по ряду шахтных вертикальных стволов, проектирование и строительство которых осуществлялось в последние 10 лет в Российском и Украинском Донбассе показывает, что наметилась тенденция к увеличению глубины и диаметра сооружаемых стволов (табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры стволов

№ п/п	Название стола и горнодобывающего предприятия	Основной вид крепи	Диаметр, м	Глубина, м
1.	Шахта «Обуховская № 1» - главный - вспомогательный - вентиляционный	Монолитный бетон	7.0	904
			7.0	922.2
			6.0	919
2.	Шахта им. А.Ф. Засядько, Украина: - воздухоподающий № 2 - вентиляционный № 2 - вентиляционный № 3	Монолитный бетон	7.0	1265
			6.5	1022
			7.0	1222
3.	Шахта «Шахтерская – Глубокая» - скиповой ствол; - клетевой ствол	Монолитный бетон	8.0	1335.6
			8.0	1341

Увеличение глубины ствола обуславливается необходимостью вскрытия более глубоких пластов, а большой диаметр позволяет использовать высокопроизводительное подъемное оборудование, снизить затраты на вентиляцию горных выработок за счет меньшего аэродинамического сопротивления. Интересен в этой связи опыт ЮАР, где пройден значительный объем стволов диаметром 8...9 м, глубиной до 2 км и более. Стволы часто разделяют железобетонной перемычкой, что позволяет их использовать как для подачи, так и для выдачи воздушной струи [3].

В целом проходка стволов большого диаметра отвечает сформулированным требованиям 3 и 4, но противоречит первому пункту, так как с увеличением площади ствола возрастает трудоемкость работ по разработке и уборке породы, возведению крепи, рассечке приствольных выработок и армированию.

В настоящее время проходка стволов в нашей стране ведется по совмещенной технологической схеме, предусматривающей возведение монолитной бетонной крепи вслед за подвиганием забоя. Нормативная скорость

проходки стволов по этой схеме составляет 60 м/мес, скоростной считается сооружение в месяц 100 м ствола и более.

В бывшем СССР и России накоплен определенный опыт по скоростному сооружению стволов по совмещенной схеме, однако, как правило, на стволах среднего диаметра.

Отметим также, что при строительстве стволов большой площади наиболее сильно проявляются недостатки совмещенной технологии.

Во-первых, ухудшается геомеханическая обстановка в системе взаимодействия «крепь – массив».

Известно, что при упругой задаче между внешним давлением на крепь p и радиальными перемещениями массива u существует прямо пропорциональная зависимость:

$$p = B \cdot u,$$

где B – характеристика жесткости крепи.

В зоне влияния забоя перемещения могут быть найдены по формуле:

$$u = \alpha^* \cdot u_{\infty},$$

где u_{∞} – полные смещения стенок выработки; α^* – коэффициент, учитывающий отставание крепи от забоя, который может быть определен по эмпирической формуле Б. З. Амусина:

$$\alpha^* = \exp(-1.3l_0/r_0),$$

где l_0 – отставание крепи от забоя; r_0 – радиус

(или полупролет) сечения выработки в проходке.

Приняв величину нагрузки в сечении ствола радиусом 3 м за единицу, получим график роста давления на крепь по мере увеличения размеров сечения (рис. 1).

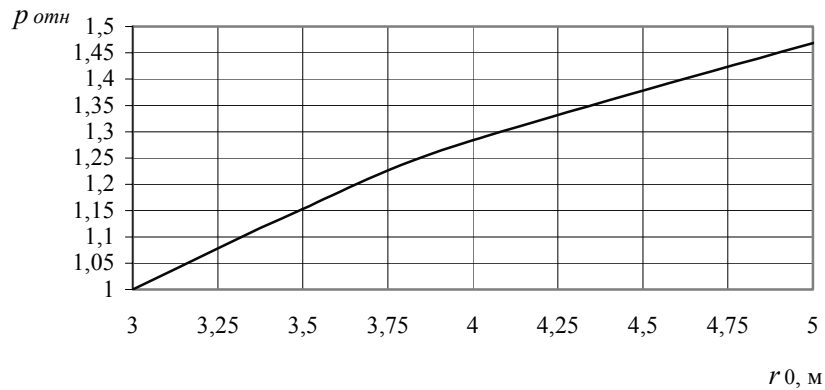


Рис. 1. Зависимость величины нагрузки на крепь от радиуса ствола

Во-вторых, увеличивается мощность взрывных работ, а, соответственно, и негативное воздействие энергии и продуктов взрывных работ на близко расположенную к забою твердеющую монолитную бетонную крепь.

В-третьих, с увеличением площади ствола возрастет перерасход бетона крепи, обусловленный несоответствием фактического сечения выработки проектному. Несоответствие возникает из-за сложности бурения оконтуривающих шпуров вблизи стенок ствола, так как в забое находится бетонная крепь и опалубка.

Увеличение скорости проходки также ведет к ухудшению работы крепи.

На рис. 2. представлены графики, полученные в результате математического моделирования, показывающие запас несущей способности ближайших к забою 7 заходов монолитной бе-

тонной крепи в призабойном пространстве ствола при продолжительности проходческого цикла 30 ч и 18 ч.

Данные исследований показывают, что при скоростной проходке по совмещенной схеме напряжения в крепи достигают критических значений сначала в ближайших к забою заходках из твердеющего бетона, а не в крепи проектной прочности, расположенной на протяженном участке ствола, расчет которой производится при разработке проекта.

Кроме этого интенсивное загрузление бетона в раннем возрасте может нарушить процесс естественного твердения бетона, привести к нарушению его структуры, развитию трещиноватости, что повлечет за собой снижение несущей способности и водонепроницаемости крепи, уменьшение ее долговечности.

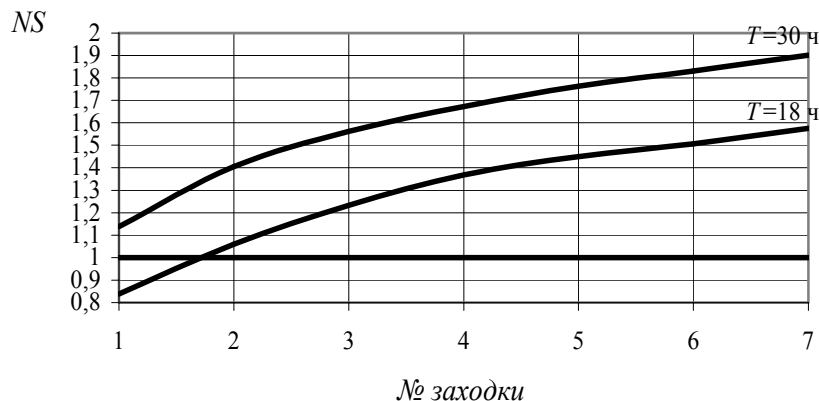


Рис. 2. Запас несущей способности монолитной бетонной крепи в призабойном пространстве ствола при различных способах проходки

Таким образом, повышение качества строительства ствола за счет увеличения скорости проходки влечет за собой снижение качества эксплуатации сооружения, во многом определяющееся долговечностью крепи. Соответственно, в противоречие входят пункты 1 и 4 сформулированных требований, так как ремонт крепи сопровождается остановкой подъема.

Передовой зарубежный опыт показывает, что более эффективной в глубоких стволах большого диаметра является параллельная схема.

В бывшем СССР в середине XX века применялось два варианта параллельной схемы:

1. Совмещение работ по выемке породы и возведению постоянной крепи достигается за счет применения временной крепи, устанавливаемой по мере подвигания забоя, промежуточного полка (натяжной рамы) и подвешенного полка, с которого заходками снизу вверх возводится постоянная крепь. Выемка породы и возведение постоянной крепи велись в разных направлениях.

2. Совмещение работ по выемке породы и возведению постоянной крепи достигается применением щитовой оболочки, многоярусного проходческого полка и передвижной опалубки с поддоном. Выемка породы из забоя и возведение постоянной крепи с подвешенного полка велись в направлении движения забоя. Эта схема получила название параллельно-щитовой.

Обе схемы вследствие ряда существенных недостатков были вытеснены совмещенной технологией. В то же время за рубежом в настоящее время широко применяется вариант параллельной схемы, предусматривающий совмещение работ по выемке породы в забое ствола и возведению постоянной крепи с многоярусного полка. Это обеспечивается применением временной анкерной крепи или за счет устойчивости боковых пород, позволяющим оставлять участок ствола протяженностью 15...25 м без постоянной крепи. Выемка породы из забоя и возведение постоянной крепи ведутся в направлении движения забоя.

Данная технология позволяет обеспечить стабильно высокие скорости проходки 150...180 м/мес и может быть адаптирована к российским условиям.

Основным отличием схемы должно стать использование многоярусного проходческого полка, на котором располагается все основное оборудование и подвешивается опалубка облегченного типа. Это позволит уменьшить чис-

ло лебедок на поверхности в 2.5...3 раза по сравнению с совмещенной схемой и снизить продолжительность периода оснащения ствола. Один из этажей полка будет выполнять функцию поддона опалубки благодаря специальной конструкции.

Изменится и концепция крепления ствола. В настоящее время крепление стволов осуществляют монолитной бетонной крепью толщиной 300...500 мм и основным подходом по повышению несущей способности крепи является увеличение ее толщины. В сложных условиях переходят на железобетонное, тубинговое или комбинированное крепление.

Сравнительный анализ способов повышения несущей способности крепи из бетона класса В15 толщиной 250 мм путем увеличения класса бетона, толщины крепи или установки упрочняющих анкеров в различных условиях показал, что при проектировании мер по повышению несущей способности монолитной бетонной крепи вертикальных стволов в первую очередь должна рассматриваться возможность увеличения класса бетона. Увеличение толщины крепи может быть рекомендовано только в слабых породах с модулем сдвига $G_0 < 2 \cdot 10^3$ МПа. В остальных случаях после исчерпания возможностей по варьированию прочности бетона целесообразно производить анкерное упрочнение породного массива.

Таким образом, технология крепления вертикальных стволов должна предусматривать установку упрочняющей анкерной крепи из забоя ствола с последующим возведением монолитной бетонной крепи с отставанием от забоя до 25 м. Толщина крепи принимается минимальной (250...300 мм) и увеличение ее несущей способности осуществляется за счет повышения класса бетона. Для ее возведения применяются жесткая быстротвердеющая бетонная смесь, спускаемая к месту укладки в контейнерах [4].

Анкерная крепь рассматривается не только как временная охранная конструкция, но и как часть постоянной крепи, выполняющая упрочняющую и регулятивную функцию. Эффективность упрочнения определяется величиной натяжения анкера, увеличивающегося после установки из забоя по мере деформирования породных стенок. На больших глубинах и в породах склонных к ползучести целесообразна установка анкерных систем с ограниченной податливостью, позволяющих обеспечить первоочередную разгрузку массива и увеличить область применения анкеров.

В большом диапазоне условий анкерная крепь может играть роль регулятивного элемента. В частности, выполнено обоснование целесообразности установки опережающей анкерной крепи при проходке ствола в зоне породного слоя со слабыми физико-механическими характеристиками мощностью до 5 м (рис. 3).

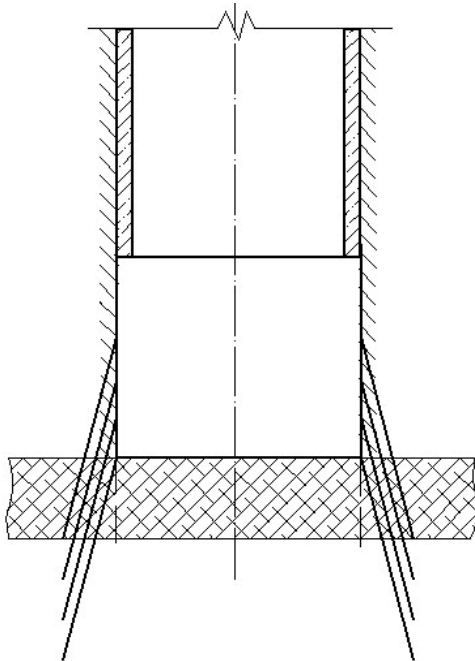


Рис. 3. Схема установки опережающей анкерной крепи

Необходимый коэффициент упрочнения в зоне влияния «слабого» слоя может быть найден из полученного в результате математического моделирования выражения

$$K_{\text{упр}} = \left(\begin{matrix} 0.013k_G^3 - 0.104k_G^2 + \\ + 0.295k_G + 1.064 \end{matrix} \right) \cdot m^{0.091},$$

где k_G – коэффициент, определяемый из выражения:

$$k_G = 0.1 \frac{G_0}{G_{\text{пл}}},$$

G_0 – модуль сдвига основного породного массива; $G_{\text{пл}}$ – модуль сдвига «слабого» слоя; m – мощность слабого слоя, м.

Особое внимание при проектировании крепи следует уделять сложным участкам ствола. Так, более 75 % нарушений крепи и армировки вертикальных стволов в Донбассе приходится на районы влияния приствольных выработок.

Применение параллельной схемы проходки на данных участках с использованием анкерных систем направленного действия позволит,

на наш взгляд, существенно повысить долговечность крепи ствола.

Большое значение при этом имеет последовательность выполнения работ и учет ее при проектировании. Так, сравнительные расчеты участка ствола с камерой загрузочных устройств при рассмотрении готового объекта и поэтапного сооружения с учетом образующихся после каждой стадии строительства зон возможного разрушения и ослабления пород показали значительную разницу в итоговой картине напряженно-деформированного состояния крепи и пород.

С учетом возможной выемки околоствольного шахтного поля необходимо тщательное, научно обоснованное проектирование крепи в зоне влияния очистных работ. Одним из возможных решений может стать применение конструкций крепи шарнирного типа, несвязанных с деформируемым массивом.

В областях влияния приствольных выработок и очистных работ целесообразен переход на армировку с увеличенным шагом. Разработанные решения предусматривают применение пространственных рамных конструкций, проводников с дополнительной опорной ветвью [5].

В целом требующееся при увеличении глубины стволов повышение интенсивности подъема повлечет за собой изменения в проектировании армировки.

Необходимым становится учет комплекса дополнительных воздействий на армировку, обусловленных сложным колебательным процессом при движении подъемного сосуда по вертикальному стволу.

К этим нагрузкам следует отнести статические постоянные нагрузки от собственного веса конструкций армировки, а также ряд кратковременных нагрузок, имеющих динамический характер: кориолисову силу, развивающуюся в процессе движения сосуда по шахтному стволу; аэродинамическую силу, возникающую в месте встречи подъемных сосудов; силу от крутящего момента, возникающего в канате под действием растягивающей нагрузки; вертикальные силы, возникающие вследствие неточности установки проводников в процессе строительно-монтажных работ или изменения первоначального положения проводников в процессе эксплуатации.

Таким образом, инновационный подход к проектированию современных вертикальных стволов должен базироваться на следующих основных положениях:

1. Рассмотрение вертикального ствола как комплекса взаимовлияющих элементов: системы оснащения на поверхности, ствола и приствольных выработок, армировки и подъемного оборудования, примыкающего шахтного поля.

2. Применение для проходки ствола прогрессивных технологических схем, предусматривающих крепление ствола высокопрочной бетонной крепью минимальной толщины, использование упрочняющей штанговой крепи и регулятивных анкерных систем направленного действия.

3. Проектирование крепи ствола с учетом рассмотрения всех стадий сооружения и эксплуатации стола, а также последовательности выполнения проходческих работ.

4. Проектирование крепи и армировки с учетом зон влияния приствольных выработок, очистных работ, ослабленных породных слоев и всего комплекса возможных нагрузок и воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. http://www.russia-today.ru/2006/no_24/24_selebration.htm.
2. Страданченко С. Г. Обоснование отработки околовствольных целиков короткими очистными забоями при сохранении безаварийной эксплуатации вертикальных шахтных стволов. Дис. докт. техн. наук. – Тула, 2003.
3. Новик Е. Б. Опыт сооружения вертикальных стволов в ЮАР / Е. Б. Новик, В. В. Левит, М. А. Ильяшов. – К.: Техніка, 2004. – 64 с.
4. Ягодкин Ф. И. Повышение технико-экономической эффективности и качества крепления вертикальных стволов // Научно-технические проблемы шахтного строительства. Сб. науч. тр. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т / Ф. И. Ягодкин, С. П. Сыркин. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. – С. 74-78.
5. Прокопов А. Ю. Новые решения в проектировании жесткой армировки вертикальных стволов / А. Ю. Прокопов, С. Г. Страданченко, М. С. Плешко. – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-кавказ. регион», 2005. – 216 с.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.

А. А. ТАРНОПОЛЬСКИЙ, М. М. РОТМИСТРОВСКИЙ (ПИ «Днепрпроектсталь-конструкция»), М. И. КАЗАКЕВИЧ (ДИИТ)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛЬНОЙ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВИСЯЧЕГО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ АММИАКОПРОВОДА ЧЕРЕЗ р. ДНЕПР ПРОЛЕТОМ 720 м

У статті представлені результати більш ніж тридцятирічного моніторингу за станом та дослідженням дійсної роботи металоконструкцій унікального висячого мостового переходу, зданого до експлуатації у 1978 р. Приводяться основні проблеми та складнощі, які були виявлені в процесі експлуатації споруди, а також авторські проектно-конструкторські рішення щодо їх усунення.

В статье представлены результаты более чем тридцатилетнего мониторинга за состоянием и исследованием реальной работы металлоконструкций уникального висячего мостового перехода, сданного в эксплуатацию в 1978 г. Приводятся основные проблемы и сложности, выявленные в процессе эксплуатации сооружения, а также авторские проектно-конструкторские решения по их ликвидации.

The results of more than 30-year monitoring and investigations of the real work state of exceptional suspended bridge steel structures made in 1978 are presented in the paper. The major problems and difficulties discovered in the process of the structure exploitation as well as authors' design approaches for their elimination are given here.

В 1978 г. сдан в эксплуатацию уникальный висячий мост через р. Днепр пролетом 720 м, предназначенный для пропуска аммиакопровода диаметром 335,6 мм и 4^х ниток сопутствующих коммуникаций в трубах 76 мм (рис. 1, 2).



Рис. 1. Общий вид моста



Рис. 2. Общий вид моста с пилона правого берега

Проект металлоконструкций моста разработан ЦНИИПСК г. Москва. Изготовлены металлоконструкции на Днепропетровском заводе им. Бабушкина. Монтаж металлоконструкций осуществлен трестом «Союзмонтажгаз».

Мост представляет собой висячую систему, основными элементами которой являются (рис. 3):

- две висячие вертикальные фермы пролетом 720 м, состоящие из несущих кабелей, раскосов

(наклонных подвесок) и решетчатой балки жесткости (рис. 4);

- два береговых пилона (рис. 5)

- двухъярусная горизонтальная ветровая система, состоящая из поясов и горизонтальных оттяжек.

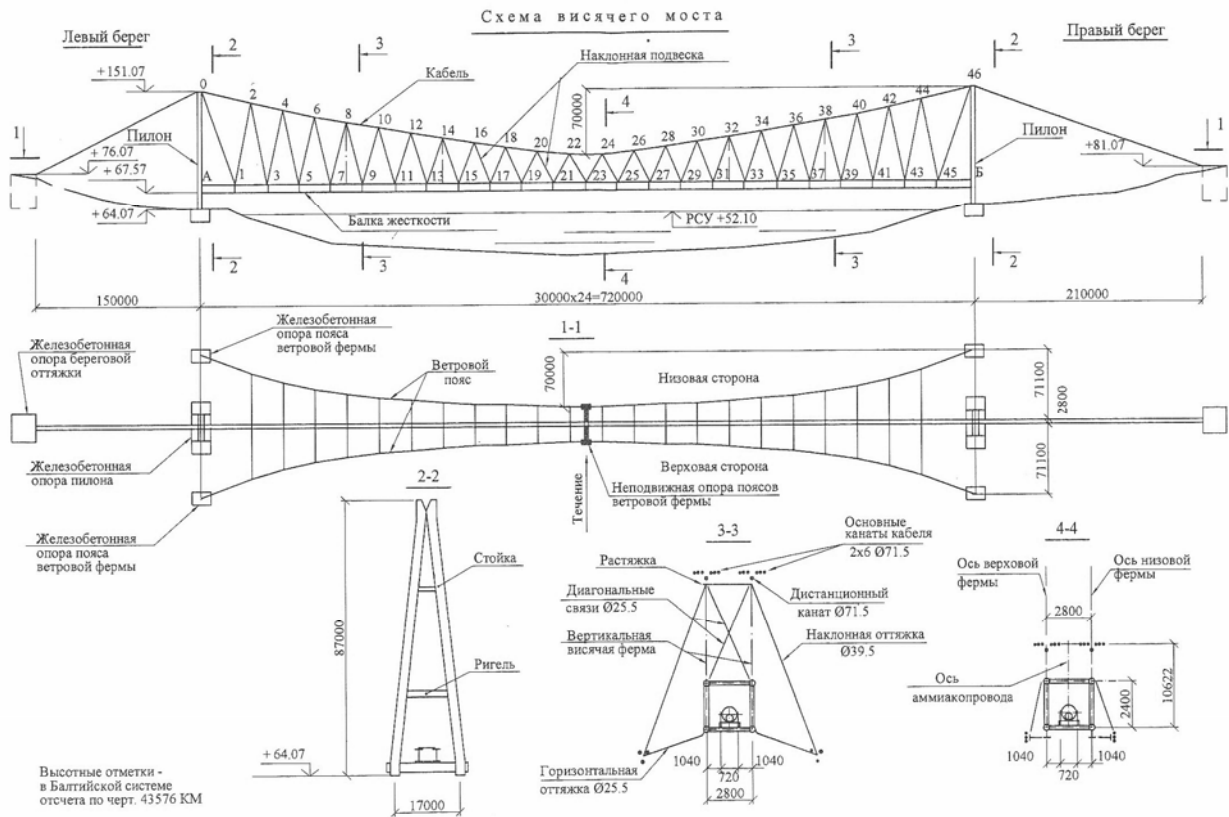


Рис. 3. Конструктивные элементы моста



Рис. 4. Общий вид моста. Верхний пояс и наклонные подвески висячих ферм, балка жесткости, пилон, ветровая ферма



Рис. 5. Пилон. Кабели и наклонные подвески висячих ферм

Вертикальные висячие фермы и горизонтальные ветровые фермы объединены в пространственную систему наклонными оттяжками, балкой жесткости и поперечными (в 4-х сечениях по длине моста) крестовыми связями и растяжками из канатных элементов (рис. 6).



Рис. 6. Наклонные подвески и балка жесткости

Висячие фермы с треугольной решеткой разбиты на 24 панели по 30 м каждая. Высота фермы в середине пролета 8,1 м, у пилона 84,1 м. Расстояние между фермами 2,8 м.

Верхний пояс каждой висячей фермы (несущий кабель) состоит из 6-ти основных канатов диаметром 71,5 мм и одного дистанционного каната. Кабели опираются на седловидные опоры пилонов и переходят в береговые оттяжки.

Раскосы (наклонные подвески) висячих ферм выполнены из одиночного каната диаметром 39,5 мм. Раскосы со стороны балки жесткости оканчиваются винтовыми стяжками для регулировки натяжения наклонных подвесок.

Балка жесткости представляет собой пространственную решетчатую конструкцию, состоящую из 2-х вертикальных ферм, верхние пояса которых соединены связевой фермой, и системы поперечных и продольных балок в уровне нижних поясов вертикальных ферм

(рис. 7). Продольный профиль балки жесткости выполнен по плавной кривой со строительным подъемом. В уровне нижнего пояса на поперечных балках через каждые 12 м установлены тороидальные роликовые опоры. На них опирается трубчатый кожух диаметром 530 мм, внутри которого помещен аммиакопровод.



Рис. 7. Общий вид балки жесткости

Балка жесткости в середине пролета жестко соединена с поясами ветровых ферм, а на обоих концах моста имеет продольно-подвижное опирание.

Ветровая система состоит из обращенных выпуклостями друг к другу параболических (в плане) ферм, пояса которых выполнены из 3-х стальных канатов диаметром 71,5 мм каждый. Пояса ферм соединены с балкой жесткости и с верхними узлами висячих ферм с помощью канатных оттяжек (рис. 8).

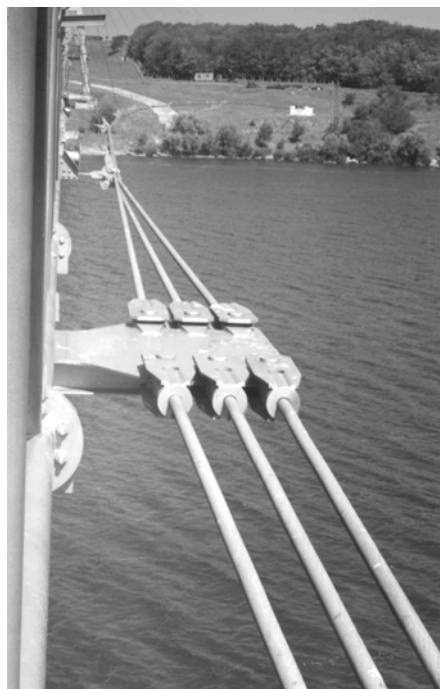


Рис. 8. Пояс ветровой фермы и средний узел крепления пояса к балке жесткости

Пилоны выполнены в виде рамы с наклонными стойками. Высота пилона 87 м, ширина 17 м. Стойки выполнены в виде пространственных элементов из 2-х сварных двутавров. Стойки связаны 2-мя промежуточными ригелями.

Узловые соединения несущего кабеля с наклонными подвесками выполнены посредством 2-х деталей, обжимающих канаты (по 3-и каната), соединенных стяжными высокопрочными болтами. К стяжным деталям крепятся фасонки подвесок (рис. 9). К фасонкам балки жесткости подвески крепятся при помощи винтовых стяжек.



Рис. 9. Узел верхнего пояса висячей фермы

В проекте моста пролетом 720 м через р. Днепр был учтен опыт строительства аналогичного моста пролетом 660 м через р. Амударью (пос. Келиф) и исследований, проведенных институтом «Днепрпроектстальконструкция» в части обеспечения аэродинамической устойчивости. В частности: объединены в общую пространственную систему вертикальные несущие фермы и ветровые фермы, балка жесткости выполнена из трубчатых стержней.

С момента ввода моста в эксплуатацию и до настоящего времени (около 30 лет) институт «Днепрпроектстальконструкция» ведет систематическое наблюдение и исследование действительной работы несущих металлических конструкций, узлов и соединений. В состав исследований входило: определение фактического состояния конструкций и напряженно-деформированного состояния элементов и моста в целом, измерение динамических параметров конструкций, натяжения элементов висячей системы (рис. 10), натяжения высокопрочных болтов (рис. 11).

На начальном этапе эксплуатации в процессе пусковых испытаний определялись действительные характеристики работы моста и их соответствие расчетным параметрам (руководители работ Казакевич М. И., Шульман З. А.).



Рис. 10. Измерение усилий в наклонных подвесках с помощью накладных динамометров



Рис. 11. Измерение усилий в высокопрочных болтах

Статические испытания от постоянной нагрузки (заполнение водой трубы) показали, что деформация моста в целом, максимальное напряжение в поясах балки жесткости, в пилоне и анкерной балке ниже или близки к расчетным. Усилия натяжения в канатных элементах также близки к расчетным. Остаточных прогибов не наблюдается. Замеренные частоты собственных колебаний составляли: в середине балки жесткости – в вертикальной плоскости 0,293 Гц, в горизонтальной плоскости 0,164 Гц; пилон (отметка 31,0 м) – вдоль моста 1,49 Гц.

В процессе дальнейшей эксплуатации моста (около 20 лет) параметры колебаний изменялись в ту или иную сторону в пределах до 2...6 % и оставались при этом близкими по значениям, принятым в проекте моста.

Замеренный в период пусковых испытаний логарифмический декремент затухания колебаний равен 0,065, что также близко к расчетному.

Установлено, что при изменении температуры на 1 °С прогиб в середине пролета изменяется на 21 мм (по расчету 20,7 мм).

Пусковые испытания подтвердили правильность принятых при проектировании расчетных предпосылок.

Проведенные спустя год после ввода в эксплуатацию наблюдения за скоростью и направлением ветра установили, что преобладающее направление ветра близко совпадает с осью русла р. Днепр в месте перехода.

Установлен неравномерный характер распределения ветровой нагрузки по длине моста. При этом усредненное значение скорости ветра близко к нормируемому. Испытания подтвердили доминирующее влияние реальной ветровой нагрузки на напряженно-деформированное состояние сооружения. Инструментальное аэродинамическое наблюдение в условиях естественного ветрового потока на основе изучения реакции сооружения и его отдельных элементов показали, что сооружение колеблется по одной или нескольким собственным частотам низших форм с максимальными амплитудами, не превосходящими следующих величин: для вертикальных колебаний 1/80000 длины пролета и для горизонтальных колебаний 1/50000 длины пролета. Столь низкие значения свидетельствуют об аэродинамической устойчивости сооружения в целом и его отдельных элементов.

После 5-ти годичной эксплуатации были выполнены визуальные и инструментальные исследования состояния несущих металлоконструкций, усилия натяжения канатных элементов и параметры колебаний. Исследования показали, что в целом элементы моста находятся в удовлетворительном состоянии: в большинстве канатов раскосной системы усилия натяжения находятся в пределах проектных значений и лишь в 4-х канатах усилия составили 3...3,5 т (проектные 4,0 т). Частоты колебаний в ветровом потоке практически не изменились. Впервые после пуска моста были измерены усилия натяжения высокопрочных болтов в 100 % узлов канатных элементов. Измерения показали в целом отсутствие падения начальных значений. Однако, в отдельных болтах (всего 8 шт.) было отмечено явление замедленного хрупкого разрушения (ЗХР), которое объясняется высокими значениями твердости ма-

териала болтов и недостаточной пластичностью. Там же впервые были обнаружены локальные повреждения антикоррозионного покрытия, в том числе цинкового покрытия канатов.

Исследования, проведенные еще через 5 лет, т.е. после 10-ти летней эксплуатации, показали, что основные параметры работы металлоконструкции: усилия в элементах вантовой системы, геометрические характеристики сооружения, динамические характеристики в ветровом потоке стабильны и практически не изменились. В дальнейшем в 1995 г. (немного менее 20-ти летней эксплуатации) было детально исследовано состояние и натяжение высокопрочных болтов практически во всех узловых соединениях: канатных элементов, в седле пилонов, во фланцевых соединениях элементов решетчатой фермы жесткости. Необходимость проверки натяжения высокопрочных болтов диктовалась, главным образом, следующими факторами: релаксация усилий и охрупчивание материала болтов. Отмеченное незначительное снижение усилий натяжения высокопрочных болтов в отдельных узлах за счет релаксации не снизили сдвигустойчивость соединений. Было рекомендовано произвести подтяжку всех болтов в жимках оголовков пилонов. Во фланцевых соединениях наблюдалось массовое повреждение герметизации соединений элементов фермы жесткости, а также во фрикционных соединениях на пилонах.

В 1997 г. с целью обеспечения надежности и безаварийности эксплуатации моста в институте «Днепрпроектсальконструкция» была разработана и согласована со службой эксплуатации программа, которой предусмотрены ежедневные осмотры службой эксплуатации, ежемесячные осмотры персоналом службы эксплуатации с привлечением специализированной организации, ежегодные контрольные измерения, а также специальные обследования, проводимые 1 раз в 3 года.

В 1999 г., т.е. спустя 20 лет после ввода в эксплуатацию, впервые было установлено падение натяжения на 18 % в 34-х наклонных подвесках, а это 1/3 общего количества подвесок вертикальной висячей фермы. Исключение из работы столь значительного количества подвесок (усилия натяжения меньше проектного 40 кН) могло привести к снижению аэродинамической устойчивости. При этом в 30 наклонных подвесках обнаружено, что практически исчерпана длина свободной резьбы винтовых стяжек. Это обстоятельство потребовало разра-

ботки и осуществления специальных устройств, которые бы обеспечили замену винтовых стяжек (об этой сложной процедуре остановимся ниже). Тревожный сигнал «прозвучал» в узлах крепления прижимных планок к несущему кабелю вертикальной фермы, где из-за отсутствия (рис. 12) герметизации было обнаружено коррозионное повреждение высокопрочных болтов. В результате была произведена замена всех скородированных высокопрочных болтов в узлах крепления поясов висячей и ветровой ферм с раскосами.

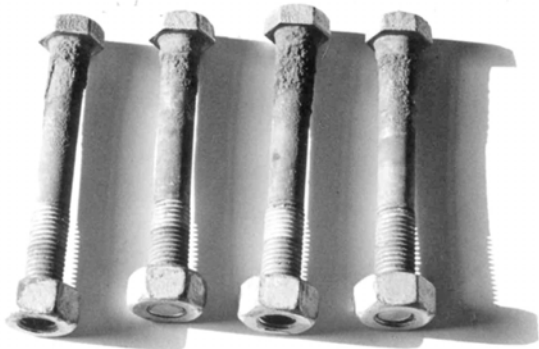


Рис. 12. Узел крепления наклонных подвесок к верхнему поясу висячей фермы. Коррозия болтов вследствие попадания воды в пространство между соединительными деталями узла

Как указывалось выше, замена винтовых стяжек и регулировка натяжения наклонных подвесок висячей фермы оказалось сложной технической задачей.

Для замены винтовых стяжек был разработан проект, изготовлены и устанавливались уникальные специальные временные приспособления, состоящие из инвентарных тяг для закрепления подвесок на период замены винтовых стяжек (рис. 13, 14). Проведенная в сложных условиях замена стяжек подтвердила работоспособность разработанного метода и конструкций временного приспособления.

Сложную инженерную задачу представляет собой разработка методики, которая позволит решить проблему регулировки усилий в подвесках висячих ферм, обеспечив при этом при наименьшем количестве «попыток» создания во всех подвесках одинаковых проектных усилий натяжения.

Расчеты конструкций, содержащих вантовые элементы (рис. 15), относятся к категории наиболее сложных геометрически нелинейных расчетов. Проблема состоит в том, что характеристики вантовых элементов могут меняться в широких пределах и настолько резко, что это требует создания специальных алгоритмов ре-

шения таких задач. Для такого решения задач в программном комплексе Selena (автор программы Бритвин Е. И., ДПСК) был разработан специальный алгоритм, позволяющий успешно находить решение не только для систем с натянутыми вантами, но и для конструкций с провисающим канатом и вантовыми системами. Решение реализовано в виде матрицы, представляющей собой изменение (приращение) усилия, возникающего в i -том элементе из-за изменения усилий в k -том элементе на 10 кН, изменение усилий соответствовало определенному углу поворота «штурвала», устанавливаемого на стяжном устройстве. В результате проведенной регулировки и замеров натяжения на всех 92-х подвесках усилия натяжения были одинаковыми, близкими к проектным значениям.

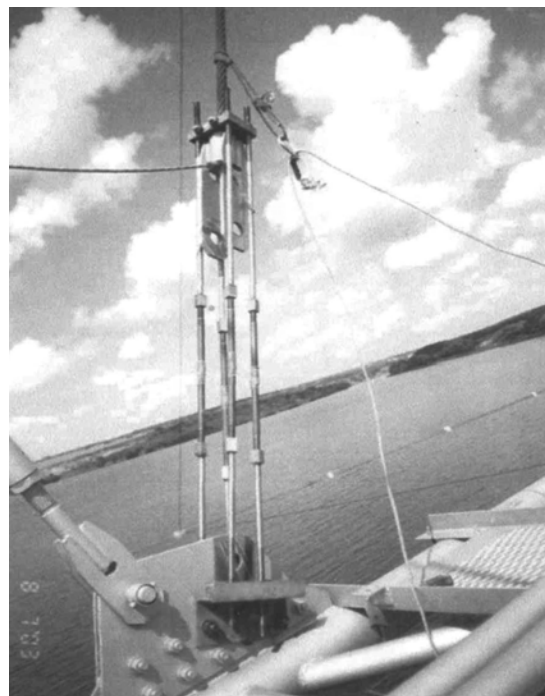


Рис. 13. Общий вид устройства для замены винтовых стяжек

Было также проведено поэтапное регулирование усилий в элементах ветровых ферм.

В процессе наблюдения за мостом из-за превышения на 10...60 % давления, были выявлены случаи разрушения текстолитовых роликов, на которые опирается аммиакопровод (всего по длине моста 73 опоры). Для обеспечения равномерного давления на катки по специально разработанной программе была выполнена достаточно сложная пооперационная регулировка катков за счет их вертикального перемещения при одновременном контроле фактических давлений на каток и вертикальном положении трубы. В результате регулировки

давление аммиакопровода на катки приближено к проектным значениям – 26...30 кН.

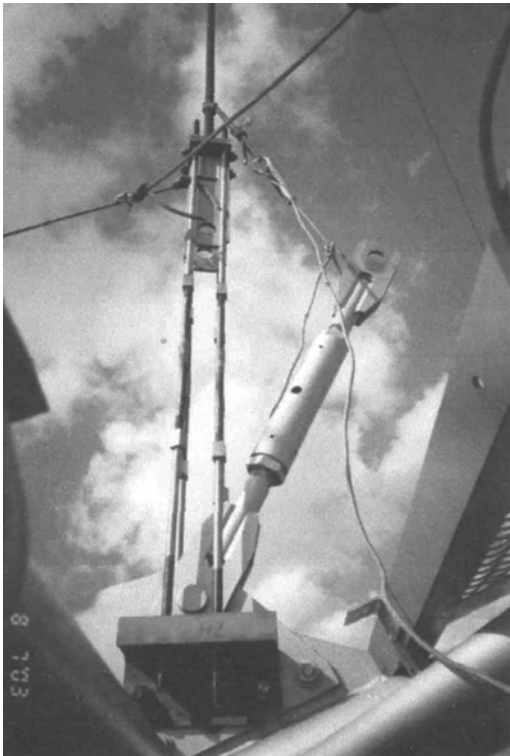


Рис. 14. Демонтаж винтовой стяжки

Выводы

Многолетние, около 30 лет, исследования действительной работы металлоконструкций уникального висячего моста под аммиакопровод пролетом 720 м показали, прежде всего, что, несмотря на наблюдавшееся в процессе эксплуатации некоторое падение усилий натяжений в наклонных подвесках и преднапряженных высокопрочных болтов, коррозионного повреждения канатов, конструкции моста подтвердили правильность проектных предпосылок, его работоспособность и живучесть в условиях реальных метеорологических воздействий.

Исследования доказали эффективность систематического визуального и инструментального наблюдения за состоянием конструкций и за всеми параметрами работы отдельных элементов и моста в целом.

Благодаря проводимым наблюдениям удалось своевременно выявлять дефекты и повреждения, устранять и предотвращать их дальнейшее развитие, а также вносить корректировки в основные параметры, обеспечивающие прочность и аэродинамическую устойчивость сооружения.

Есть уверенность в необходимости продолжения систематического наблюдения с целью принятия мер по обеспечению надежности и безаварийности эксплуатации моста.

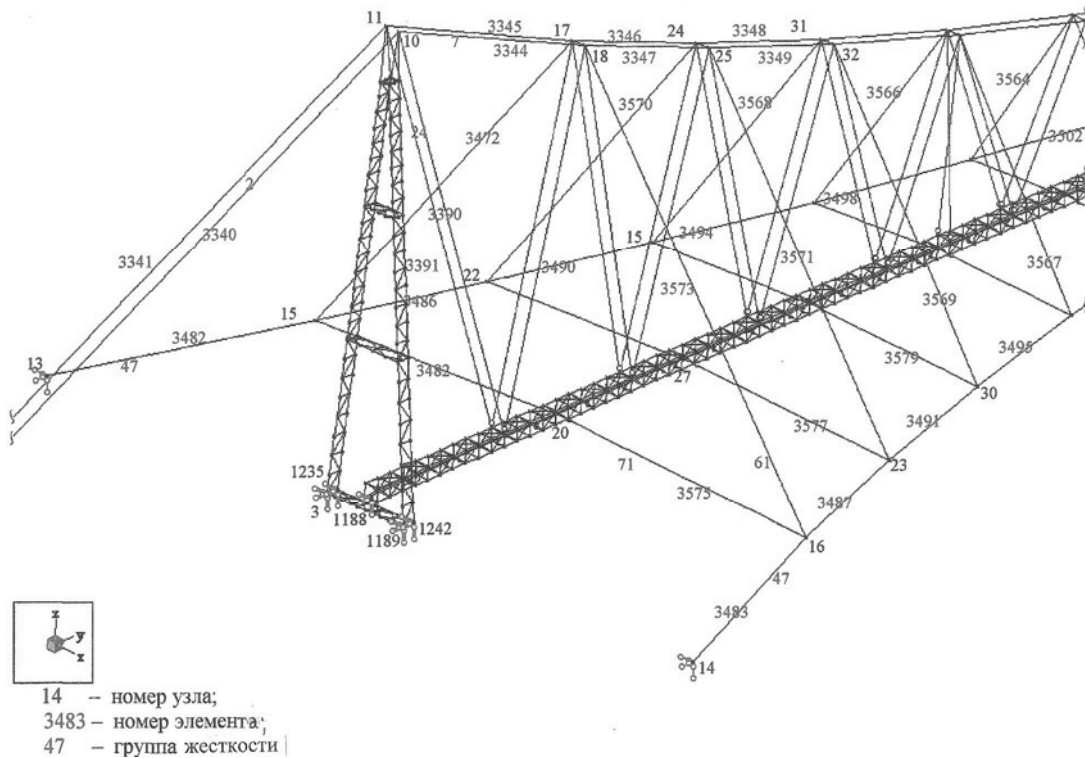


Рис. 15. Фрагмент расчетной схемы висячего моста

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казакевич М. И. О проверке аэродинамической устойчивости висячих мостов и переходов / М. И. Казакевич, М. М. Кравцов, В. Ю. Попов // Строительная механика и расчет сооружений, № 6. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 45-48.
2. Казакевич М. И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
3. Казакевич М. И. Методика натурных испытаний и длительных наблюдений висячих мостов и переходов / М. И. Казакевич, М. М. Кравцов, З. А. Шульман, Г. Н. Эйхе // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 207/24 / Под ред. акад. Н. Г. Бондаря. – Д., 1980. – С. 58-65.
4. Казакевич М. И. Определение критической скорости аэроупругой неустойчивости висячего перехода // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. – Д., 1982. – С. 48-55.
5. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
6. Шкловский Е. И. Натуральные испытания висячего трубопроводного моста через реку Днепр пролетом 720 м / Е. И. Шкловский, Ш. К. Вейцман, М. И. Казакевич и др. // В. сб.: Тр. ЦНИИПроектстальконструкция / Под ред. акад. Н. П. Мельникова. – М., 1980. – С. 81-88.
7. Казакевич М. М. Инструментальные наблюдения за работой вантовых трубопроводных мостов больших пролетов / М. М. Казакевич, Е. А. Нейман, З. А. Шульман, М. М. Кравцов // Экспериментальные исследования эксплуатационной надежности металлических конструкций зданий и сооружений: Сб. науч. тр. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1986. – С. 22-28.
8. Шульман З. А. Исследование поведения вантового моста пролетом 720 м через р. Днепр в естественном ветровом потоке / З. А. Шульман, Е. А. Нейман, М. И. Казакевич // Материалы совещания-семинара «Исследование, разработка и внедрение висячих систем в покрытиях и инженерных сооружениях». – К.: ЗНИИЭП, 1982. – С. 303-308.
9. Казакевич М. И. Реакция висячего перехода пролетом 720 м на реальное ветровое воздействие / М. И. Казакевич, А. С. Мякшин, Е. А. Нейман, Ю. С. Фрейдин, З. А. Шульман // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 214/25. – Д.: ДИИТ, 1982. – С. 45-56.
10. Шкловский Е. И. Натурные испытания висячего трубопроводного моста через реку Днепр пролетом 720 метров / Е. И. Шкловский, Ш. К. Вейцман, З. А. Шульман, А. А. Гордашников, М. И. Казакевич, М. М. Кравцов // Исследование и разработка по висячим и вантовым металлическим конструкциям: Тр. ЦНИИПроектстальконструкция. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1980. – С. 81-88.

Поступила в редколлегию 23.10.2007.

О. Л. ТЮТЬКІН (ДПТ)

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГЛИНИСТОГО ПОРОДНОГО МАСИВУ ЯК В'ЯЗКО-ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

В статті наведені теоретичні основи визначення напружено-деформованого стану глинистого породного масиву з позиції положень теорії в'язко-пружно-пластичного середовища.

В статье приведены теоретические основы определения напряженно-деформированного состояния глинистого массива с позиций теории вязко-упруго-пластической среды.

In the article the theoretical bases of determination of the stressed-and-strained state of clay massif from positions of the theory of viscous-elastic-plastic medium are presented.

Проблема, що розглядається в даній роботі, не відрізняється новизною теоретичних досліджень [1-20], але в той же час не одержала систематично оформленого виду теорії, як, втім, і достатньої практичної реалізації. Більшість теоретичних досліджень [1, 3, 5, 7, 14, 20] у даній області достатньо складно реалізувати у вигляді інженерних методик внаслідок крайньої заматематизованості, яка часто приховує чіткий фізичний зміст. Також ряд досліджень [3, 5, 10, 13, 20] через специфічні особливості математичного апарату відриває фізичне значення, оперуючи лише математичними абстракціями.

Перш ніж перейти до послідовних кроків рішення поставленої проблеми, слід висловити деякі передумови подальших теоретичних побудов.

1. Глинистий ґрунт породного масиву розглядається як в'язко-пружно-пластичне середовище внаслідок того, що всі середовища матеріального миру володіють трьома первинними реологічними властивостями [10, 13-17, 19]: в'язкістю, пружністю, пластичністю (перший постулат реології по Рейнеру [16]), але в різному ступені (другий постулат реології по Рейнеру [16]). Експериментальні дослідження ряду учених також свідчать, що глинисті ґрунти володіють пружністю (присутність деформацій, що відновлюються), пластичністю (наявність залишкових деформацій) і в'язкістю (розвиток деформацій в часі) [14, 15].

Складність подальших теоретичних побудов для дослідження в'язко-пружно-пластичного середовища полягає у тому, що сумісний опис її напружено-деформованого стану (НДС) у разі пластичних і реологічних явищ вважається неможливим [13, 15-17, 20].

2. Важливою передумовою є той факт, що

рішення даної проблеми для глинистого ґрунту реалізується лише для випадку його неводонасиченого стану, тобто всі процеси первинної консолідації завершені [15]. Дана передумова обмежує існування рішення проблеми тільки випадком повзучості/релаксації (випадок вторинної фільтраційної консолідації) [15], оскільки рішення впливу чинника часу на два процеси, що відбуваються одночасно, – дія води, що віджимается, у разі первинної консолідації, і деформація структури ґрунту у разі фільтраційної консолідації – дуже складне в описовому і математичному плані. Проте, випадок неводонасичених ґрунтів глинистих формацій з природною вологістю можливо вважати найпоширенішим, оскільки цим ґрунтам властиві водотривкі властивості [2].

3. Важливою концептуальною передумовою є розділення залишкових деформацій на пластичні і в'язкі. Ця передумова знімає складність в операції з цими типами деформацій, яку відзначав П. Пежина [13], тим паче, що таке розділення не є штучним. Розділення деформацій можливе через причину, що їх викликає. Пластичні деформації є залишковими, виникаючими після перетину напруженнями межі пружності [1, 2, 15], в'язкі залишкові деформації виникають при будь-якому рівні напружень, і їх причиною є чинник часу (третій постулат реології по Рейнеру [15]). Слід зазначити, що акцентування автором уваги на таких загальних місцях не є тривіальним теоретизуванням, а має задачею визначити фундамент подальших побудов, які хоча і будуть оригінальними побудовами автора, базуються на фундаментальних поняттях механіки суцільного середовища.

Також слід привести в даному обговоренні, що останнім часом розвиток реології загалом і

теорії повзучості зокрема (наприклад, теорія ковзання Батдорфа–Будянського [6, 20]), дозволила деяким дослідникам описувати і пластичну, і в'язку (деформація повзучості) деформації одними і тими ж рівняннями [20], мотивуючи це тим, що у даних типів деформацій однаковий характер, а саме – залишковий. Таке мотивування використовуваних рівнянь виходить з того, що теорія ковзання спирається на фізичні уявлення в той час, як більшість теорій повзучості феноменологічні, тобто базуються на принципі «чорного ящика» [2, 8, 10, 11, 13, 15]. Але теорія ковзання не отримала широкого розвитку з причини несистематизованого підходу до процесу деформації.

Ще одним доводом для розділення в'язких і пластичних деформацій є те, що однакове слідство їх характеру (залишковість) ще не доводить одну і ту ж причину, оскільки відомо, що вони різні. Також, П. Пежина підкреслює, що використовуючи підходи реології, слід обмежитися тими станами, які не викликають пластичну течію, а використовуючи методи теорії пластичності виключити з цих процесів явища повзучості і релаксації [13]. Протилежне формою, але що однозначно свідчить про користь розділення деформацій, висловлене в роботах С. С. Вялова [14] і Ю. К. Зарецького [5]: запропоновані ними концепції повзучості і в'язко-пластичної течії ґрунтів дозволили на теоретичному рівні достатньо чітко описати НДС глинистих ґрунтів.

4. Останньою передумовою подальшого рішення проблеми НДС глинистих ґрунтів як в'язко-пружно-пластичного середовища є феноменологічний підхід. Поза сумнівом, критика цього підходу з позицій фізичних уявлень про природу деформації, заслужена і дозволяє розширити рамки уявлень про неї. Але застосування фізичного підходу не завжди приводить до достовірних результатів, оскільки строгість побудов даного підходу часто перекреслюється неточністю проведених експериментів. Останній вислів дещо парадоксальний, оскільки не зменшує важливості фізичного підходу, в той же час свідчить про відсутність таких точних результатів. Дане питання відноситься більше до проблеми співвідношення трудомісткості і математичної складності вживаного методу і точності результатів, а точніше необхідності точності. Дещо спрощеним доводом може бути і те, що варіація результатів експериментального дослідження ґрунтів в 20 % вважається нормальною [2, 8, 15], таким чином, і застосування грубішого, по відношенню до фізичного, фено-

менологічного підходу є обґрунтованим.

Висловивши деякі передумови дослідження представленої проблеми, слід зазначити, що застосування феноменологічного підходу дозволяє ввести автору нові оригінальні прийоми до її рішення. Як і фізичний, так і феноменологічний підходи прагнуть до отримання аналітичних, а в ідеалі – замкнених рішень. Але одержані рішення, претендуючи на універсальність, універсальними не є, що відображається в їх критиці (наприклад, критика чотирьох теорій повзучості в роботах С. С. Вялова [14] і Ю. М. Работнова [15]). Тому автор, розуміючи, що створення універсальної теорії в'язко-пружно-пластичного середовища неможливе, про що свідчить наявність великої кількості теорій і взагалі несистематизованого підходу до неї, вважає, що можливим рішенням буде розробка несуперечливої системи закономірностей і понять у кожному конкретному випадку.

Природно, основним недоліком даного підходу є наперед запропонована відмова від універсальних закономірностей, але перевагою є конкретний підхід до кожного випадку. Даний підхід явно феноменологічний, але пропонує не надбудувати над експериментальними даними окремих теорій (як це робиться, наприклад, в теоріях старіння, течії і зміцнення [6, 7, 15, 16]), а користуватися цими результатами як первинною інформацією для отримання несуперечливої моделі ґрунту, не пов'язаної з додатковими розробками. Тобто з ланцюжка феноменологічного підходу «експериментальні дані – розробка теорії – застосування теорії в подібному випадку» виключається друга ланка, і вона виглядає так – «експериментальні дані – модель поведінки на їх основі». Конкретність даного авторського підходу дозволяє проводити практично ті ж побудови, що і раніше запропоновані, але в ньому відсутня трудомістка робота з приведення результатів до існуючих теорій, пов'язана з введенням додаткових гіпотез і спрощень.

Переходячи від загальних передумов, слід висловити закономірності поведінки глинистих ґрунтів, як в'язко-пружно-пластичного тіла:

1. При рівні напружень нижче за межу пружності σ_e деформації є пружними, повністю зворотними.

Слід уточнити, що ґрунтам властиві і миттєві пластичні деформації (рис. 1), пов'язані із закриттям мікротріщин і дефектів (на відрізку OA), але їх значення в порівнянні з пружними деформаціями настільки малі, що ними можна нехтувати.

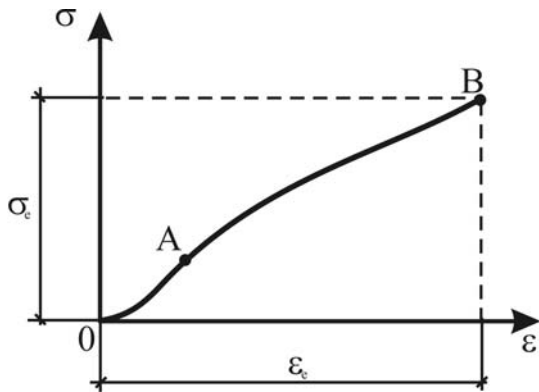


Рис. 1. Графік пружної деформації глинистого ґрунту

2. При рівні напружень вище за межу пружності σ_e деформації стають пластичними і носять нереверсивний (залишковий) характер (рис. 2., відрізок BC).

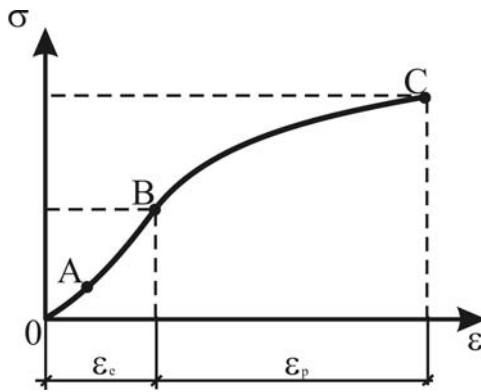


Рис. 2. Графік пружно-пластичної деформації глинистого ґрунту без розвантаження

У точці С відбувається руйнування ґрунту. З'ясувати величину пластичних залишкових деформацій можна експериментальним методом розвантаження, тобто довівши зразок до точки С, слід його розвантажити: пружні деформації ϵ_e відновляться, а пластичні деформації ϵ_p залишаться (рис. 3).

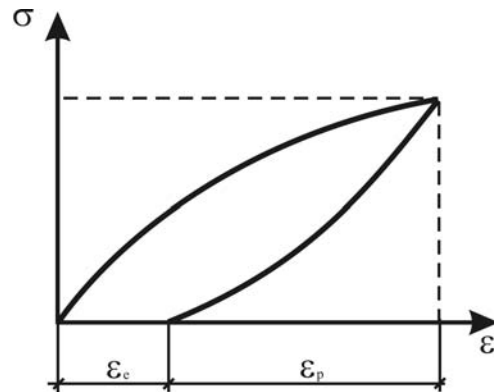


Рис. 3. Графік пружно-пластичної деформації глинистого ґрунту з розвантаженням

Перші дві закономірності поведінки глинистих ґрунтів одержані з умови швидкого завантаження, тобто процес деформації вважається незалежним від часу, і в'язкі деформації відсутні. Неоднозначність в деформації з'являється у разі повільного завантаження, коли вплив в'язкості починається виявлятися достатньо. Неоднозначність пов'язана з тим, що реологічні властивості діляться на дві категорії: склерономне (пружність і пластичність), не залежні від часу, і реономне (в'язкість) – від нього залежне [15]. Відповідно, слід зробити вибір між декількома існуючими для опису цих явищ теорій, положення яких часто суперечать одне одному.

3. При повільних завантаженнях, а, точніше, при завантаженні з постійним значенням напруження розвивається явище реології повзучості: $\sigma = const, \epsilon \rightarrow \infty$. Експериментальні дані цього процесу часто відображаються у вигляді сімейства кривих повзучості, побудованих для постійних напружень σ , рівних часткам руйнуючого напруження при швидкому завантаженні σ_p (рис. 4.).

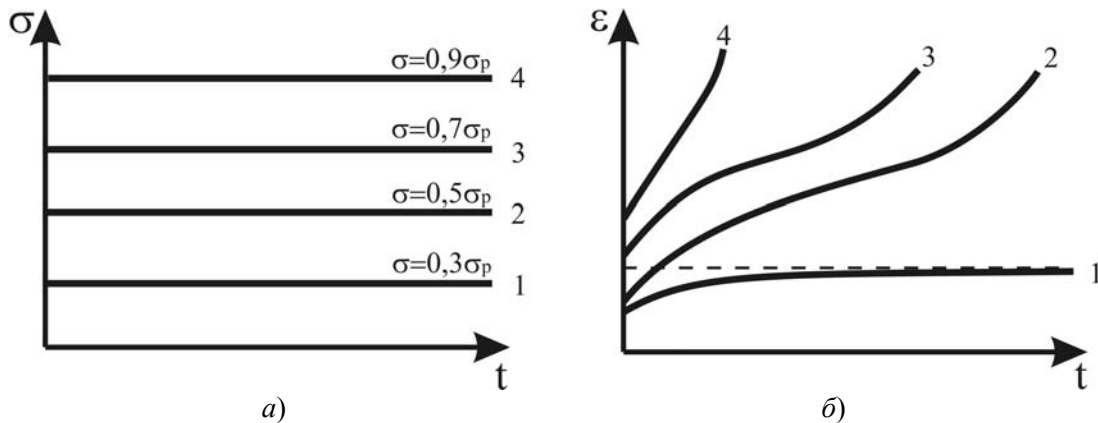


Рис. 4. Сімейство кривих повзучості: а) залежність $\sigma - t$; б) залежність $\epsilon - t$

Як видно з рис. 4, б, криві 1 і 2 подібні одна одній, крива 3 вже не подібна їм, а крива 4 різко відрізняється від них. Дана відмінність свідчить про різний характер деформації, що буде

розглянуто нижче.

Якщо провести експеримент з розвантаженням, то можна спостерігати картину післядії (рис. 5).

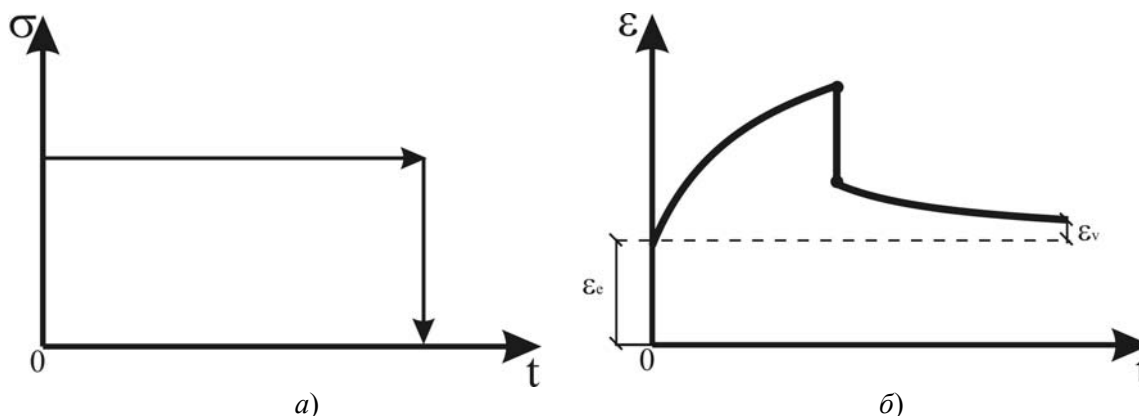


Рис. 5. Графік післядії в експерименті з розвантаженням: а) характер навантаження; б) розвиток деформації післядії

Приєм розвантаження свідчить про можливість застосування принципу суперпозиції деформацій, тобто доводиться їх взаємно невпливаючий характер. Таким чином, підтверджуючи відмінність в'язких і пластичних деформацій, можна дійти значного висновку: пружність, пластичність і в'язкість – взаємно невпливаючі властивості тіла або середовища. Звідси виходить можливість застосування принципу суперпозиції деформацій або, як він називався раніше [14, 17], «принцип накладення деформацій». У подальших теоретичних побудовах для ухвалення принципу суперпозиції достатньо прийняти взаємну незалежність деформацій, викликаних окремою реологічною властивістю.

Принцип накладення деформацій, запропонований академіком П. А. Ребіндером [17], доводить можливість розділення типів деформацій і той факт, що компоненти загальної деформації повністю зберігають свої значення в перебігу всього часу деформації і можуть бути розділені після розвантаження. Цей важливий концептуально принцип критикувався академіком Ю. Н. Работновим [14], який ним розумівся не як постулат деформації середовища в часі і під навантаженням, а лише як принцип, що спрощує обчислення в практичних розрахунках. Але критика Ю. Н. Работнова базувалася на розгляді результатів експериментів на повзучість сталі, що знаходиться при високій температурі, або деяких полімерів у високоеластичному стані [14]. З цього виходить, що принцип накладення деформацій (або їх суперпозиції) достатньо обґрунтований в широкій області деформації середовищ.

Відповідно, яке-небудь конкретне значення деформацій складається з трьох компонент:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^v + \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad (1)$$

де ε_{ij} – загальний тензор деформацій; ε_{ij}^v , ε_{ij}^e , ε_{ij}^p – в'язкий, пружний і пластичний компоненти загального тензора, відповідно.

Слід зазначити, що скрізь, де вживається термін «в'язко-пружно-пластичне середовище» в авторській інтерпретації і із збереженням написання (з дефісами), мається на увазі середовище з незалежними одна від одної реологічними властивостями (в'язкість, пружність і пластичність).

З цим записом формули (1), який прозоро і однозначно інтерпретує деформований стан в'язко-пружно-пластичного тіла, в ґрунтовній оглядовій роботі полемізує П. Пежина [13]. У теорії в'язкопластичності слід розрізняти в'язкопружно-в'язкопластичне (у П. Пежини – elastic-viscoplastic) і пружно-в'язко-пластичні (у П. Пежини – elastic/viscoplastic) середовища. У першій в'язкість виявляється в пружній і пластичній областях навантаження, у другій – тільки в пластичній. Основною проблемою першого середовища є встановлення критерію переходу середовища з в'язкопружного у в'язкопластичний стан [13], друге середовище математично описується набагато простіше з використанням узагальненої моделі Максвелла або її модернізацій В. В. Соколовського і Молверна. У зв'язку з цим в радянській літературі навіть з'явився постулат Пежина [13]: в'язкість виявляється себе в процесі деформації тільки в області пластичного навантаження.

Поза сумнівом, застосування пружно-в'язко-пластичної моделі усуває проблему пошуку критерію переходу з в'язкопружного у в'язкопластичний стан, описаний Нахді і Мерчем [13], оскільки початкова умова текучості залишається такою ж, як і в теорії пластичності. Задача зводиться до відшукання змін поверхні текучості, на яку впливає в'язкість. Але, користуючись принципом суперпозиції деформацій і його окремим слідством про взаємну незалежність компонент деформацій, можна засумніватися в зміні пластичних властивостей середовища, а саме зміни поверхні текучості за рахунок в'язкості. Застосування принципу суперпозиції і рівняння (1) дає можливість створення несуперечливого теоретичного опису в'язкопружно-пластичного середовища, яким є глинистий ґрунт.

Рівняння (1) є тим «розумним обмеженням» Друккера, яке дозволяє однозначний опис в'язких і пластичних властивостей середовища [6, 7, 13, 19] (для в'язкопружно-в'язкопластичного середовища таким обмеженням є постулат Друккера про позитивну роботу зовнішніх сил). Але дане питання відрізняється неоднозначністю, оскільки деякі автори відзначають зміцнюючу дію процесу повзучості на пластичну деформацію, якщо вона відбувається після нього [20]. Дане питання слід аналізувати, як представляється автору, не з позиції зміни поверхні текучості і, відповідно, процесу пластичної деформації, за рахунок в'язкості, а з позиції зміни структури середовища в процесі повзучості. Дійсно відомо, що повзучість, викликана навантаженням менше межі пружності σ_e або рівним йому (повзучість з постійною швидкістю) перебудовує структуру глинистого ґрунту за рахунок взаємодії пружних і в'язких коагуляційних зв'язків, зміцнюючи її, що доводилося в авторських експериментах [11, 12]. Поза сумнівом, пластична деформація, що відбулася після деякого часу процесу повзучості, відрізнятиметься від такої ж деформації, не залежної від часу (у разі швидкого навантаження). Але з цього не виходить, що в'язкість якимсь чином змінила межу текучості і пластичну деформацію в цілому.

Розглянуті положення НДС глинистого ґрунту як в'язко-пружно-пластичного середовища явно феноменологічні, оскільки оперують макропараметрами, такими як напруження, деформація і час. Розгляд деформації з фізичної точки зору, тобто оперування мікропараметрами, такими як зміна густини, накопичення дефектів, деформації внутрішніх зв'язків, значно

ускладнює дослідження процесу. Це обумовлено конкретним характером одержуваних результатів, які неможливо розповсюдити на інші випадки деформації, оскільки поведінка глинистих ґрунтів відрізняється великою різноманітністю. Відомо, що структура глинистих формацій володіє проміжними властивостями між коагуляційними (в'язкі зв'язки) [2, 4] і конденсаційними (крихкі зв'язки) [4, 15] структурами. Як з'ясовано М. Н. Гольдштейном [2], до ґрунтів можна застосовувати підхід, як до твердих тіл, розглядаючи реологічні явища як фізичний процес накопичення дефектів (субмікротріщин), але практична реалізація цього підходу значно ускладнена. Розгляд процесу повзучості, як процесу, обмеженого деформацією у межах домежевого стану, може вважатися вірним, оскільки розслаблення саме в'язких зв'язків в часі є його причиною. В той же час процес пружно-пластичної деформації пов'язаний з руйнуванням крихких зв'язків і перебудовою структури.

Слід також відзначити, що представлені вище міркування про природу зв'язків в деякій мірі умовні, оскільки ряд зв'язків має проміжний характер, залежний від виду напруженого стану. Наприклад, у разі триосного стиснення часто не відбувається руйнування у вигляді сколювання в разі пружно-пластичної деформації, що свідчить про включення в'язких або проміжних зв'язків в процес деформації. Таким чином, ще раз підкреслюється неоднозначність фізичного підходу в порівнянні з феноменологічним.

Таким чином, основним висновком вищевикладеного є наступне:

1. Компоненти в'язких, пружних і пластичних деформацій є взаємно незалежними і до них можна застосовувати принцип суперпозиції і накладення.

2. Для теоретичних вирішень проблеми НДС глинистого ґрунту, як в'язко-пружно-пластичного середовища слід прийняти авторський феноменологічний підхід, що полягає у відшуванні конкретних закономірностей, а точніше моделі поведінки ґрунту, яку практично можна реалізувати за допомогою набору нескладних експериментальних досліджень.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Глушко В. Т. Реология горного массива / В. Т. Глушко, В. П. Чердиченко, Б. С. Усатенко. – К.: Наук. думка, 1981. – 172 с.
2. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. Напряженно-деформативные и прочност-

- ные характеристики. – М.: Стройиздат, 1973. – 304 с.
3. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и её приложения. – М.: Наука, 1964. – 405 с.
 4. Жихович В. В. Практическая реология грунтов / В. В. Жихович, Ю. А. Жихович. – Одесса: Астропринт, 2001. – 176 с.
 5. Зарецкий Ю. К. Новая концепция вязкопластического течения грунтов // Тр. Третьего Всесоюзн. симп. по реологии грунтов, Ленинград, 3-8 сентября 1979. – Ереван: Изд-во Ереванского ун-та, 1980. – С. 58-73.
 6. Качанов Л. М. Теория ползучести. – М.: Физматгиз, 1960. – 455 с.
 7. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация. – М.: Высш. школа, 1976. – 277 с.
 8. Маслов Н. Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1984. – 176 с.
 9. Месчан С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М.: Недра, 1985. – 342 с.
 10. Мизюмский В. А. Закономерности деформирования глинистых пород с естественной структурой // В сб. межвуз. тр. «Вопросы геотехники», № 7. – Д.: ДИИТ, 1964. – С. 32-43.
 11. Петренко В. Д. Анализ реологических явлений вокруг выработки кругового очертания / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин // Зб. наук. пр. «Будівництво» – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2002. – Вип. 11. – С. 33-37.
 12. Петренко В. Д. Реализация свойств упруго-вязко-пластического массива с помощью «грунтовых» элементов / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, Т. А. Селихова // Міжвід. зб. наук. пр. «Геотехнічна механіка». – Д.: Ін-т геотехнічної механіки НАН України, 2004. – Вип. 50. – С. 270-277.
 13. Пэжина П. Основные вопросы вязкопластичности. – М.: Мир, 1968. – 176 с.
 14. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
 15. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.
 16. Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
 17. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. – М.: Знание, 1958. – Серия IV, № 39, 40. – 64 с.
 18. Zahorski S. Small additional deformation in non-linear viscoelasticity // Bull Acad. pol. sci. Ser. sci. techn. – 1966. – Vol. 14, № 1. – P. 17-22.
 19. Biot M. A. Mechanics of Incremental Deformation. – N-Y.: John Wiley and Sons, 1965. – P. 506.
 20. Русинко Н. К. Теория пластичности и неустановившейся ползучести. – Львов: Изд-во при Львовском ун-те «Вища школа», 1981. – 148 с.

Надійшла до редколегії 01.04.2008.

УТОЧНЕННЫЙ КРИТЕРИЙ ПИСАРЕНКО-ЛЕБЕДЕВА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Приводиться уточнений вариант критерію Писаренко-Лебедева для оцінки граничного напруженого стану матеріалів будівельних конструкцій, складеного з урахуванням максимальних залишкових розтягуючих напружень, які діють в локалізованій зоні.

Приводиться уточненный вариант критерия Писаренко-Лебедева для оценки предельного напряженного состояния материалов строительных конструкций, составленного с учетом максимальных остаточных растягивающих напряжений, действующих в локализованной зоне.

The improved variant of Pisarenko-Lebedev criterion for estimation of a stress limit state for materials of building structures is presented. It has been obtained with taking into account the maximal residual tensile stresses acting in a localized zone.

Конструктивные элементы (КЭ) зданий и сооружения, получившие в процессе эксплуатации сверхнормативный крен, могут быть выполнены как из металлических, так и неметаллических материалов. Поэтому разработка обобщенного критерия оценки предельного состояния КЭ является сложной и актуальной проблемой. Без объективной оценки напряженного состояния (НС) зданий и сооружений, получивших сверхнормативные крены, и их КЭ невозможно выбрать оптимальный способ восстановления их плано-высотного положения, разработать алгоритм управления технологическим процессом на основе определения остаточного эксплуатационного ресурса зданий, а также провести оценку эксплуатационного ресурса сооружений после их восстановления.

Одним из направлений решения указанной проблемы может быть разработка способа применения известных обобщенных критериев для оценки НС зданий, сооружений и их КЭ, что, безусловно, требует повышения достоверности контроля НС конструктивных элементов известными обобщенными критериями, например на основе дополнительных исследований физических взаимосвязей между основными физико-механическими параметрами, входящими в уравнение обобщенных критериев. Из известных обобщенных критериев наиболее полно структура их построения представлена в критерии Писаренко-Лебедева [1]. Возможности этого критерия и анализ взаимосвязи его основных физических параметров рассмотрим с учетом следующих ограничений, допущений, известных физических закономерностей, использованных в обобщенном критерии, а также с учетом известных технических средств для практической реализации критерия и эксперимен-

тального его исследования при оценке НС материалов КЭ на примере изготовления их из металлических материалов:

1. Рассматривается наиболее характерный случай плоского напряженного состояния /ЛНС/ КЭ сооружений.

2. Разрушение материалов КЭ происходит на ниспадающем участке полной диаграммы деформирования, то есть в области за пределом прочности материалов КЭ (рис.1) [2].

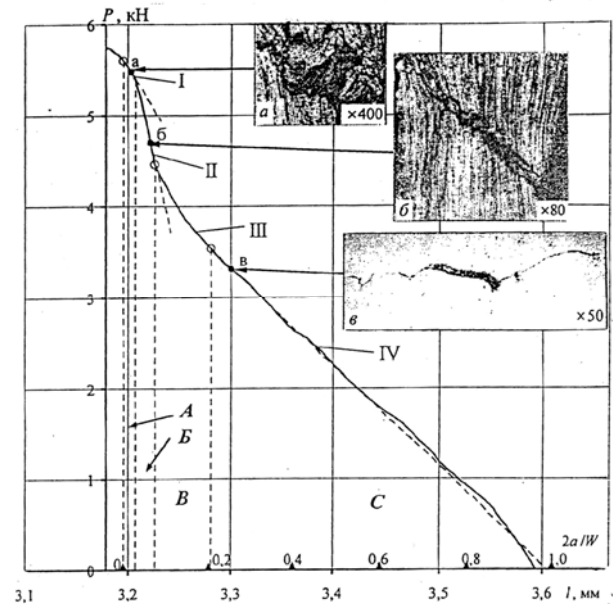


Рис.1. Характер ниспадающего участка полной диаграммы деформирования $P = \varphi(\Delta l)$ для углеродистой стали

На рис. 1 приняты следующие обозначения: P – растягивающая нагрузка; Δl – удлинение образца; W , a – соответственно ширина плоского образца и длина моделируемой в нем тре-

щины. I, II, III, IV – соответственно участки возникновения вязкой трещины в образце, выхода макротрещины на поверхность образца, переориентации макротрещины и участок продвижения макротрещины по широкой стороне образца.

3. В качестве допустимого напряжения принимается предел прочности σ_B материала КЭ, а в качестве предельного напряжения σ_{II} принимается напряжение, соответствующее выходу макротрещин на поверхность материала КЭ (участок II на рис. 1) [2].

4. За допустимую величину напряжения принимается предел прочности материала строительной конструкции.

5. В формировании НС материалов КЭ участвуют как касательные τ , так и нормальные σ напряжения.

6. Возникновение макротрещин происходит в локализованном объеме материала, в котором действуют растягивающие ориентированные остаточные механические напряжения σ_{oc} и напряжения σ_1 от внешних нагрузок [3].

7. Анализ структуры обобщенного параметра критерия и физическая связь между параметрами, входящими в его структуру, проводится на примере использования критерия для оценки НДС магнитоэластичной углеродистой стали, типа Ст. 3.

8. Принимается, что процесс разрыхления «х» происходит в условиях действия сдвиговых деформаций в различных плоскостях скольжения [4] (рис. 2).

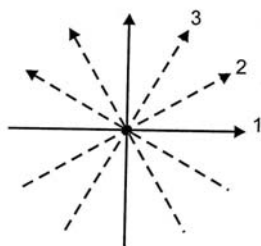


Рис. 2. Система скольжения «плоского кристалла»: 1, 2, 3 – плоскости скольжения

9. Распределение остаточных напряжений σ_{oc} в материале КЭ происходит по закону негармонических колебаний с разной амплитудой, при этом изменения величины информационного сигнала от остаточных напряжений происходит на уровне информационного сигнала, определяемого исходными структурным и дефектным состоянием материала КЭ [5, 6].

10. При проведении экспериментальных исследований взаимосвязи параметров, определяющих структуру обобщенного критерия, используется стенд (рис. 3), включающий в свой

состав стандартный бесконтактный электромагнитный преобразователь (рис. 4) с экстремальной функцией преобразования [7] и устройства для измерения и обработки информационного сигнала с преобразователя.

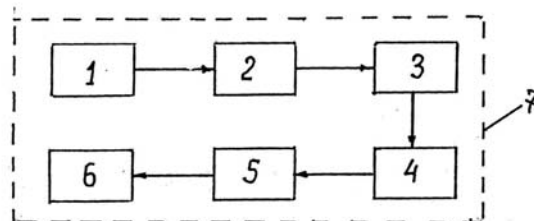


Рис. 3. Структурная схема построения экспериментального стенда контроля НС материала КЭ: 1 – блок питания (автономный); 2 – генератор; 3 – вихревой преобразователь (ИП); 4 – детектор; 5 – фильтр; 6 – устройство измерения и обработки выходных сигналов; 7 – экспериментальный стенд

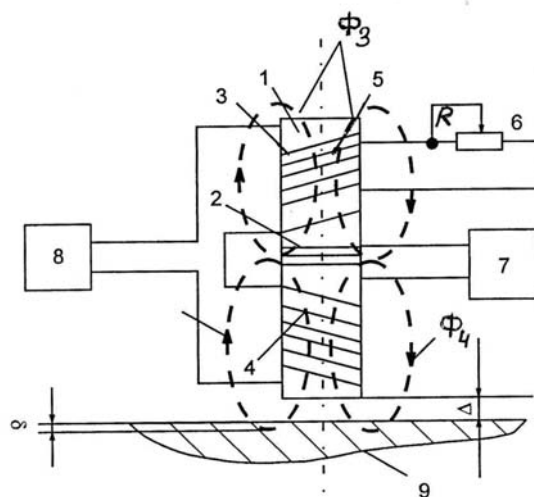


Рис. 4. Конструкция накладного электромагнитного вихревого преобразователя (ВТП):

1 – магнитопровод; 2 – измерительная петлеобразная обмотка; 3, 4 – секции обмотки возбуждения; 5 – короткозамкнутая обмотка; 6 – переменный резистор; 7 – измерительный прибор; 8 – источник переменного тока; 9 – эталонный образец материала или ферромагнитная пластина

На рис. 4 приняты следующие обозначения: Φ_3 ; Φ_4 – соответственно корректирующий и информационные потоки возбуждения; Δ – начальный воздушный зазор; δ – глубина проникновения магнитного потока Φ в материал КЭ или ферропокрытие на поверхности КЭ.

11. Для моделирования плоского напряженного состояния, как показано в работе [1], наиболее эффективно используется плоская оболочка, например, домкрат конструкции НИИСК, так как в этом случае становится возможным изменять величину главного окружного напряжения σ_o и главного радиального на-

пряжения σ_R , что следует из расчетного соотношения, полученного в работе [1]:

$$\sigma_O = \sigma_R = \frac{PR}{2t}, \quad (1)$$

где P – нагрузка, t – толщина стенок, R – радиус сферы.

12. При моделировании плоского НС в неметаллических материалах эффективно применение способа магнитоупругого тензометрирования, когда на поверхность наносится ферромагнитное покрытие, что позволяет использовать токовихревой преобразователь по схеме, приведенной на рис. 5.

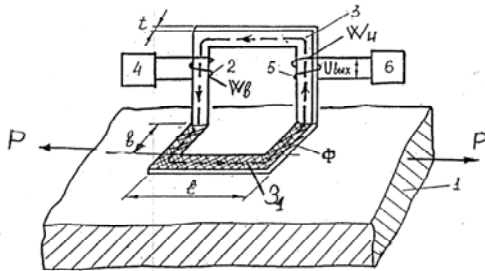


Рис. 5. Схема реализации магнитоупругого тензометрирования неферромагнитных материалов КЭ (бетон, кирпич):

1 – контролируемый материал с остаточными или действующими напряжениями; 2 – обмотка возбуждения с числом W_B ; 3 – ферромагнитный магнитопровод в форме изогнутой пластины с небольшой толщиной t ; 4 – источник переменного тока для формирования магнитного потока «Ф»; 5 – измерительная обмотка с числом витков W_H ; 6 – устройство измерения выходного сигнала $U_{\text{вых}}$; 3_1 – участок магнитопровода 3, воспринимающий деформации контролируемого материала 1; P – внешняя растягивающая сила

13. Примем, что исходное НС материала КЭ перед устранением крена объекта характеризуется начальным НС, которое включает в виде составляющей остаточное НС, величина которого определяется остаточными напряжениями, поэтому для случая плоского НС необходимо учитывать остаточные напряжения σ_{OC} . Определение и последующий учет остаточных напряжений позволит повысить достоверность обобщенного критерия, а также точность расчетов напряжений, действующих в материалах КЭ [8, 9].

14. Известно, что для случая плоского НС при раскрытии макротрещины основную роль выполняет главное растягивающее напряжение σ_1 , перпендикулярное к продольной оси трещины, поэтому можно предположить, что макротрещина возникнет в локальной области, в

которой напряжения σ_1 и σ_{OC} действуют в одном направлении и совпадают по знаку, то есть они соответствуют закону суперпозиции [2].

Из известных обобщенных критериев для оценки ПНС материала КЭ наиболее приемлем критерий Писаренко-Лебедева [1]:

$$x\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} + (1-x)\sigma_1 = \sigma_P, \quad (2)$$

где x – параметр, определяющий степень участия в макроразрушении сдвиговой деформации, создающей благоприятные условия для разрыхления материала и образования макротрещин; σ_1, σ_2 – главные растягивающие напряжения; σ_P – разрушающее одноосное растягивающее напряжение, то есть физически оно соответствует предельному напряжению σ_{II} (рис. 1).

В работе [1] показано, что для случая, когда материал находится в пластическом состоянии, $x = 1$, формула (2) совпадает с уравнением критерия Мизеса-Генки; если материал КЭ хрупкий, то с достаточной точностью можно принять, что $x = 0$ и критерий (2) совпадает с критерием максимальных нормальных напряжений и практически все материалы имеют величину x в диапазоне $0 < x < 1$. Из уравнения (2) для обобщенного критерия Писаренко-Лебедева следует, что оно не учитывает НС материала, сформированное при изготовлении КЭ, то есть σ_{OC} . С учетом допущений п. 14 и уравнения (2) обобщенный критерий примет вид

$$x\sqrt{(\sigma_1 + \sigma_{OC})^2 + \sigma_2^2 - (\sigma_1 + \sigma_{OC})\sigma_2} + (1-x)(\sigma_1 + \sigma_{OC}) = \sigma_P, \quad (3)$$

где σ_{OC} – величина остаточного механического напряжения в материале КЭ перед его восстановлением, изменяющегося по закону [6]:

$$\sigma_{OC} = \sigma_o \cos 2\pi \frac{S}{l}, \quad (4)$$

где l – длина волны, на которой меняются остаточные напряжения; S – величина равная $0.3l$, для случая, когда σ_{OC} во всех направлениях изменяются одинаково [6].

Для подтверждения структуры уточненного критерия (3) были проведены экспериментальные исследования плоской оболочки, изготовленной из листового материала (рис. 6). Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 7.



Рис. 6. Конструкция плоской оболочки с размеченными областями для контроля параметров НС (1...n точки установки вихретокового преобразователя)

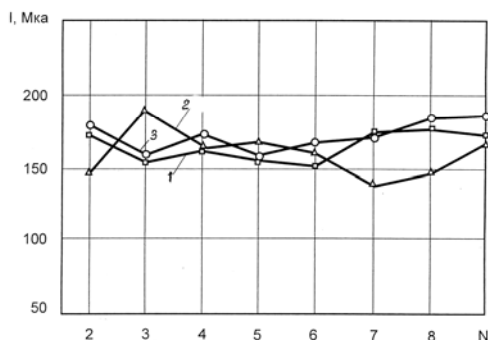


Рис. 7. Распределение значений выходного сигнала I вихретокового преобразователя (ВТП) по точкам установки N на плоской мембране оболочки: 1, 2, 3 – соответственно зависимости, полученные при исходном состоянии; нагружении внутренним давлением; обжатии до исходного состояния; N – точки контроля; I – выходной сигнал ВТП в микроамперах (MkA)

ВЫВОДЫ

1. В качестве предельного параметра НС материалов КЭ целесообразно принять величину напряжения, соответствующего моменту возникновения макротрещины на поверхности материала (рис. 1). Дальнейший рост макротрещины неконтролируем, а разрушение даже одного КЭ может вызвать лавинообразное увеличение на 60...70 % действующих нагрузок в КЭ без трещин и привести к возникновению аварийной ситуации [10].

2. Из экспериментальных зависимостей выходного сигнала вихревого преобразователя от точек его установки на поверхности мембраны, следует, что зависимости 1, 3 качественно идентичны (рис. 7). Это позволяет применить принцип суперпозиции к остаточным напряжениям и напряжениям от внешней нагрузки. Из графиков 1...3 следует, что применение основных положений теории ферромагнетизма [6] о волнообразном изменении остаточных напряжений в ферромагнитных материалах справедливо и качественно описывается формулой (4).

3. Зависимость 2 показывает, что магнитоупругий метод может быть использован для определений напряжений в ферромагнитных материалах КЭ. Относительное изменение выходного сигнала вихревого преобразователя по точкам контроля при постоянном давлении в

оболочке достигает по сравнению с выходными сигналами при исходном состоянии плоской мембраны величины порядка 17; 22.5 % (см. точки контроля №№ 2, 3 рис. 7).

4. При контроле изменения НС конструктивного элемента измерительными вихретоковыми преобразователями (ВТП) исходная относительная величина механических напряжений может быть определена на основе анализа волнового изменения сигналов ВТП.

5. Уточненное критериальное уравнение Писаренко-Лебедева предельного состояния НС материалов КЭ как для металлических (непосредственно в материале), так и неметаллических (магнитоупругое тензометрирование), позволяет повысить достоверность оценки НС при устранении кренов зданий и сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев – К.: Наук. думка, 1976. – 416 с.
2. Чаусов Н. Г. Особенности разрушения пластичных листовых материалов / Н. Г. Чаусов, А. А. Лебедев // Проблемы прочности, 2003, №4. – С. 5-13.
3. Фридман Я. Б. Механические испытания материалов. Часть 2. – М.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
4. Костюк А. Г. Пластичность и разрушение кристаллического материала при сложном нагружении. – М.: МЭИ, 2000. – 180 с.
5. Шокарев В. С. Определение магнитной проницаемости для оценки остаточных механических напряжений. Сб. науч. тр. Строительство «Механика и физика разрушения строительных материалов» Под ред. О. Е. Андрейкива, И. И. Лучка, В. В. Божидарника – Вып. 5 / В. С. Шокарев, В. И. Чаплыгин, А. С. Трегуб. – Львов: Каменяр, 2002. – 260 с.
6. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. – М.: Мир, 1987. – 419 с.
7. Чаплыгин В. И. Накладной вихретоковый преобразователь / В. И. Чаплыгин, С. А. Сергеев, В. И. Осокин, Н. Ф. Потапова. – Патент 2011189. – Бюл. № 7, 1994.
8. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – М.: Машиностроение, 1971. – 199 с.
9. Долгов К. А. Определение напряжений в двухслойном покрытии // Проблемы прочности, 2005, №4. – С. 121 – 132.
10. Гениев Г. А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. / Г. А. Гениев, В. И. Колчунов, Н. В. Клюева и др. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 216 с.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ НАБРЫЗГ-БЕТОНА ТОНКИМ ПОТОКОМ В ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГЕРМАНИИ

Розроблена методика, технологія і техніка зведення бетонного кріплення методом набрызк-бетонування в умовах шахт Німеччини.

Разработана методика, технология и техника возведения бетонной крепи методом набрызг-бетонирования в условиях шахт Германии.

The procedure, technology and technique of erection of concrete timbering by the spill-concrete method are developed for conditions of mines in Germany.

В последние годы в угольной промышленности разработан ряд способов повышения несущей способности арок крепей, при которых пространство за крепью заполняется строительными материалами при помощи набрызга. При этом стальные крепи полностью омоноличиваются бетоном. Этим достигается увеличение несущей способности крепи и одновременно эффективная защита от коррозии. Однако, все эти методики требуют большого расхода стали и стройматериалов. Также, наряду со значительными дополнительными расходами, они вызывают большие затраты времени на возведение крепи.

Впервые в угольной промышленности Германии в Bergbau AG Нижний Рейн на шахте Вальсум (Walsum) четвертый восточный коренной штрек (северное направление) был закреплен набрызг-бетоном с очень высокой несущей способностью при одновременном полном отказе от элементов стальной арочной крепи.

Поэтому при поисках методик на шахте Вальсум ставилась цель: разработать методику проходки с применением долговечной крепи с высокой несущей способностью, не требующей возведения стальной арочной крепи.

Известно, что эту методику многие годы применяют с большим успехом при строительстве тоннелей, но применяемый там способ набрызг-бетона с трудом находит применение в немецкой угольной промышленности. Это можно объяснить, прежде всего, тем, что приготовление бетона высокого и постоянного качества в подземных условиях шахты довольно затруднительно. К тому же, часто применяемый при строительстве тоннелей метод сухого на-

брызг-бетона связан с образованием пыли, что в условиях шахты является нежелательным.

Возведение бетонной крепи методом мокрого набрызг-бетона было бы решением проблемы. Поиски такого метода привели в Венгрию.

Оценка экономичности технологически приемлемых решений, показала, что запасы угля месторождения Маркушеди, расположенного недалеко от города Oroszlany (Орошланы) в Венгрии, лучше всего вскрыть 3 вертикальными стволами и одним наклонным стволом. Стволы должны служить для проезда, вентиляции и транспортировки материала, а уголь должен выдаваться исключительно через наклонный ствол.

Проходка наклонного ствола, технические данные которого представлены в таблице 1, велась в соответствии с календарным графиком, крепь должна была окончательно возведена через 22 месяца. При этом должны были быть соблюдены или сокращены сроки строительства и использоваться эффективная система проходки.

Таблица 1

Технические данные наклонного ствола

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	Значение
1	Протяженность	м	1620
2	Уклон	%	200
3	Поперечное сечение	м ²	18.23
4	Сечение в свету	м ²	12.68
5	Профиль крепления		арка
6	Ширина подошвы	м	4.8
7	Высота в свету	м	3.1

Для выполнения своих функций наклонный ствол должен быть полностью оснащен и окончательно оборудован за один рабочий цикл. В ходе работ должна быть применена новая система крепления, обеспечивающая расчетный окончательный крепеж и высокомеханизированные проходческие и крепежные работы. Ремонтные работы в пределах срока эксплуатации наклонного ствола не предусмотрены; крепление горной выработки должно быть экономичнее обычных и обеспечивать лучшие условия для здоровья рабочих.

В фазе подготовительных работ по строительству наклонного ствола были пробурены вдоль запроектированной выработки 9 буровых скважин, для разведки геологических и гидрологических условий, а также для выяснения физико-механических параметров горных пород. Анализ результатов бурения дал следующие результаты:

– В верхней части наклонного ствола на глубине до 15 м находится водоносный речной песок. Уровень грунтовых вод находится на глубине от 4 до 5 м. Оборудование этого участка обычными горными методами было бы нецелесообразно.

– При достижении более устойчивых пород должны быть применены методы горной проходки, но этот участок нужно было изолировать от проникновения в него грунтовых вод.

– Выемку горных пород можно производить резанием, их прочность на сжатие лежит между 5 и 20 МПа. Одноосная прочность на сжатие в местах имеющих залеганий песчаника достигает 50 МПа.

– Интенсивная фаза реологических процессов (около 50 % деформаций) длится от 5 до 10 часов; определяющие процессы длятся от 4 до 7 д.

– Просочившееся количество воды незначительно; дренаж не требует никаких особых мероприятий.

Была принята следующая технология проходки наклонного ствола. Первый участок длиной 125 м наклонного ствола был закреплен монолитной бетонной оболочкой. Снаружи бетонная оболочка была гидроизолирована, и на нее был нанесен особый водонепроницаемый слой набрызг-бетона. После этого производили проходку наклонного ствола горно-техническим способом, технологическая цепочка которой состояла из врубовой машины РК-9г, дизель-гидравлической монорельсовой подвесной дороги фирмы Шарф (Scharf GmbH), машины для набрызг-бетона Шперно – 208Г

(Sperno 208 G) фирмы «SPERNO» Эльмара Шперфехтера, бетонной смесительной установки Дормикс (Dormix), а также ленточного конвейера для выдачи породы фирмы Шюттгут (Schüttgut). Разрушение горных пород и их выемка производилась врубовой машиной РК-9г, предназначенной для проходки горной выработки от 2.2 до 3.9 метров высоты, с шириной подошвы от 3.0 до 5.8 метров, 7.0 до 20 м² поперечного сечения в свету, с уклоном до 15 градусов. Среднее давление на почву от 9×10^4 Па этой 30-тонной машины не вызывало в итоге даже при мало увлажненной подошве, состоящей из глины никаких проблем для маневрирования. Машина не вызывала никаких проблем при проходке, хотя проходка не была узким местом в технологической системе. Обратный свод сзади проходческой машины был вручную с помощью отбойных молотков разработан и вручную порода подана для транспортировки на поверхность. За врубовой машиной плотно следовали две специальные служебные единицы техники. Первая содержала привод передающего конвейера, а также устройства инструменты для опережающей крепи и радиальной распорки произведенной разработки, ТХ-арки. Связанная с первой вторая единица обслуживала устройства электроснабжения, так называемый «энергопоезд». Обе единицы были закреплены гидравлическими стойками и передвигались при помощи этих стоек.

После проходки выработки на расчетную глубину заходки, сразу же возводилась стальная арочная крепь, состоящая из верхняка и боковых стоек, с особенными элементами затяжки, которые позже должны были служить как арматура для набрызг-бетона. После установки крепи и арматуры в малоустойчивые горные породы проводился набрызг так называемого контактного слоя бетона, который предотвращал скалывание горных пород, химическое выветривание и в рамках новой системы крепления должен был замедлить реологические процессы в горных породах, которые могли вызвать проявления трещин (обрушений) вокруг выработанного пространства еще до окончания закрепления ствола. Рецептура приготовления бетона для контактного слоя и подбиралась с учетом местных условий горных пород.

Длина участка, закрепленного контактным бетоном от пройденной от груди забоя до первой служебной единицы, составляла 12 метров. На этом участке применялись обратные (противовесные, разгрузные) арки и специальные угло-

вые элементы, которые связывали разгрузочные арки с собственно арочной крепью. Первая служебная единица предоставила в распоряжение устройство для затяжки арок. Предварительное закрепление обеспечивало безопасность рабочего пространства до окончательного закрепления набрызг-бетоном и обеспечивало возможность обустройства монорельсовой дороги. За второй служебной единицей, на удалении примерно 24 м от груди забоя, проходило окончательное возведение крепи набрызг-бетоном, размеры и состав которой были предварительно рассчитаны разработанными нами методиками. Предварительно рассчитанная постоянная крепь показывала уже в течение ее затвердевания, что ее допустимые нагрузки, значительно больше, чем фактические нагрузки контактной крепи. Происходит распределение нагрузки между горными породами и бетоном таким образом, что предельные нагрузки ни одного, ни другого не превышаются.

В процессе проходки наносился бетон заранее определенного состава, процессы (протекание) затвердевания и изменения твердости (прочности) которого были взяты с учетом требований геологических характеристик окружающих горных пород. Бетон был эластичнее, чем обычные виды бетонов, его прочность была предварительно рассчитана для условий затвердевания под нагрузкой, он давал малые отклонения параметров прочности, что в сумме позволило проводить закрепление ствола шахты с учетом предварительных требований.

Таблица 2

Рецепт приготовления бетона В-400/16

№ п/п	Наименование показателей	Ед.изм.	Значение
1.	Портланд цемент, марки 450	кг/м ³	350
2.	Инертные добавки, наполнители	кг/м ³	1883
3.	Соотношение вода : цемент		0.42
4.	Клей силипон на каждый килограмм цемента	гр	3
5.	Консистенция		1.0
6.	Установленная плотность	кг/м ³	2380
7.	Линия просеивания	%	
	до 0.1мм		6
	от 0.1 до 4 мм		54
	от 4 до 8 мм		20
	от 8 до 16 мм		20
8.	Потери при отскоке	%	20
9.	Время приготовления смеси (смешивания)	сек.	90

Набрызг-бетон, соответствующий приведенным в табл. 2 условиям, приготавливался машиной для набрызг-бетона Sperno 208 G, регулирующей энергию нанесения бетонной смеси, что дало возможность установить оптимальное уплотнение (плотность).

Приготовленный по приведенной рецептуре бетон может превосходить другие типы набрызг-бетонов (нанесенных без оптимизации энергии) по его окончательной прочности на 30...40 %. Но этот способ имеет также и другие преимущества:

- вследствие повышенного уплотнения применение добавок, ускоряющих схватывание, излишне;
- отсутствие пылеобразования;
- обеспечение непрерывного потока материалов, что предотвращает расслоение (оседание) бетонной смеси во время нанесения;
- достижение соотношения вода : цемент, обеспечивающее наибольшую прочность (рис. 1).

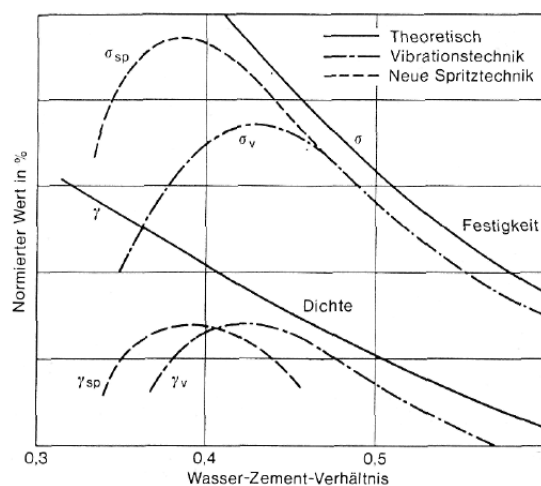


Рис. 1. Рекомендуемое водо-цементное отношение

Смесь была гомогенизирована в активизированном бетоно-смесителе принудительного действия.

Для того, чтобы произвести статически удовлетворяющую конструкцию по технологии набрызг-бетоном, которая могла бы служить крепью подземных пространств, необходимо исходить из основополагающих условий, что эта крепь:

- должна соответствовать горномеханическим принципам, наиболее полно отражающим естественные условия;
- должна иметь правильно размеренную структуру оболочки, соответствующую поведению горного массива вокруг выработки;
- ее параметры должны соответствовать обоснованным бетонным технологиям;

– при возведении должна выдерживать критические параметры.

Машина для набрызг-бетона фирмы «SPERNO» Sperno 208 G удовлетворяет этим условиям возведения железобетонной крепи.

Образцы (керны) из структуры набрызг-бетона показали, что:

– макроструктура бетонной крепи гомогенна и изотропная;

– параметры прочности и эластичности соответствуют заданным;

– набрызг-бетон обеспечивает распределение нагрузки структуры крепи и прочную связь между горной породой и крепью;

– регулируемая энергия нанесения набрызг-бетона обеспечивает оптимальное уплотнение.

По нормам Венгрии отбирались по 3 пробы керны на каждые 100 м³ нанесенного бетона, которые должны были подвергаться государственному контролю качества. При возведении наклонной шахты Маркушеги разброс значений прочности набрызг-бетона был менее 10 %.

Расчет и ее возведение крепи осуществлялось в свете новых теорий горной механики. Результаты расчетов были представлены в виде свободной технологической шкалы вариантов, в основе которой была предусмотрена продолжительность эксплуатации без ремонтных работ – 30 лет. Программирование технологии фаз возведения крепи позволило снизить действующие нагрузки в окончательно возведенной крепи примерно на 30 % и достичь на 35 % большей прочности, чем прочность бетона той же рецептуры, нанесенного другими способами.

Сравнительная оценка экономичности технологических вариантов в горнодобывающей промышленности – это трудно разрешимая проблема, так как основополагающий исходный пункт – горно-техническая равноценность решений – в большинстве случаев не реализуема. Для целей оценки экономичности здесь необходимо сравнить 3 технически равноценных варианта.

Вариант А

Буро-взрывные проходческие работы, погрузка породы механизирована, выгрузка из лавы на двойной вагонетке Winscp; оборудование ствола из бетонных блоков V-30, забутовка пространства за крепью строительным раствором.

Вариант В

Буро-взрывные проходческие работы, погрузка породы механизирована, подача из лавы по электродизельной монорельсовой подвесной дороге, оборудование ствола при помощи бетонных панелей с забутовкой пространства за крепью.

Вариант С

Выше рассмотренный вариант.

Предварительно рассчитанные результаты сравнения экономичности трех технологических вариантов приводятся в таблице 3. Резко бросается в глаза то, что затраты на строительство одного метра в варианте С только 61 или 75 % от обычных вариантов А и В соответственно. Последующая экономическая оценка варианта С показала хорошую сходимость значений с предварительно рассчитанными.

Таблица 3

Сравнительная характеристика экономичности различных методов проходки.

Наименование показателей	Ед.изм.	Вариант		
		А	В	С
Скорость проходки	м / месяц	30	40	100
Общее время строительства	мес.	50	37.5	15
Общие годовые затраты	MFt/a (млн форинтов в год)	39.2	42.7	80.7
Себестоимость без процентов на проценты	млн фор/год	164.8	132.5	100.8
Себестоимость с процентами на проценты	млн фор/год	187.5	144.1	102.5
Прямые затраты на строительство одного метра	фор/м	88.9	71.8	54.2

Венгерские шахтеры уже давно применяют для крепления штреков мокрый набрызг-бетон тонкого потока в сочетании со стальной арматурой. При этом используемые машины типа

Sperno 208 G для укладки набрызг-бетона производятся в Германии на фирме «SPERNO».

К тому же, метод исключает возникновение пыли. Его отличие от приготовления бетона для набрызга сухим методом состоит в том, что

смешивание составляющих происходит в смесителе с добавлением строго дозируемого количества воды.

Машина для набрызга пневматически подает мокрую смесь через шланг к стальной трубе, на выходе которой получают поток смеси с высокой скоростью. Наряду с другими преимуществами, этот метод позволяет достичь равномерного качества бетона. Методика применима наряду с любой отбойной техникой и хорошо согласуется с системой подачи-доставки материалов, приспособлена к специфическим условиям горного предприятия, есть возможность поточного крепления, пригодна к текущим ремонтным работам.

Важнейшие технологические параметры выбранной методики: качество бетона можно оптимизировать в широких пределах; плотность набрызгиваемого конструкционного бетона 90...93 процента; бетон однородный, рассеяние параметров до 10 %.

Важнейшие параметры машин для этой методики:

Регулируемые, постоянные рабочие параметры бетонной струи:

- постоянная подача бетона;
- постоянная подача воздуха;
- жидкий состав бетона;
- скорость струи;
- вид и позиция струи.

Технологические параметры:

– методика применима наряду с любой отбойной техникой (технологии с применением маленькой и большой машины);

– согласованность с системой подачи-доставки материалов;

– приспособляемость к специфическим условиям горного предприятия (опасность метана и т.д.);

– возможность поточного крепления;

– пригодность к текущим ремонтным работам.

Технологические особенности методики:

– однородность материала и сохранение однородности в течение всего процесса набрызг-бетонирования;

– обеспечение состава бетона, пригодного для нанесения с требуемой для уплотнения энергией и одновременно достигающего максимального уплотнения;

– определенная оптимальная энергия уплотнения по отношению к исходной смеси разной консистенции;

– так как набрызгиваемый бетон с самого начала участвует в повышении несущей способности конструкции, необходим такой бетон, «зеленое» сопротивление которого можно регулировать (3...5 МПа сопротивление давлению);

– получение желаемого качества бетона при помощи такого оборудования, обеспечивающего постоянную подачу и равномерное ускорение подаваемого материала;

– регулирование потока бетонной смеси в трубе таким образом, что его протекание цилиндрично-симметрично;

– в фазе струи низшая скорость в осевое направление смеси будет по меньшей мере в два раза больше, чем конечная скорость спада твердых зерен;

– свободная струя бетона стабильно конвергентна и управляема;

– применение такой машинной техники, делающей возможной параллельно с отбойной работой подходящее условиям механики породы постоянное нанесение крепления.

Фирма «SPERNO» в Германии изготавливает типоряд целевых машин для выше приведенной технологии набрызг-бетона тонким слоем.

Поступила в редакцию 22.10.2007.

А. И. ТИМОШКИН (Ростовский государственный колледж связи и информатики, Российская Федерация)

О НЕОБХОДИМОМ И ДОСТАТОЧНОМ УСЛОВИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПРОВЕРЯЮЩЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕСТА МИНИМАЛЬНО-ВОЗМОЖНОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ОДНОМЕРНОЙ ИТЕРАТИВНОЙ СТРУКТУРЫ

Розглянута проблема повноти тестування відносно до регулярних комбінаційних схем. Оцінюється кількість таких схем із одного класу.

Рассматривается проблема полноты тестирования применительно к регулярным комбинационным схемам. Оценивается число таких схем из одного класса.

The problem of confidence testing applying to the regular iterative circuits is considered. Total number of such circuits from one class is estimated.

Одной из важнейших задач технической диагностики цифровых интегральных схем является задача постоянного повышения полноты контроля их работоспособности. Данная задача может быть эффективно решена на основе использования функциональных проверяющих тестов.

Применение функциональных проверяющих тестов наиболее целесообразно для цифровых схем с регулярной структурой и, в том числе, для итеративных цифровых схем. (К итеративным цифровым схемам относятся регулярные цифровые схемы с идентичными ячейками (элементами) и связями [1]).

Для эффективной разработки оптимальных процедур контроля работоспособности цифровых регулярных интегральных схем, а также оптимальных процедур контроля и диагностирования цифровых систем на их основе необходим всесторонний структурно-функциональный анализ этих схем. Одной из важнейших целей упомянутого анализа является получение необходимых и достаточных условий существования проверяющих функциональных тестов заданной (в том числе и минимальной) длины для отмеченного типа схем.

В работе [2] сформулировано необходимое и достаточное условие существования проверяющего функционального теста длины 2^n (или минимально-возможной длины) для одномерной регулярной структуры r из m функциональных ячеек с одинаковыми межъячеечными связями. При этом каждая i -тая ($i=1,2,\dots,m$) ячейка этой структуры имеет по одному горизонтальному входу и выходу, один вертикальный выход, $n-1$ вертикальных входов и реализует две Булевы функции F_i и H_i , зависящих от n переменных:

$h_i, x_1^i, x_2^i, \dots, x_{n-1}^i$ Необходимо отметить также, что для любого i $F_i=F_{i+1}$ и $H_i=H_{i+1}$. При этом на горизонтальном выходе любой i -той ячейки ($i \in \{1, 2, \dots, m\}$), связанном с горизонтальным входом h_{i+1} $i+1$ -ой ячейки формируется функция H_i , а на вертикальном выходе – F_i . Описанная структура показана на рис. 1. В настоящей работе приводится доказательство сформулированного в работе [2] необходимого и достаточного условия, а также, приводится оценка мощности рассмотренного класса R_1 одномерных регулярных структур.

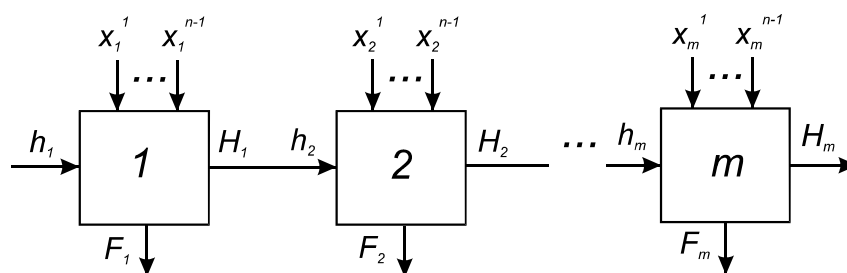


Рис. 1. Одномерная регулярная итеративная структура

Теорема 1. Регулярная итеративная структура $r \in R_1$ обладает проверяющим функциональным тестом минимально возможной длины (длины 2^n) тогда и только тогда, когда для любого $i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ число единиц в столбце значений функции H_i её таблицы истинности равно числу единиц в столбце значений её аргумента h_1 .

Доказательство. Достаточность. Пусть выполняется условие, сформулированное в данной теореме. Покажем, как в данном случае можно построить проверяющий функциональный тест минимально возможной длины (длины 2^n). Для любого $i \in \{1, 2, 3, \dots\}$ множество μ всех строк таблицы истинности функции H_i может быть разбито на два непересекающихся подмножества: μ_1 и μ_2 ($\mu = \mu_1 \cup \mu_2$, $\mu_1 \cap \mu_2 = \emptyset$). При этом в множество μ_1 будут входить строки, для которых значение аргумента h_i равно значению функции $H_i(\mu_1/h_i = H_i)$, а в множество μ_2 – строки, для которых значение аргумента h_i не равно значению функции $H_i(\mu_2/h_i \neq H_i)$. Это разбиение порождает две подтаблицы истинности функции H_i , μ_1 и μ_2 . Исходя из того, что число единиц в столбце значений функции H_i её таблицы истинности равно числу единиц в столбце значений её аргумента h_i , и того, что число единиц в столбце значений функции H_i её μ_1 -подтаблицы истинности равно числу единиц в столбце значений её аргумента h_i этой подтаблицы следует, что и число единиц в столбце значений функции H_i её μ_2 -подтаблицы истинности должно быть равно числу единиц в столбце значений её аргумента h_i упомянутой подтаблицы. Поэтому для любого $i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ число строк в μ_2 -подтаблице истинности функции H_i всегда четно. Поскольку для любого $i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ число единиц в столбце значений аргумента h_i равно числу единиц в столбце значений аргумента h_{i+1} , следовательно, число единиц в столбце значений функции H_i равно числу единиц в столбце значений аргумента h_{i+1} . Поэтому для любых номеров $j_1, j_2, j_1 \neq j_2$ строк

$$t_{j_1} = (\beta_i^{j_1}, \alpha_i^{1,j_1}, \alpha_i^{2,j_1}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_1});$$

$$t_{j_2} = (\beta_i^{j_2}, \alpha_i^{1,j_2}, \alpha_i^{2,j_2}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_2}), \quad \text{таких, что}$$

$\beta_i^{j_1} \neq \beta_i^{j_2}$ μ_2 -подтаблицы истинности функции H_i i -той ячейки найдутся номера $k_1, k_2, k_1 \neq k_2$ строк

$$t_{k_1} = (\beta_{i+1}^{k_1}, \alpha_{i+1}^{1,k_1}, \alpha_{i+1}^{2,k_1}, \dots, \alpha_{i+1}^{n-1,k_1});$$

$t_{k_2} = (\beta_{i+1}^{k_2}, \alpha_{i+1}^{1,k_2}, \alpha_{i+1}^{2,k_2}, \dots, \alpha_{i+1}^{n-1,k_2})$ μ_2 -подтаблицы истинности функции H_{i+1} $i+1$ -ой ячейки такие,

что для первых компонент $\beta_{i+1}^{k_1}, \beta_{i+1}^{k_2}$ этих строк будут выполняться равенства:

$$\begin{cases} H_i(\beta_i^{j_1}, \alpha_i^{1,j_1}, \alpha_i^{2,j_1}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_1}) = \beta_{i+1}^{k_1}, \\ H_i(\beta_i^{j_2}, \alpha_i^{1,j_2}, \alpha_i^{2,j_2}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_2}) = \beta_{i+1}^{k_2}. \end{cases} \quad (1)$$

Из этих равенств следует, что $\beta_i^{j_1} = \beta_{i+1}^{k_2}$ и $\beta_i^{j_2} = \beta_{i+1}^{k_1}$. Таким образом, между строками из μ_2 -подтаблицы истинности функций H_i и H_{i+1} можно задать взаимно-однозначное соответствие φ (и причем в общем случае не единственное), определяемое равенствами (1). Следовательно, для фрагмента r из любых двух последовательных ячеек рассматриваемой регулярной структуры r можно построить функциональный подтест длины $2^n - l$, где l – число строк в μ_1 -подтаблице истинности функции H_i . При этом любой тестовый вектор этого подтеста для упомянутого фрагмента образуется путем свертки находящихся во взаимно-однозначном соответствии φ строк μ_2 -подтаблиц истинности функций H_i и H_{i+1} . В частности, тестовыми векторами для рассматриваемого фрагмента итеративной одномерной структуры будут векторы

$$(\beta_i^{j_1}, \alpha_i^{1,j_1}, \alpha_i^{2,j_1}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_1}, \alpha_{i+1}^{1,j_2}, \alpha_{i+1}^{2,j_2}, \dots, \alpha_{i+1}^{n-1,j_2}) \quad \text{и}$$

$$(\beta_i^{j_2}, \alpha_i^{1,j_2}, \alpha_i^{2,j_2}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_2}, \alpha_{i+1}^{1,j_1}, \alpha_{i+1}^{2,j_1}, \dots, \alpha_{i+1}^{n-1,j_1})$$

Функциональный текст T длины 2^n для всей одномерной итеративной структуры r может быть построен следующим образом:

1) сначала строится часть T_1 теста T , которая формируется на основе μ_1 -подтаблицы истинности функции H_i для произвольного i (поскольку $H_i = H_{i+1}$ для $\forall i$); эта часть содержит l тестовых векторов, каждый из которых образуется путем итерирования нужного количества раз соответствующей строки μ_1 -подтаблицы истинности функции H_i , причем на втором и последующих итерированиях упомянутая строка берется без первой компоненты;

2) затем строится часть T_2 теста T , которая формируется на основе функционального подтеста фрагмента r ; эта часть содержит $2^n - l$ тестовых векторов, каждый из которых образуется путем итерирования нужного количества раз соответствующего тестового вектора из данного функционального подтеста, при этом также на втором и последующих итерированиях упомянутый тестовый вектор берется без первой компоненты. Таким образом, достаточность условия, сформулированного в данной теореме, доказана.

Необходимость. Допустим, что условие, сформулированное в данной теореме, не выполняется. В этом случае для доказательства невозможности построения функционального теста длины 2^n для всей регулярной структуры r достаточно показать, что для произвольного фрагмента p из любых двух последовательных ячеек (i -той и $i+1$ -ой) рассматриваемой структуры функциональный тест длины 2^n построить нельзя. Пусть для определенности для любого i число единиц в столбце значений функции H_i больше числа единиц в столбце значений её аргумента h_i . Следовательно, при построении взаимно-однозначного соответствия, определяемого равенствами (1), найдутся, по крайней мере, два номера j_1 и $j_2, j_1 \neq j_2$ строк

$$t_{j_1} = (0_i^{j_1}, \alpha_i^{1,j_1}, \alpha_i^{2,j_1}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_1});$$

$$t_{j_2} = (0_i^{j_2}, \alpha_i^{1,j_2}, \alpha_i^{2,j_2}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_2})$$

μ_2 -подтаблицы истинности функции H_i i -той ячейки, которым будет соответствовать

единственный номер k строки $t_k = (1_{i+1}^k, \alpha_{i+1}^{1,k}, \alpha_{i+1}^{2,k}, \dots, \alpha_{i+1}^{n-1,k})$ μ_2 -подтаблицы истинности функции H_{i+1} $i+1$ -ой ячейки, такой, что для первой компоненты 1_{i+1}^k этой строки будут выполняться равенства:

$$H_i(0_i^{j_1}, \alpha_i^{1,j_1}, \alpha_i^{2,j_1}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_1}) = 1_{i+1}^k$$

$$H_i(0_i^{j_2}, \alpha_i^{1,j_2}, \alpha_i^{2,j_2}, \dots, \alpha_i^{n-1,j_2}) = 1_{i+1}^k$$

Таким образом, между строками из μ_2 -подтаблиц истинности функций H_i и H_{i+1} i -той и $i+1$ -ой ячеек взаимно-однозначное соответствие, определяемое равенствами (1) задать нельзя. Поэтому невозможно в этом случае построение функционального теста длины 2^n для произвольного фрагмента из любых двух последовательных ячеек рассматриваемой структуры. **Теорема доказана.**

Оценим теперь мощность класса R_1 описанных в работе одномерных регулярных структур, т.е., обладающих минимально-возможным функциональным проверяющим тестом:

$$|R| = \left[C_{2^n}^{2^{n-1}} \right]^m = \left[\frac{(2^n)!}{(2^{n-1})!(2^n - 2^{n-1})!} \right]^m = \left[\frac{(2^n)!}{(2^{n-1})!(2^{n-1})!} \right]^m =$$

$$= \left[\frac{(2^{n-1})!(2^{n-1} + 1)(2^{n-1} + 2) \dots (2^{n-1} + 2^{n-1})}{(2^{n-1})!(2^{n-1})!} \right]^m = \left[\frac{(2^{n-1} + 1)(2^{n-1} + 2) \dots (2^{n-1} + 2^{n-1})}{(2^{n-1})!} \right]^m =$$

$$= \left[\frac{(2^{n-1} + 1)(2^{n-1} + 2)(2^{n-1} + 3) \dots (2^{n-1} + 2^{n-1} - 1) 2^{n-1} \cdot 2}{(2^{n-1} - 1)! 2^{n-1}} \right]^m =$$

$$= \left[2 \cdot \prod_{k=1}^{2^{n-1}-1} \left(\frac{2^{n-1} + k}{k} \right) \right]^m = \left[2 \cdot \prod_{k=1}^{2^{n-1}-1} \left(\frac{2^{n-1}}{k} + 1 \right) \right]^m.$$

Выводы

1. В настоящей работе отмечена целесообразность применения функциональных проверяющих тестов для цифровых схем с регулярной структурой, произведено доказательство необходимого и достаточного условия существования проверяющего функционального теста минимально возможной длины для одномерной регулярной структуры, произведена общая методика построения этого теста, оценена мощность класса одномерных регулярных структур, обладающих данным тестом.

2. Полученные результаты и подходы могут быть использованы при анализе различных регулярных структур, при синтезе контролепригодных регулярных цифровых схем, разработке проверяющих и диагностирующих тестов

этих схем, а также при разработке методов тестирования и самотестирования цифровых схем и систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фридман А., Менон П. Теория и проектирование переключательных схем / А. Фридман, П. Менон – Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 581 с.
2. Тимошкин А. И. К разработке оптимальных процедур контроля работоспособности цифровых регулярных схем // Тр. 66 Межд. науч.-практ. конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Д., ДИИТ, 2006.

Поступила в редколлегию 15.12.2007.

М. П. БОЖКО, О. О. МАЗУРЕНКО (ДІТ)

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЇ ВАГОНО-ГОДИН НАКОПИЧЕННЯ ВАГОНІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ДВОГРУПНИХ ПОЇЗДІВ

Запропоновано вирішення задачі визначення економії вагоно-годин простою вагонів у сортувальному парку при формуванні окремого двогрупного поїзда у порівнянні з формуванням одногрупних поїздів. Отримано формулу для визначення скорочення простою вагонів під накопиченням на станції формування.

Предложено решение задачи определения экономии вагоно-часов простоя вагонов в сортировочном парке при формировании отдельного двогруппного поезда в сравнении с формированием одногруппных поездов. Получена формула для определения сокращения простоя вагонов под накоплением на станции формирования.

A solution of the task of evaluation of the wagon-hours economy of wagons demurrage at a marshalling yard when making up the particular two-unit train compared to making up the one-unit trains is proposed. A formula for determination of the reduction of wagons demurrage in conditions of accumulation at a station of formation is obtained.

Існуюча в теперішній час на мережі залізниць система організації вагонопотоків передбачає щорічну розробку плану формування поїздів (ПФП). Раціональний ПФП повинен забезпечувати, крім іншого, зменшення тривалості знаходження вагонів на технічних станціях. Одним з дієвих способів досягнення даної мети є формування багатогрупних поїздів взамін одногрупних. Діюча інструкція з організації вантажних вагонопотоків [1] передбачає можливість формування багатогрупних поїздів і містить методикку визначення їх ефективності, яка полягає у порівнянні загальних витрат при використанні одногрупних та багатогрупних поїздів. Однією зі складових, якими відрізняються варіанти, постають витрати, пов'язані з простоєм вагонів під накопиченням. На рис. 1 наведена графічна формалізація організації вагонопотоків при формуванні одногрупних (варіант 1) або двогрупних (варіант 2) поїздів на умовному напрямку з трьома технічними станціями і наступними параметрами:

N_{AB} , N_{BC} , N_{AC} – розміри вагонопотоків відповідних призначень;

K_{AB1} , K_{AC1} , K_{BC1} – кількість одногрупних поїздів відповідних призначень;

K_{AB2} – кількість двогрупних поїздів.

Згідно з [1], вагоно-години накопичення на головній станції A становлять:

$W = 2ct$ – при формуванні одногрупних поїздів (варіант 1);

$W = ct$ – при формуванні двогрупних поїздів (варіант 2),

де c – параметр накопичення;

t – кількість вагонів у складі поїзда.

Таким чином, при формуванні двогрупних поїздів вагоно-години накопичення зменшуються удвічі. Це скорочення слід розглядати як

середню величину в умовах рівномірного надходження вагонів та формуванні тільки двогрупних поїздів. Між тим, як показують експериментальні дослідження [2-4], у дійсності надходження вагонів на окремі призначення має суттєву нерівномірність і вважається випадковим. У зв'язку з цим економія вагоно-годин внаслідок формування окремого двогрупного поїзда може коливатися і приймати різні величини у залежності від ситуації у поточний момент часу та характеру надходження вагонів. Звідси постає задача визначення економії вагоно-годин при формуванні окремого двогрупного поїзда в конкретних умовах.



Рис. 1. Графічна формалізація організації вагонопотоків на напрямку

Для вирішення поставленої задачі розглянемо процес накопичення на головній станції A вагонів одного призначення (рис. 2) у випадку їх рівномірного надходження з інтенсивністю λ вагонів/годину.

При формуванні тільки одногрупних поїздів (варіант 1) середня тривалість простою під накопиченням одного вагона становить

$$t_H = \frac{m}{2\lambda},$$

а вагоно-години накопичення потоку з N вагонів дорівнюють

$$W_1 = \frac{Nm}{2\lambda}. \quad (1)$$

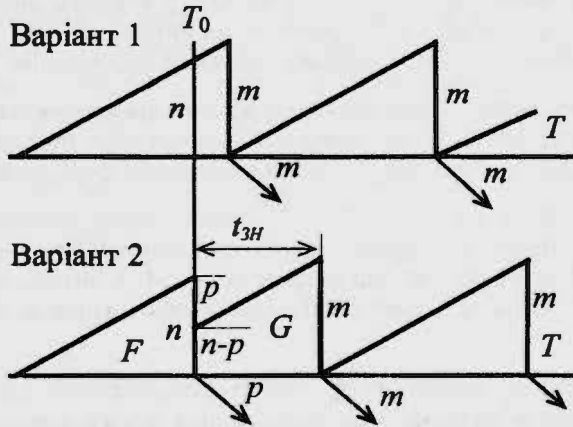


Рис. 2. Процес накопичення на головній станції А вагонів одного призначення

Стан призначення в деякий поточний момент T_0 можна характеризувати кількістю вагонів n та витратою вагоно-годин їх накопичення F , яка складає

$$F = \frac{n^2}{2\lambda}.$$

При формуванні двогрупного поїзда (варіант 2), до складу якого включається p вагонів даного призначення (за умови $p \leq n$), залишається $(n - p)$ вагонів, які входять до складу наступного одногрупного поїзда. Тривалість завершення накопичення цього поїзда у середньому дорівнює

$$t_{3H} = \frac{m - (n - p)}{\lambda},$$

а вагоно-години накопичення становлять

$$G = \frac{(m + n - p)(m - n + p)}{2\lambda}.$$

Решта потоку у кількості $(N - p - m)$ вагонів відправляється в одногрупних поїздах і має наступну кількість вагоно-годин накопичення

$$W_p = \frac{(N - p - m)m}{2\lambda}.$$

Таким чином, при формуванні двогрупного поїзда і включенні до його складу p вагонів окремого призначення, загальний простій вагонів під накопиченням складає

$$W_2 = F + G + W_p = \frac{n^2 + (m + n - p)(m - n + p) + (N - p - m)m}{2\lambda}. \quad (2)$$

Економія вагоно-годин накопичення одного призначення внаслідок формування одного двогрупного поїзда (у подальшому економія простою) становить

$$E_w = W_1 - W_2. \quad (3)$$

Після підстановки в останнє складових (1) та (2) і алгебраїчних перетворень отримуємо:

$$E_w = \frac{p(m - 2n + p)}{2\lambda} \quad (4)$$

Величина

$$z = (m - 2n + p) \quad (5)$$

в (4) являє собою деяку розрахункову кількість вагонів, а відношення

$$t_z = \frac{z}{\lambda} \quad (6)$$

відповідає тривалості їх накопичення. Тоді економія простою вагонів може бути розрахована як

$$E_w = \frac{p t_z}{2}. \quad (7)$$

Зміст величини z полягає у наступному. Якщо до складу двогрупного поїзда включаються усі наявні вагони призначення, тобто $p = n$, то величина $z = (m - n)$ становить завершуючу групу – кількість вагонів, яка потрібна для завершення накопичення одногрупного поїзда (див. рис. 3).

При цьому t_z являє собою тривалість періоду для накопичення цієї групи. У випадку, коли $p < n$, маємо $z = (m - n) - (n - p)$, тобто завершуючу групу, зменшену на величину залишку вагонів $(n - p)$, а t_z є тривалістю її накопичення.

Розглянемо приклад розрахунку E_w для призначення № 1 за вихідними даними, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1

Призначення	λ	n	m
1	8	40	50
2	5	40	50

Якщо до складу двогрупного поїзда включити усі вагони призначення № 1 ($p = 40$), тоді згідно з (5) розрахункова кількість вагонів дорівнює $z = 50 - 2 \cdot 40 + 40 = 10$, а тривалість їх накопичення становить

$$t_z = \frac{10}{8} = 1,25 \text{ год.}$$

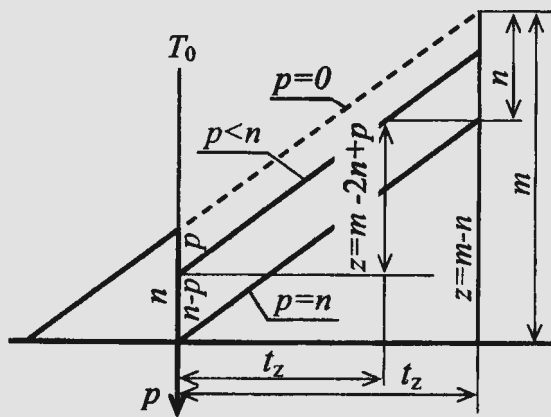


Рис. 3. Фізичний зміст величини z

Економія простою для цього призначення згідно з (7) дорівнює

$$E_w = \frac{40 \cdot 1,25}{2} = 25 \text{ вагоно-год.}$$

З метою аналізу аналогічним чином виконані розрахунки E_w для інших величин p та n (за умови $p < n$), результати яких наведені в табл. 2 і в графічному вигляді на рис. 4.

Таблиця 2

n	$E_w = f(p, n)$						
	p						
	5	10	20	25	30	40	50
10	11	25	-	-	-	-	-
20	5	12	37	-	-	-	-
25	2	6	25	39	-	-	-
30	-2	0	12	23	37	-	-
40	-8	-12	-12	-8	0	25	-
50	-14	-25	-37	-39	-37	-25	0

Отримані результати показують, що формування двогрупних поїздів не завжди приводить до зменшення простою вагонів під накопиченням. Найбільша економія простою може бути отримана, коли до складу двогрупного поїзда включаються усі наявні вагони призначення, тобто при $p = n$, а максимальна економія досягається при $p = n = m/2$.

Зменшення p відносно n , тобто зростання залишку вагонів у кількості $(n - p)$, зменшує економію простою, а у випадках, коли $z < 0$, може приводити до зростання простою порівняно з одногрупними поїздами. Таким чином, формування двогрупного поїзда може давати економію простою тільки за певних умов, що вимагає відповідних розрахунків в конкретних умовах.

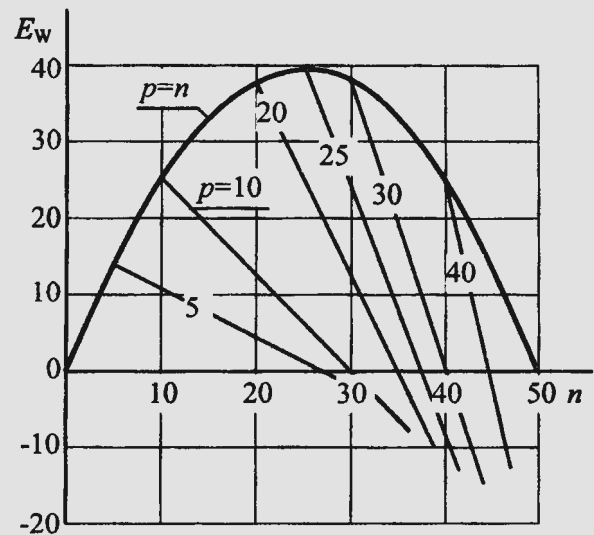


Рис. 4. Залежність економії простою від факторів, що впливають

Звичайно, у формуванні двогрупних поїздів приймають участь два попутних призначення, тому потрібно оцінювати їх сумарну ефективність. З метою аналізу виконані розрахунки ефективності формування двогрупного поїзда з вагонів двох призначень, характеристики яких наведені в табл. 1, а результати розрахунків (за умови $p_1 + p_2 = m$) у числовому вигляді – в табл. 3 і у графічному вигляді – на рис. 5.

Таблиця 3

p_1	z_1	t_{z1}	p_2	z_2	t_{z2}	E_{w1}	E_{w2}	E_w
40	10	1,25	10	-20	-4,0	25	-20	5,0
35	5	0,63	15	-15	-3,0	10,9	-22,5	-11,6
30	0	0	20	-10	-2,0	0	-20	-20
25	-5	0,63	25	-5	-1,0	-7,8	-12,5	-20,3
20	-10	-1,25	30	0	0	-12,5	0	-12,5
15	-15	-1,87	35	5	1,0	-14,1	17,5	3,4
10	-20	-2,5	40	10	2,0	-12,5	40	27,5

Наведені результати показують, що при наявності у двох призначень достатньої кількості вагонів для формування двогрупного поїзда ($n_1 + n_2 \geq m$) максимальна економія простою під накопиченням може бути отримана за умови, коли до складу двогрупного поїзда включається повністю одна з груп, а кількість вагонів іншого призначення визначається з умови $p_1 + p_2 = m$. При цьому потрібно розглядати два випадки: 1) $p_1 = n_1$, $p_2 = m - p_1$; 2) $p_2 = n_2$, $p_1 = m - p_2$. Ефективним слід вважати випадок з більшою величиною економії E_w .

У прикладі, що розглядається, максимальна економія $E_w = 27,5$ ваг-год забезпечується при включенні до складу двогрупного поїзда повної

групи вагонів призначення № 2 ($p_2 = 40$) та $p_1 = 50 - 40 = 10$ вагонів призначення № 1.

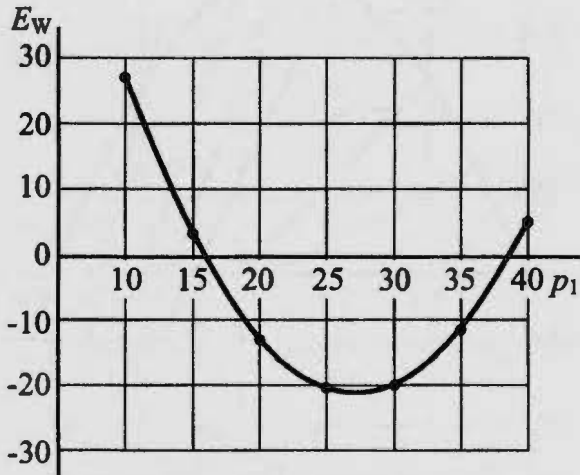


Рис. 5. Залежність економії простою від величини причіпленої групи призначення 1

Зауважимо, що математичний опис процесу та розрахунок його показників виконані для рівномірного у часі надходження вагонів з інтенсивністю λ . Процес накопичення вагонів в реальних умовах можна розглядати як випадковий з дискретними станами, зміна яких відбувається на випадкову кількість вагонів a_i у випадкові моменти часу T_i (рис. 6). На відміну від рівномірного процесу надходження вагонів величина t_z може бути розрахована з використанням даних T_i та a_i наступним чином:

$$t_z = T_k - T_0, \quad (8)$$

де k визначається за умови $\sum_{i=1}^k a_i \geq z$.

В оперативних умовах величина t_z може бути визначена з використанням інформації АСОУП в межах періоду планування ($T_{пл}$) і з використанням середньостатистичних даних надходження вагонів – за межами періоду планування. Методика розрахунку величини t_z та оцінка надійності результатів являють собою задачі, які вимагають відповідних досліджень.

Отримані результати показують, що навіть в умовах рівномірного надходження вагонів економія вагоно-годин накопичення залежить від параметрів поточного стану. В умовах нерівномірного, тим паче випадкового надходження вагонів, слід очікувати більш значного коливання показників простою. Це підтверджують результати моделювання на ЕОМ процесу накопичення вагонів з випадковим їх надходженням. Крім того, результати моделювання співпадають з отриманими за виразом (7).

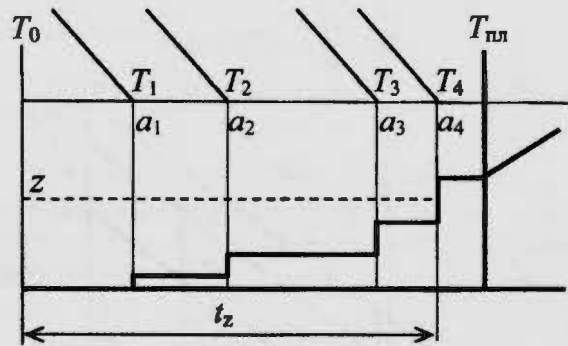


Рис. 6. Розрахункова схема реального процесу накопичення

Методика, яку містить інструкція [1], має дискретний характер і дає однозначну відповідь («так» або «ні») на питання доцільності формування двогрупних поїздів як постійної організації вагонопотоків на визначений період. Між тим, доцільність формування двогрупних поїздів повинна визначатися оперативно, у залежності від параметрів поточного стану та характеру надходження вагонів. Така організація вагонопотоків має неперервний характер з точки зору використання одногрупних і двогрупних поїздів, забезпечує їх оптимальне сполучення за критерієм загальних витрат з урахуванням маневрової роботи і простою поїзних локомотивів на головній станції та станції переміни груп.

Висновки

1. Формування двогрупних поїздів скорочує вагоно-години простою вагонів під накопиченням на технічних станціях.
2. Економія вагоно-годин накопичення внаслідок формування двогрупного поїзда залежить від кількості вагонів суміжних призначень та характеру надходження вагонів.
3. Для розрахунку величини економії вагоно-годин накопичення отримана відповідна формула.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Інструктивні вказівки з організації вагонопотоків на залізницях України. – К., 2005.
2. Ефименко Ю. И. Анализ колебаний часового поступления вагонов по назначениям плана формирования // Сб. научн. тр. – Вып. 274. – ЛИИЖТ, 1967. – С. 167-176.
3. Федотов Н. И. Колебания накопления вагонов в сортировочных парках // Сб. научн. тр. – Вып. 65. – НИИЖТ, 1967. – С. 19-27.
4. Угрюмов А. К. Суточная неравномерность вагонопотоков // Сб. научн. тр. – Вып. 231. – ЛИИЖТ, 1966. – С. 54-84.

Надійшла до редколегії 30.03.2008.

ЦЕЛОЧИСЛЕННАЯ ВЕКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

Запропонований алгоритм для визначення цілочисельного розв'язання задачі векторної оптимізації для опуклих функцій.

Предложен алгоритм для определения целочисленного решения задачи векторной оптимизации для выпуклых функций.

An algorithm for determination of integer solution of the task of vector optimization for convex functions is offered.

Реальные задачи инженерной практики и экономики выдвигают задачи, основной чертой которых является разумное (рациональное) использование ресурсов. Часто требуется, чтобы компоненты решения такого класса задач выражались в целых числах, т. е. были целочисленными. К ним относятся, например, задачи, в которых переменные означают количество единиц неделимой продукции, число станков при загрузке оборудования, число судов при распределениях по линиям, число турбин в энергосистеме, число вычислительных машин в управляющем комплексе и многие другие.

Традиционно задача целочисленного линейного программирования решается методом Гомори или методом ветвей и границ [1, 2].

Рассмотрим задачу векторной оптимизации по двум показателям $f_1(x)$ и $f_2(x)$, где x – из множества целых чисел Z ; $f_1(x)$, $f_2(x)$ – выпуклые функции.

Тогда математическая модель задачи целочисленной векторной оптимизации представляет собой:

$$\begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad (1)$$

а на значение x накладывается условие $x \in X \subseteq Z$.

Изучение решения и устойчивости подобного рода задач рассматривается в [3 – 6].

Рассмотрим одномерный случай и задачу целочисленной оптимизации с одной выпуклой функцией $f(x)$.

Решение задачи может оказаться как целочисленным, так и нет.

Тогда для определения целочисленного решения можно рассмотреть следующий алгоритм

Пусть x^* – решение задачи $f(x) \rightarrow \min$, необязательно целое.

В случае, если x^* – целое, задача решена, иначе целочисленное решение $\lceil x^* \rceil$ будет находиться в интервале $[x^* - 1, x^* + 1]$, см. рис. 1.

Обозначим, через \underline{x}^* – целое решение, которое лежит в интервале $[x^* - 1, x^*]$; \bar{x}^* – целое решение, которое лежит в интервале $[x^*, x^* + 1]$.

Для выбора оптимального решения необходимо выбрать $\min(f(\underline{x}^*), f(\bar{x}^*))$.

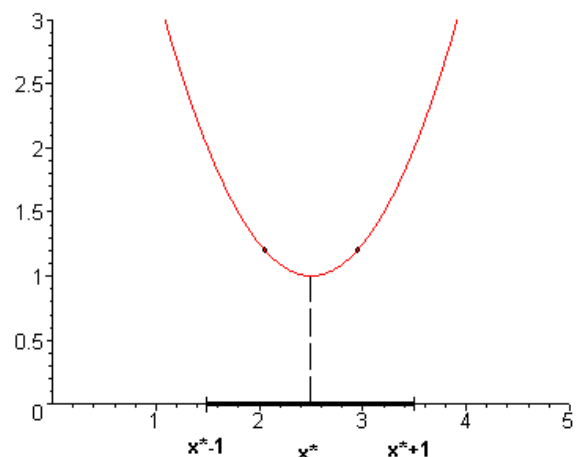


Рис. 1. Интервал определения целочисленного решения

Пусть $x^* \in X$ – решение задачи (1) из множества $X \subseteq R_1$.

Для определения целочисленного решения задачи векторной оптимизации в интервале $[x^* - 1, x^* + 1]$ воспользуемся теоремой 1 из [7].

Для этого сформируем вариационные уравнения:

1. В случае одной переменной интервал поиска целочисленного решения представляет собой рис. 2.,

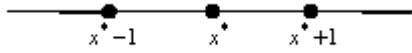


Рис. 2. Интервал определения целочисленного решения в случае одной независимой переменной а вариационные уравнения будут следующими

$$\begin{aligned} f_1(x_1 + 1) - f_1(x_1) - \lambda(f_2(x_1 + 1) - f_2(x_1)) &= 0, \\ f_1(x_1 - 1) - f_1(x_1) - \lambda(f_2(x_1 - 1) - f_2(x_1)) &= 0. \end{aligned}$$

Число уравнений составит 2.

2. В случае двух переменных интервалы поиска целочисленного решения представляет собой рис. 3.

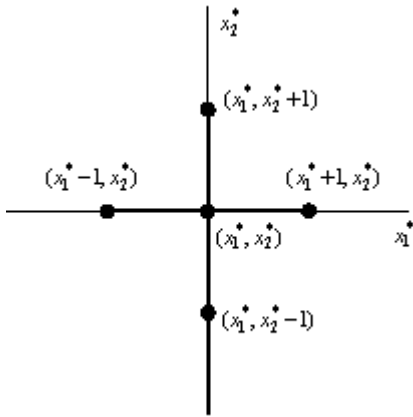


Рис. 3. Интервалы определения целочисленного решения в случае двух переменных

$$\begin{aligned} f_1(x_1 + 1, x_2) - f_1(x_1, x_2) - \\ - \lambda(f_2(x_1 + 1, x_2) - f_2(x_1, x_2)) &= 0; \\ f_1(x_1 - 1, x_2) - f_1(x_1, x_2) - \\ - \lambda(f_2(x_1 - 1, x_2) - f_2(x_1, x_2)) &= 0; \\ f_1(x_1, x_2 + 1) - f_1(x_1, x_2) - \\ - \lambda(f_2(x_1, x_2 + 1) - f_2(x_1, x_2)) &= 0; \\ f_1(x_1, x_2 - 1) - f_1(x_1, x_2) - \\ - \lambda(f_2(x_1, x_2 - 1) - f_2(x_1, x_2)) &= 0. \end{aligned}$$

Число уравнений – 4.

3. Для трех переменных (см. рис. 4).

Число уравнений составит 6 и т. д.

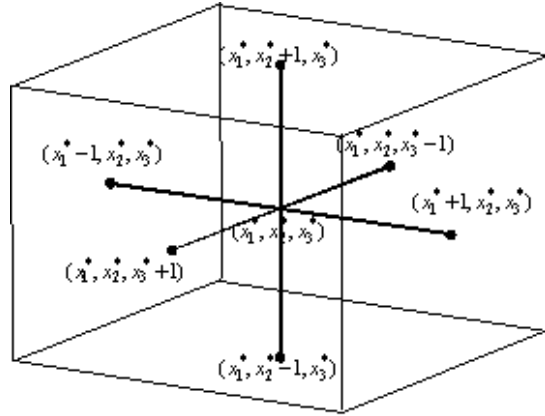


Рис. 4. Интервалы определения целочисленного решения в случае трех переменных

Для n переменных в общем виде вариационные уравнения по x_i компоненте можно записать как

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_i + 1, \dots, x_n) - f_1(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) - \\ - \lambda(f_2(x_1, x_2, \dots, x_i + 1, \dots, x_n) - f_2(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)) &= 0; \\ f_1(x_1, x_2, \dots, x_i - 1, \dots, x_n) - f_1(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) - \\ - \lambda(f_2(x_1, x_2, \dots, x_i - 1, \dots, x_n) - f_2(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)) &= 0. \end{aligned}$$

Число уравнений в данном случае составит $2n$.

Решая данные уравнения для $0 < \lambda < \infty$, получаем множества целочисленных значений по каждой компоненте, которые удовлетворяют решению задачи (1).

Рассмотрим задачу из [8] определения рациональной композиции пассажирского поезда. Математическая модель данной задачи представляет собой задачу векторной оптимизации с линейными ограничениями. Число мест, продаваемых в поезд, может принимать только целочисленное значение. Поэтому задачу можно сформулировать в следующем виде:

Пусть по маршруту следования пассажирского поезда имеется n станций, включая станцию отправления и станцию прибытия. В случае, когда каждый тип вагонов рассматривается независимо, имеем

$f_{ij}(x, t)$ – плотность вероятностей распределения спроса на поездки из A_i в A_j в момент времени t (t – день недели);

$\xi_{ij}(t)$ – математическая модель спроса на поездки из $A_i \rightarrow A_j$ в момент t (при фиксированном t ξ_{ij} – случайная величина);

$y_{ij}(t)$ – число мест, которые могут быть проданы в A_i для поездки в A_j в момент времени t ;

c_{ij} – себестоимость одного места в поезде от станции A_i до A_j ;

p_{ij} – цена билета от A_i до A_j .

Зафиксировав t и рассматривая каждый тип вагонов независимо, функция потерь представляет собой

$$F_1 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} \left(y_{ij} F_{ij}(y_{ij}) - \int_{a_{ij}}^{y_{ij}} x f_{ij}(x) dx \right) + p_{ij} \left(\int_{y_{ij}}^{b_{ij}} x f_{ij}(x) dx - y_{ij} (1 - F_{ij}(y_{ij})) \right).$$

Функция прибыли имеет вид

$$F_2 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(p_{ij} \left(\int_{a_{ij}}^{y_{ij}} x f_{ij}(x) dx + y_{ij} (1 - F_{ij}(y_{ij})) \right) - c_{ij} y_{ij} \right).$$

Желание сделать потери F_1 как можно меньше, а прибыль F_2 как можно больше приводит к задаче векторной оптимизации

$$\begin{pmatrix} F_1(Y) \\ -F_2(Y) \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad (2)$$

при условиях

$$\begin{aligned} \sum_{j=3}^n y_{2j} &\leq y_{12}, \\ \sum_{j=4}^n y_{3j} &\leq y_{13} + y_{23}, \\ &\dots\dots\dots \\ \sum_{j=i+1}^n y_{ij} &\leq \sum_{k=1}^{i-1} y_{ki}, \\ Y &\geq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$Y = (y_{12}, y_{13}, \dots, y_{1n}, y_{23}, y_{24}, \dots, y_{2n}, \dots, y_{n-1n}).$$

Под решением задачи (2–3) будем понимать набор $Y_* \in Z$ (где Z – множество целых чисел), такой, что любое $y_* \in Y_*$ является эффективным.

В качестве алгоритма решения поставленной задачи можно рассмотреть следующий:

1. Определить множества целых значений по каждой компоненте, которые будут удовлетворять решению задачи (2).

2. Решить задачу (2–3), применяя метод параметризации Парето решения, как описано в [9], с учетом принадлежности полученного решения целочисленным множествам, определенных на первом этапе.

Рассмотрим случай с тремя станциями, включая станцию отправления и станцию прибытия.

Пусть спрос распределен по равномерному закону.

Тогда функция потерь представляет собой

$$F_1 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \left(\frac{1}{b_{ij} - a_{ij}} \left((p_{ij} + c_{ij}) \frac{y_{ij}^2}{2} - y_{ij} (p_{ij} b_{ij} + c_{ij} a_{ij}) + \frac{c_{ij} a_{ij}^2 + p_{ij} b_{ij}^2}{2} \right) \right).$$

Функция прибыли будет иметь вид

$$F_2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \left(\frac{p_{ij}}{b_{ij} - a_{ij}} \left(-\frac{y_{ij}^2}{2} + y_{ij} b_{ij} - \frac{a_{ij}^2}{2} \right) - c_{ij} y_{ij} \right),$$

при условии

$$\begin{aligned} y_{12} + y_{13} &\leq N, \\ y_{23} &\leq y_{12}, \end{aligned}$$

где N – общее число мест в поезде (в нашем случае для одного типа мест);

a_{ij} – соответствует минимальному спросу для поездки из $A_i \rightarrow A_j$;

b_{ij} – соответствует максимальному спросу для поездки из $A_i \rightarrow A_j$.

Для определения целочисленного решения задачи (2–3) воспользуемся алгоритмом, описанным выше.

Составим вариационные уравнения, число которых в нашем случае составит 6.

$$\begin{aligned} -F_1(y_{12} - 1, y_{13}, y_{23}) + F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23}) + \\ + \lambda (F_2(y_{12} - 1, y_{13}, y_{23}) - F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23})) &= 0; \\ -F_1(y_{12} + 1, y_{13}, y_{23}) + F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23}) + \\ + \lambda (F_2(y_{12} + 1, y_{13}, y_{23}) - F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23})) &= 0; \\ -F_1(y_{12}, y_{13} - 1, y_{23}) + F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23}) + \\ + \lambda (F_2(y_{12}, y_{13} - 1, y_{23}) - F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23})) &= 0; \\ -F_1(y_{12}, y_{13} + 1, y_{23}) + F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23}) + \\ + \lambda (F_2(y_{12}, y_{13} + 1, y_{23}) - F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23})) &= 0; \\ -F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23} - 1) + F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23}) + \\ + \lambda (F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23} - 1) - F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23})) &= 0; \end{aligned}$$

$$-F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23} + 1) + F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23}) + \\ + \lambda (F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23} + 1) - F_2(y_{12}, y_{13}, y_{23})) = 0.$$

Из которых определяем y_{ij} как функции λ . Т. е. в нашем случае определяем $y_{12}(\lambda)$, $y_{13}(\lambda)$, $y_{23}(\lambda)$.

Перебирая $0 < \lambda < \infty$, находим множества целых значений для каждого из y_{ij} , которые будут являться исходными множествами целых значений для отбора тех решений, которые должны удовлетворять условию (3).

Далее, решаем задачу (2–3) как в [9] с учетом принадлежности полученных решений множествам целочисленных решений, полученных на предыдущем этапе.

Рассмотрим численный пример из [9].

Пусть $n = 3$.

Минимальный спрос на поездки по станциям отобразим в матрице A , каждый элемент которой представляет собой минимальный спрос из i -ой станции (где i – номер строки) до j -ой станции (где j – номер столбца).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 10 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Максимальный спрос на поездки по станциям отобразим в матрице B , каждый элемент которой представляет собой максимальный спрос из i -ой станции (где i – номер строки) до j -ой станции (где j – номер столбца).

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 20 & 35 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

Количество мест в поезде $S = 55$.

Рентабельность принимаем равной 30%, т. е. $\rho = 1,3$.

Цена за проезд из i -ой станции до j -ой станции отобразим в матрице P

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для нашего примера целевые функции имеют вид:

Функция потерь:

$$F_1(y_{12}, y_{13}, y_{23}) = 0.059y_{12}^2 - 1.5897y_{12} + 0.0708y_{13}^2 - \\ - 3.4154y_{13} + 0.0983y_{23}^2 - 1.1966y_{23} + 71.6496.$$

Функция прибыли:

$$F_2 = -0.0333y_{12}^2 + 0.5641y_{12} - 0.04y_{13}^2 + \\ + 1.2615y_{13} - 0.0556y_{23}^2 + 0.3419y_{23} - 4.8889.$$

Ограничения представляют собой

$$\begin{cases} y_{12} \geq y_{23}, \\ y_{12} + y_{13} \leq S. \end{cases}$$

На первом этапе решим задачу (2) без учета ограничений (3) для определения множеств целочисленных значений, решение которой дает следующие множества

$$Y_{12}^* = \{9, 10, 11, 12, 13, 14\};$$

$$Y_{13}^* = \{17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25\};$$

$$Y_{23}^* = \{4, 5, 6, 10, 20, 30, 40, 100\}.$$

На втором этапе решения задачи, с учетом полученных ранее множеств интервалы для выбора целочисленных значений, удовлетворяющих ограничениям (3), представляют собой (рис. 5):

$$y_{12}(\lambda) \in [9, 13];$$

$$y_{13}(\lambda) \in [17, 24];$$

$$y_{23}(\lambda) \in [4, 6].$$

что исключает (при использовании правил округления) для y_{12} число мест – 8; для y_{13} число мест – 16; для y_{23} число мест – 3 (см. решение, полученное в [9]).

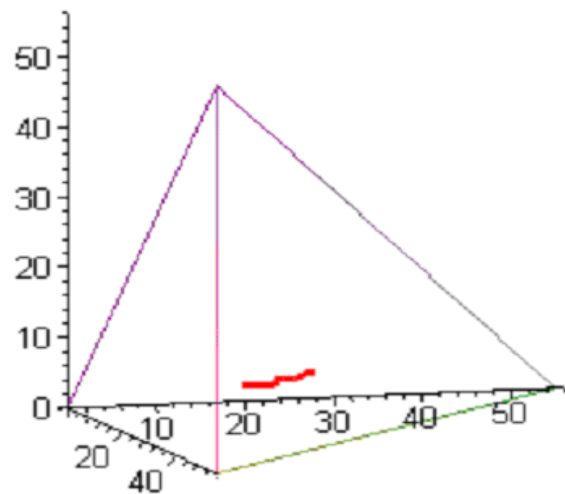


Рис. 5. Решение задачи

Данный метод позволяет определять целочисленное решение задачи векторной оптимизации для целевых функций, которые являются выпуклыми.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акулич И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высш. школа, 1986. – 320 с.
2. Кузнецов Ю. Н. Математическое программирование / Ю. Н. Кузнецов, В. И. Кузубов, А. Б. Волощенко. – М.: Высш. школа, 1980. – 300 с.
3. Сергиенко И. В. О существовании решений в задачах векторной целочисленной оптимизации / И. В. Сергиенко, Т. Т. Лебедева, Н. В. Семенова // Кибернетика и сист. анализ, 2000. – № 6. – С. 39-46.
4. Лебедева Т. Т. Устойчивость векторных задач целочисленной оптимизации: взаимосвязь с устойчивостью множеств оптимальных и неоптимальных решений / Т. Т. Лебедева, Н. В. Семенова, Т. И. Сергиенко // Кибернетика и сист. анализ, 2005. – № 4. – С. 90-100.
5. Лебедева Т. Т. Сравнительный анализ различных типов устойчивости по ограничениям векторной задачи целочисленной оптимизации / Т. Т. Лебедева, Т. И. Сергиенко // Кибернетика и сист. анализ, 2004. – № 1. – С. 63-70.
6. Лебедева Т. Т. Устойчивость по векторному критерию и ограничениям векторной целочисленной задачи квадратичного программирования / Т. Т. Лебедева, Т. И. Сергиенко // Кибернетика и сист. анализ, 2006. – № 5. – С. 63-72.
7. Босов А. А. Векторная оптимизация по двум показателям / А. А. Босов, Г. Н. Кодола, Л. Н. Савченко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 18. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 134-138.
8. Аксенов И. М. Математическая модель композиции пассажирских составов / И. М. Аксенов, Г. Н. Кодола, Е. А. Момот // Залізничний транспорт України, 2005. – № 1. – С. 47-50.
9. Босов А. А. Применение метода параметризации Парето решения в задачах векторной оптимизации к решению задачи определения рациональной композиции пассажирского поезда / А. А. Босов, Г. Н. Кодола // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 94-98.

Поступила в редколлегию 27.03.2008.

А. А. ЕРОФЕЕВ (Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь)

ПОВЫШЕНИЕ ТРАНЗИТНОСТИ В СИСТЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ

Розглянуті напрями оптимізації системи поїздоутворення. Встановлені параметри, що характеризують транзитність при постановці завдання збільшення дальності призначення. Виділені завдання підвищення транзитності для станційного рівня. Розглянута методика визначення потенціалу транзитності для лінійного полігону. Приведений граф варіантів формування потягів підвищеної транзитності та наведений його опис. Як критерії ефективності, що дозволяють проводити порівняння різних варіантів утворення потягів, пропонується використовувати термін доставки кореспонденцій до станцій призначення і витрати на просування кореспонденцій від станції поїздоутворення до станції призначення. Розглянуті варіанти формування призначень. Приведені можливі варіанти поєднання кореспонденцій в призначення. Встановлені ті обмеження, що накладаються на варіанти поїздоутворення: час на просування кореспонденцій і максимальне число призначень, які можуть одночасно накопичуватися на станції.

Рассмотрены направления оптимизации системы поездообразования. Установлены параметры, характеризующие транзитность при постановке задачи увеличения дальности назначений. Выделены задачи повышения транзитности для станционного уровня. Рассмотрена методика определения потенциала транзитности для линейного полигона. Приведен граф вариантов формирования поездов повышенной транзитности и дано его описание. В качестве критериев эффективности, позволяющих производить сравнение различных вариантов образования поездов, предлагается использовать срок доставки корреспонденций до станций назначения и затраты на продвижения корреспонденций от станции поездообразования до станции назначения. Рассмотрены варианты формирования назначений. Приведены возможные варианты сочетания корреспонденций в назначения. Установлены накладываемые на варианты поездообразования ограничения: время на продвижения корреспонденций и максимальное число назначений, которые могут одновременно накапливаться на станции.

Directions of optimization of train formation system are considered. The parameters describing transit traffic at statement of a problem of increase of range of purposes are established. Problems of increase of transit traffic for a station level are allocated. The technique of definition of potential transit traffic for linear range is considered. It is given a number of variants of train formation raising the transit traffic and its description is given. As criteria efficacy allowing to make comparison of various variants of train formation, it is offered to use term of delivery of correspondence to stations of destination and an expenses for delivery of correspondence from stations of train formation to stations of destination. Variants of formation of purposes are considered. Possible variants of a combination of correspondence in purposes are given. It is established superposable restrictions on variants of train formation: time for delivery of correspondence and the maximal number of purposes that simultaneously can be collected at the station.

1. Введение

Оптимизация системы поездообразования возможна в двух основных направлениях:

1. Оптимизация массы Q и длины m поездов с учетом затрат на их накопление, формирование, продвижение и переработку на технических станциях полигона:

$$E = f(Q, m) \rightarrow \min. \quad (1)$$

2. Оптимизация количества и дальности формируемых сквозных назначений для различных параметров нагрузки на транспортную систему:

$$E = f(N, K) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Оба этих направления взаимосвязаны. Увеличение дальности формируемых назначений приводит к сокращению затрат времени и ресурсов при пропуске корреспонденций транзитом через технические станции, но ведет к увеличению продолжительности накопления вагонов на состав. И наоборот, на время нахождения вагонов под накоплением можно влиять путем корректировки массы и длины поезда.

2. Потенциал транзитности в системе поездообразования

Первоочередной задачей системы поездообразования следует считать реализацию потенциала транзитности, который имеется на стан-

циях формирования поездов.

Транзитность при постановке задачи увеличения дальности назначений в системе поездообразования характеризуется следующими параметрами:

- дальность L_{pq} (расстояние следования i -ой корреспонденции без переработки от станции образования p до станции назначения q);
- число технических станций, которые i -ая корреспонденция проходит в поездах без переработки k_{pq} .

Потенциал транзитности – это та доля разницы между величиной дальности корреспонденций и дальности следования поездов, сформированных из этих корреспонденций согласно плана формирования поездов, которую с учетом транспортных ограничений (пропускной способности участков, перерабатывающей способности станционных комплексов) можно реализовать за счет сокращения количества переработок в пути следования.

Задача повышения транзитности для станционного уровня заключается в том, чтобы:

1) определить имеющийся потенциал транзитности вагонотока, перерабатываемого на станции;

2) установить, в какой мере можно использовать этот потенциал для увеличения транзитности вагонотока с учетом перерабатывающей способности станции;

3) определить перечень управляющих решений, которые позволят в соответствии с рассчитанным потенциалом сформировать транзитные назначения.

3. Определение потенциала транзитности

Для расчетов потенциала транзитности в системе поездообразования определим понятие «уровень транзитности». Потенциал транзитности, который может быть реализован в системе поездообразования, зависит в том числе и от плана формирования. Если сформированное на станции новое назначение проходит без переработки одну станцию, такое назначение будем называть **назначением первого уровня транзитности**, а станцию которую оно проследовало без переработки – **транзитной станцией первого уровня**. Если назначение проходит две станции – назначение транзитности второго уровня и станции соответственно первого и второго уровня транзитности.

Станцией второго и большего уровня транзитности не обязательно будет последующая

техническая станция рассматриваемого направления. **Транзитной станцией i -го уровня** будем называть такую станцию, на которую должно следовать сформированное транзитное назначение в соответствии с планом формирования для $(i-1)$ станции направления, но которую сформированный поезд может проследовать без переработки. Таким образом, потенциал транзитности будет зависеть не только от плана формирования начальной станции, но и от плана формирования всех станций, участвующих в переработке рассматриваемого вагонотока.

Определение потенциала транзитности и выбор оптимального плана поездообразования целесообразно производить при помощи графа назначений (рис. 1).

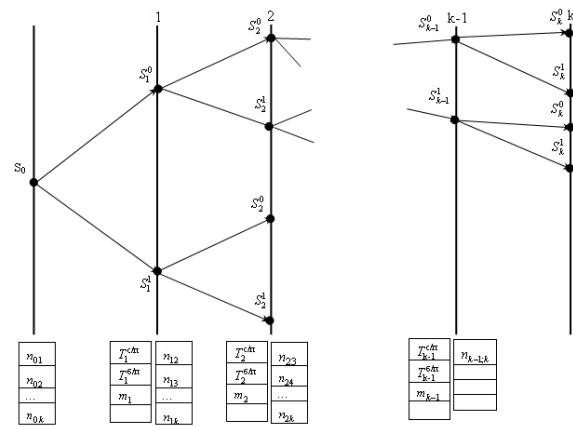


Рис. 1. Граф вариантов формирования поездов повышенной транзитности

Граф вариантов поездообразования описывает одно направление полигона и состоит из k осей. Если сформированное назначение проследует первую ось графа без переработки, такое назначение будем называть транзитным назначением первого уровня. Соответственно, если сформированный поезд проследует станции от 1-й до k -й без переработки, будем называть такое назначение назначением $k-1$ уровня. Количество осей k определяется числом станций, на которых исходный вагоноток проходит переработку на рассматриваемом направлении. Для различных направлений максимальный уровень транзитности будет различным. На графе количество осей k должно соответствовать максимальному уровню транзитности.

Вершинами графа являются технические станции S_i , которые вагоноток в соответствии с существующим планом формирования проходит с переработкой либо без переработки.

Если вагонопоток следует через станцию i без переработки, окончанием ребра графа будет вершина S_i^0 . Если с переработкой – соответственно вершина S_i^1 . Вершины графа определяются планом формирования станций, входящих в рассматриваемое направление.

Для каждой их станций графа определяются затраты на пропуск вагонопотока с переработкой или без переработки. В общем случае к таким затратам относятся простой транзитного вагона на станции с переработкой $T_{c/n}^i$ и без переработки $T_{б/п}^i$. Тогда экономия от проследования одного вагона без переработки через станцию S_i составит $\Delta T_i = T_{c/n}^i - T_{б/п}^i$.

Потенциал транзитности зависит от мощности назначений, которые могут проследовать станцию S_i без переработки. Соответственно, суммарная мощность возможных транзитных назначений $\sum n_{i,i+1}$, которые проследуют станцию S_i будет потенциалом транзитности.

Вершины графа соединены между собой ребрами. Совокупность последовательно связанных ребер, начальной вершиной которой является S_p^1 , а конечной S_q^1 описывают назначение n_{pq} . Назначение характеризуется станцией отправления S_p , станцией назначения S_q и мощностью n_{pq} . Количество станций, которые данное назначение проходит без переработки, определяется числом вершин S_i^0 и называется уровнем транзитности.

Определенный с помощью графа потенциал может быть реализован или не реализован. Если в системе поездообразования транзитное назначение n_i от станции S до S_i было выделено в самостоятельное, будем называть его реализованным. Если выделение назначения в самостоятельное назначения нецелесообразно, будем называть потенциал транзитности нереализованным (но это не означает что потенциал отсутствует).

В соответствии с графом вариантов поездообразования расчет проводится начиная с наиболее дальней струи, станцией назначения которой находится на k -ой оси. Уровень транзитности такой струи будет составлять $(k-1)$. Мощность струи назначением на станцию S_k будет определяться количеством вагонов, участвующих в процедуре планирования поездообразования на станции S_0 и следующих на

значением на станцию S_k , т. е. n_{0k} .

Современные подходы к решению задачи оптимизации системы поездообразования предлагают использовать два критерия: срок доставки и приведенные затраты на передвижение корреспонденций. Сокращение срока доставки можно достигнуть за счет формирования поездов повышенной транзитности, что в некоторых случаях сопряжено с увеличением затрат на накопление состава, следовательно максимальное ускорение перевозки требует, в том числе, и сокращения длины состава.

Срок доставки грузов является ведущим логистическим показателем качества работы транспорта, его конкурентоспособности. Его соблюдение является первостепенным фактором, который должен учитываться в системе поездообразования.

Вариант поездообразования считается приемлемым и может рассматриваться как конкурентоспособный в технико-экономических расчетах, если для всех корреспонденций $\{n_{ij}\}$, участвующих в поездообразовании на станции S , справедливо выражение

$$P\{\max T_{\text{техн}}^{s:j} \leq T_{\text{ю}}^{i:j} - T_{\text{факт}}^{i:s}\} \rightarrow 1, \quad (3)$$

то есть вероятность непревышения нормативного (юридического) срока доставки в соответствии с выбранной технологией поездообразования стремится к единице. Временной критерий участвует в расчетах как основное технологическое ограничение.

В качестве определяющего выступает экономический критерий. При определении оптимального варианта продвижения корреспонденций важно учесть все затраты, связанные с процессом поездообразования. В применяемой в настоящее время методике организации вагонопотоков как оптимальный план формирования, так и оптимальный вариант поездообразования должны обеспечивать минимальные затраты вагоно-часов на накопление и переработку. При этом подразумевается, что через вагоно-часы можно выразить приведенные денежные затраты. Но, по мнению ряда специалистов, существующий критерий оптимизации выражает не более 10 % всех эксплуатационных расходов и 7 % затрат на основные производственные фонды [29].

В связи с этим предлагается использовать стоимостной критерий, рассчитываемый по следующей формуле:

$$\mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{след}} - \Delta E_{\text{нак}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ман}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{пер}} +$$

$$+\Delta\mathcal{E}_{\text{охр}} + \Delta\mathcal{E}_{\text{шт}} - \Delta E_{\text{ож}} \rightarrow \max, (4)$$

где $\Delta\mathcal{E}_{\text{след}}$ – экономия, возникающая при проследовании технических станций без переработки; $\Delta E_{\text{нак}}$ – дополнительные затраты, связанные с накоплением на станции поездообразования; $\Delta\mathcal{E}_{\text{ман}}$ – экономия затрат на маневровые передвижения на технических станциях; $\Delta\mathcal{E}_{\text{пер}}$ – экономия затрат поездных локомотивочасов и бригадо-часов за счет сокращения количества перецепок поездных локомотивов; $\Delta\mathcal{E}_{\text{охр}}$ – экономия от сокращения потребного количества нарядов военизированной охраны; $\Delta\mathcal{E}_{\text{шт}}$ – сокращение выплат за несвоевременный возврат собственных вагонов их владельцами и за несвоевременную доставку грузов; $\Delta E_{\text{ож}}$ – дополнительные затраты, связанные с переносом отправления поезда на более позднюю нитку графика, отправлением локомотива резервом, отправлением бригады пассажирами, отменой поездки бригады.

Экономическая оценка варианта поездообразования $\mathcal{E}_{\text{вар}}$ определяется путем суммирования значений $\Delta\mathcal{E}_{\text{след}}, \Delta\mathcal{E}_{\text{ман}}, \Delta\mathcal{E}_{\text{пер}}$ по корреспонденциям $\{n_{ij}\}$, участвующим в поездообразовании станций полигона планирования, и значений $\Delta E_{\text{нак}}, \Delta\mathcal{E}_{\text{охр}}, \Delta\mathcal{E}_{\text{шт}}, \Delta E_{\text{ож}}$, определяемых в общем для рассматриваемого варианта.

Для струи с максимальным уровнем транзитности производится проверка условия на выделение в самостоятельное назначение. Если условие (4) не выполняется (целевая функция приобретает отрицательное значение), потенциал транзитности струи n_{0k} относительно станции S_{k-1} будем считать нереализованным. Такая струя может усилить транзитное назначение $(k-2)$ -го уровня транзитности. Далее расчет выполняется для остальных струй $(k-1)$ -го уровня транзитности, относительно станции $S_{0;k-1}$.

Совокупность струй $\sum n'_{k-1}$, не выделенных в самостоятельные назначения совместно со струями n_{k-1} образуют потенциал транзитности $(k-2)$ -го уровня (относительно станции S_{k-2}). Мощность транзитных назначений $(k-2)$ -го уровня составит

$$N_{k-1} = x_{k-1} + \sum x'_k. (5)$$

Расчеты по определению потенциала транзитности и эффективности формирования сквозных назначений производятся до тех пор, пока не будут рассмотрены все варианты графа поездообразования транзитных поездов.

Приведенный на рис. 1 граф отображает варианты продвижения корреспонденций конкретного назначения. При этом учитываются затраты на формирование назначения повышенной транзитности без установления всего перечня назначений системы поездообразования. Данный граф не дает представления о возможных сочетаниях формируемых назначений, не отражает суммарной мощности назначений и позволяет проводить сравнение ограниченного числа вариантов формирования назначений повышенной транзитности.

Тем не менее данный граф дает возможность провести расчет эффективности выделения транзитного назначения по сравнению с исходным. В случае, если выделение данного назначения эффективно – предлагаемый план поездообразования может быть принят за исходный и расчетные значения по вновь выделяемым транзитным назначениям сравниваются уже со скорректированным значением.

4. Варианты формирования назначений на станционном уровне

Выделение назначения повышенной транзитности влияет не только на затраты на накопление, но и может привести к необходимости корректировки плана формирования для выделенной станции.

Для примера рассмотрим возможные варианты формирования назначений повышенной транзитности для полигона, состоящего из рассматриваемой станции поездообразования и трех возможных станций назначения S_1, S_2, S_3 . Схема расчета вариантов поездообразования представлена на рис. 2.

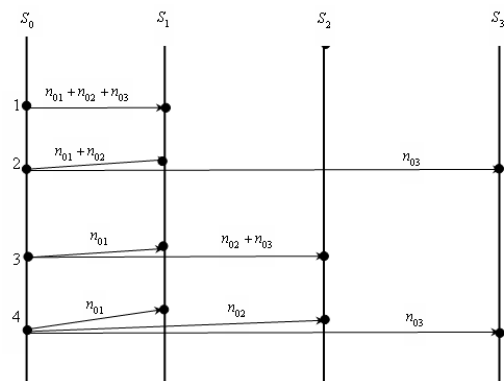


Рис. 2. Схема вариантов поездообразования для полигона из трех станций назначения

В отличие от расчета плана формирования для полигона нет необходимости рассматривать варианты продвижения корреспонденций по всем участкам. Рассматриваются только варианты формирования назначений по выделенной станции.

Первый вариант (исходный) предусматривает продвижение вагонопотока до станций S_1, S_2, S_3 в участковом назначении N_{01} , включающем корреспонденции n_{01}, n_{02}, n_{03} . В общем случае данное назначение не обязательно должно быть участковым, однако для данных расчетов технические станции, находящиеся между S_0 и S_1 во внимание не принимаются (т.к. это ведет к снижению транзитности и при данной постановке задачи не рассматривается).

При втором варианте предлагается выделить в самостоятельное назначение $N_{03} = n_{03}$. При этом ослабляется участковое назначение N_{01} (увеличиваются вагоно-часы простоя под накоплением), требуется дополнительный путь для накопления N_{03} , но возникает экономия от проследования станций S_1 и S_2 без переработки.

При третьем варианте в самостоятельное назначение выделяется назначение $N_{02} = n_{02} + n_{03}$. При его выделении увеличиваются затраты на накопление назначения $N_{01} = n_{01}$, но возникает экономия от проследования без переработки станции S_2 . Потребное количество путей в сортировочном парке станции S_0 как и во втором варианте возрастает на один.

Четвертый вариант предусматривает максимальную реализацию потенциала транзитности (все корреспонденции следуют в сквозных назначениях). При этом увеличивается до максимума продолжительность нахождения вагонов под накоплением на станции S_0 , но и значение экономии в пути следования также является максимальным. Для реализации данного варианта по станции S_0 требуется два дополнительных пути.

Оптимальным будет вариант, дающий максимальное значение целевой функции (2.15). При расчетах принимается, что по участкам $S_1 S_2$ и $S_2 S_3$ идет в соответствии с действующим планом формирования (если вариант поездообразования не предусматривает других условий продвижения).

На выбор вариантов поездообразования на-

кладываются технологические ограничения, которые также снижают размерность задачи:

- суммарное время продвижения корреспонденции от станции отправления до станции назначения не должно превышать юридическое время доставки. Относительно системы поездообразования ограничение накладывается на продолжительность накопления назначения N_{0j} ;
- число одновременно накапливаемых на станции назначений не должно превышать наличного количества путей накопления в сортировочной системе. Варианты, для которых условие $K_{нал}^{сп} \geq K_{потр}^{сп} + K_{спец}^{сп}$ не выполняется, из расчетов исключаются.

Дополнительно могут учитываться ограничения по наличию сквозных ниток в нормативном графике движения поездов, перерабатывающей способности станций назначения (если формирование назначений на эти станции не было предусмотрено исходным планом формирования) и др.

Введение дополнительных ограничений также снижает размерность задачи (окончательное количество вариантов зависит от параметров корреспонденций, полигона и станции поездообразования).

5. Заключение

Повышение транзитности вагонопотоков в системе поездообразования позволяет не только снизить затраты на переработку вагонов на сортировочных станциях, но и ускорить доставку грузов получателям, сократить оборот вагона, сократить потребный парк поездных локомотивов. Рассмотренная выше методика позволяет не только оптимизировать план поездообразования в сторону увеличения транзитности, но и в сторону уменьшения (если это на конкретный момент времени экономически оправдано).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерофеев А. А. Повышение транзитности вагонопотоков / Сб. тр. аспирантов и магистрантов. Вып. 2. – Гомель, 2002. – С. 52-56.
2. Аветикян А. А. Потенциал транзитности вагонопотоков. – М.: Транспорт, 1981. – 191 с.
3. Харитонов А. В. Планирование поездообразования на полигоне // Железнодорожный транспорт, 2000 – № 7. – С. 17-22.

Поступила в редколлегию 20.09.2007.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ (КИНЕМ) РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

Проведено аналіз інформаційних параметрів модуляції зверхнизькочастотних складових (кінем) мовного сигналу для шепоту. Експериментально доведено, що в рівноартикуляційних смугах найбільший індекс куттової модуляції, який обумовлює стохастичність амплітудного спектру потужності фонем, є суттєво більшим за одиницю.

Проведен анализ информационных параметров модуляции сверхнизкочастотных составляющих (кинем) речевого сигнала для шепотной речи. Экспериментально доказано, что в равноартикуляционных полосах максимальный индекс угловой модуляции, который определяет стохастичность амплитудного спектра мощности фонем, существенно больше единицы.

The analysis of informational parameters of modulation of the super-low-frequency speech signal components (kinemas) for whisper speech is realized. It is proved experimentally that in the equiarticulation bands the maximum index of angle modulation that determines the stochasticity of phoneme power amplitude spectrum is much more than one.

Введение. Постановка задачи

В соответствии с законом Украины [1], целью информационной защиты является предотвращение утечки, хищения, утраты, искажения и подделки (имитации) информации. С точки зрения информационной разведзащищенности необходимо акцентировать внимание на информационной составляющей речевого сигнала (РС), которая должна быть сокрыта сигналом маскирования (СМ) в точке несанкционированного доступа технической разведки противника (ТРП).

В соответствии с существующими теориями речеобразования и слуха РС рассматривается и анализируется как информационно связанная совокупность дифференциальных составляющих речи – фонем [2]. Однако данный подход противоречит физиологическому процессу речевого обмена – передаче и приему сведений об образах окружающей действительности, которые передаются, анализируются и идентифицируются словами. Для анализа данного противоречия, которое можно характеризовать как проблему теорий речеобразования и слуха, необходимо провести спектрально-модуляционные исследования информационных составляющих слов – кинем, которые позволят идентифицировать информационные составляющие РС на интервале длительности слова.

Задачей статьи является анализ параметров индекса угловой модуляции и спектральной

плотности мощности информационных сверхнизкочастотных составляющих РС, которые обусловлены движениями активных физиологических артикуляционных органов речеобразующей системы.

Основная часть

Источником акустического РС является артикуляционный аппарат диктора. Он состоит из следующих физиологических органов: бронхов, легких, диафрагмы, трахеи, голосовых связок, гортани, глотки, небной занавески, языка, ротовой и носовой полостей. В процессе синтеза РС воздух, под действием диафрагмы, из легких проходит через трахею, голосовые связки, гортань и затем разветвляется на два потока (рис. 1). Один поток поступает в носоглотку, взаимодействует с носовой полостью и выходит через носовые отверстия. Другой поток, пройдя через ротовую полость, выходит через ротовое отверстие. Воздух, сжатый в легких мышцами грудной клетки, поступает в трахею, перекрытую голосовыми связками, которые представляют собой эластичные мышцы. Под действием потока воздуха и управлением параметра эластичности связки меняют свою форму и площадь отверстия голосовой щели. При синтезе вокализованных звуков голосовые связки вибрируют, создавая, сигнал основного тона (ОТ).

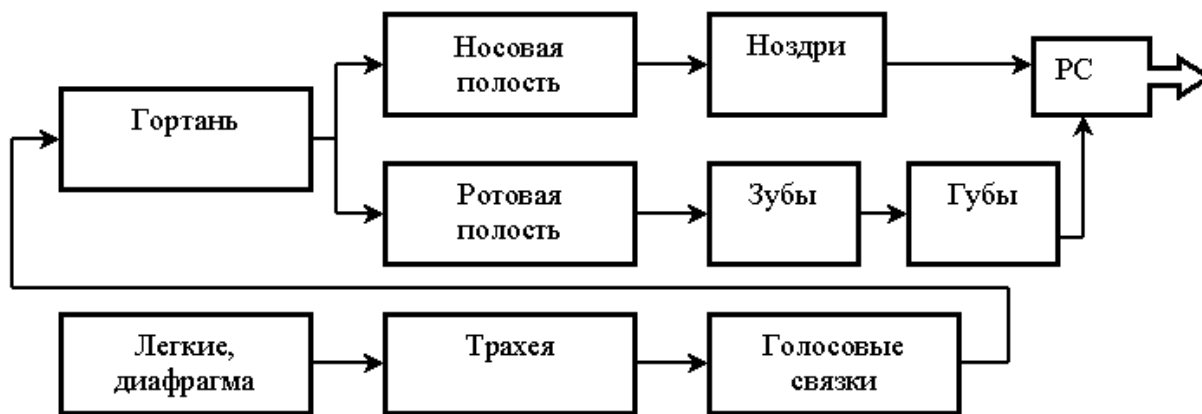


Рис. 1. Функциональная модель артикуляционного аппарата

Невокализованные звуки синтезируются при открытых и неподвижных голосовых связках, под действием физиологического турбулентного шума $S^n(t)$, возникающего в результате прохождения воздушного потока через щели, образуемые артикуляционными физиологическими органами. Сигнал ОТ и турбулентный шум являются несущими сигналами для информационных составляющих РС в воздушной среде. Изменения конфигурации голосового тракта и колебания голосовых связок взаимосвязаны так, что вся артикуляционная система функционирует как единый сложный объект. Одна группа органов – зубы, твердое небо, задняя стенка глотки и носовой полости – участвует в артикуляции пассивно, так как остается неподвижной. Ее можно определить как идентификационную группу артикуляционных органов диктора, в части анализа информации, содержащейся в РС. Другая группа артикуляционных органов – легкие, диафрагма, голосовые связки, нижняя челюсть, губы, язык, мягкое небо, нёбная занавеска, – является активно-информационной, так как в процессе артикуляции осуществляет упорядоченные центральной нервной системой информативные движения. Эти движения физиологических артикуляционных органов русский основатель Казанской лингвистической школы И. А. Бодуэн де Куртенэ объединил [3] общим термином «кинема».

Информационный сигнал кинем $Ki(t)$ является свехнизкочастотным ($f_k < 300\text{Hz}$) и не может быть передан в атмосфере на жизненно необходимые расстояния (за исключением метода сурдопередачи), поэтому в процессе физиологического процесса речеобразования он модулирует несущие сигналы, образованные гармоническими составляющими сигнала ОТ

(процесс вокализации) и физиологического шума, обеспечивая необходимую акустическую мощность РС. К настоящему времени свойства и параметры вокализованного РС рассмотрены и исследованы достаточно подробно [4]. Акцентирование процесса вокализации обосновало вывод о доминирующем информационном значении амплитудной модуляции несущих спектральных составляющих сигнала ОТ, и, соответственно, информационном значении амплитудного спектра плотности мощности РС. Однако форма и параметры сигнала ОТ существенно переменны, потому амплитудный спектр мощности для одних и тех же фонем (слов) отличаются для одного и того же аудитора. Данный факт не позволяет провести модуляционный анализ информационных параметров кинем для вокализованной речи. С целью информационного анализа модуляционных параметров кинем, на данном этапе анализа считаем целесообразным предварительно провести исследования слов, артикулированных «шепотной речью», т.е. РС, в котором отсутствует сигнал ОТ, однако полностью сохраняется информационная составляющая.

Принимая во внимание факт объединения частотных составляющих речи в частотные (равноартикуляционные) группы [5], речевой сигнал $Si(t)$ можно представить как сумму несущих сигналов частотных групп $S^n_{Fi}(t)$, которые модулированы $M_{A,\phi}[S^n_{Fi}(t), Ki_{Fi}(t)]$ информационными составляющими кинем соответствующих частотных групп $Ki_{Fi}(t)$:

$$Si(t) = \sum_{i=1}^k M_{A,\phi}[S^n_{Fi}(t), Ki_{Fi}(t)], \quad (1)$$

где k – количество анализируемых частотных групп РС.

Основываясь на гипотезе фазовой чувствительности рецептора слуха [6], представим сигнал кинем $Ki(t)$ как сумму m гармонических сигналов

$$Ki(t) = \sum_{i=1}^m A_i(t) \cos[\omega k_i t + \beta_i(t) \Psi_i(t)],$$

где выражение под знаком косинуса есть полная фаза, которая является информационным сигналом, т.к. отображает информацию о текущем изменении фазы сигнала кинем. Несущий сигнал физиологического шума $S^n(t)$ классически [4] представляет собой случайный процесс с нормальным законом распределения плотности вероятности амплитуд. Таким образом, сигналы (1) слов шепотной речи можно представить следующим выражением:

$$Si(\omega, t) = S^n(\omega^n, t) \times \sum_{i=1}^m A_i(t) \cos[\omega k_i t + \beta_i(t) \Psi_i(t)], \quad (2)$$

где $\Psi_i(t)$, ωk_i – фазовый угол и угловая частота i -ой кинемы, $\beta_i(t)$ – соответствующий индекс угловой модуляции.

Данный сигнал можно анализировать как широкополосный случайный процесс в полосе несущих тональных частот: ω^l, ω^h – нижняя и верхняя частоты анализируемого РС.

Детерминированной характеристикой данного процесса (2) является средняя мощность $N(\omega, t)$, которая определяется [7] как преобразование Фурье от его автокорреляционной функции $R_{Si}(\tau)$:

$$N(\omega^n, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{Tc} R_{Si}(\tau) \exp(-j\omega^n \tau) d\tau, \quad (\omega^n \in [\omega^l, \omega^h]; \tau \in [0, Tc]), \quad (3)$$

где Tc – анализируемый временной интервал длительности слова.

Однако преобразование Фурье имеет локализацию в частотной области, т.к. его ядро $\exp(-j\omega^n \tau)$ не локализовано во времени τ . В связи с тем, что процесс артикуляции кинем иррегулирован во времени, локализуем преобразование Фурье на временных промежутках конечной длины, которая определяется нижней частотой кинем ωk^l , вводя в процесс преобразования Гэбора [8] окно Гаусса $W_G(\omega^n, T_G)$

с временным интервалом $T_G = \frac{2\pi}{\omega k^l}$, подставляя в (3), получим:

$$N(\omega^n, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{Tc} W_G(\omega^n, T_G) R_{Si}(\tau) \exp(-j\omega^n \tau) d\tau, \quad (\omega^n \in [\omega^l, \omega^h]; \tau \in [0, Tc]) . \quad (4)$$

Экспериментальные исследования проводились с реальными РС, артикулированными из стандартных словесных таблиц профессиональным диктором и сигналами физиологического шума. В качестве демонстрационного компонента РС для данной статьи взято слово «лошадка», в связи с тем, что оно содержит гласные, согласные и взрывные фонемы. Длительность слова 884 мс (8123 отсчетов при частоте дискретизации 44100 Гц).

В первую очередь, с целью корректности применения метода [7], проводился анализ параметров нормальности физиологического шума $S^n(t)$. Результаты анализа (на интервалах времени $T_a = 10$ ms, $\omega^l = 100$ Hz) распределения амплитуд, спектра и автокорреляционной функции позволяют сделать вывод о нормальном законе распределения плотности вероятности амплитуд, и, таким образом о корректности применения метода идентификации огибающей и фазы случайного сигнала.

Анализ спектральной плотности мощности $N(\omega^n, t)$ по выражению (4) проводился в подтональном диапазоне частот $\omega^n < 300$ Hz с временным интервалом окна анализа $T_G = 500$ ms, $\omega k^l = 2$ Hz, которое перемещалось по данным файла анализируемого слова дискретно с шагом $T_d = 11$ ms. Результаты анализа приведены на рис. 2.

На графике зависимости спектральной плотности мощности от частоты и времени видны максимумы в районе $f_k = (12; 25; 125)$ Hz, которые кратны частотам девиации формант [10], что подтверждает корректность полученных результатов. Спектральная составляющая с частотой сети $f = (50)$ Hz является помехой, в связи с тем, что при записи слов применялся аналоговый микрофон. В процессе эксперимента был проведен анализ 200 слов (4 таблицы по 50 слов). Проведя анализ полученных результатов, можно сделать вывод о реальности информационной угловой модуляции кинемами несущих частот физиологического шума.

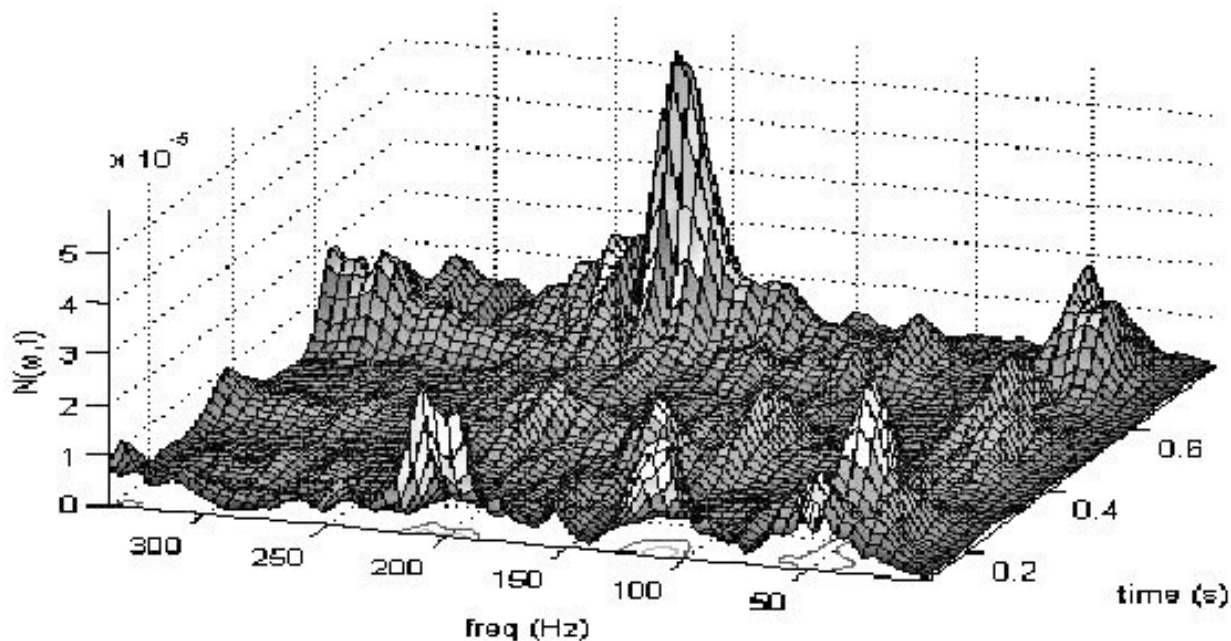


Рис. 2. Результаты анализа временной и частотной зависимости спектральной плотности мощности $N(\omega^n, t)$ слова «лошадка».

Для проведения анализа индекса угловой модуляции кинемами несущих сигналов в частотных (равноартикуляционных) группах [5] сделаем допущение, что на интервале времени анализа T_a огибающая спектра мощности сигнала кинемы, которая является параметром адаптации коэффициента передачи среднего уха, постоянна и равна единице. В этом случае информационная составляющая РС, анализируемая слуховым рецептором, будет определяться девиацией параметра индекса угловой модуляции $\beta(t)$. Демодуляция РС осуществлялась традиционным методом [8], который предусматривает промежуточное вычисление аналитического сигнала при помощи преобразования Гильберта и нахождение аргумента $\Psi_i(\omega_i^n, t)$ исследуемого сигнала.

$$\Psi_i(\omega_i^n, t) = \arg \{ Hil \{ S_i^n(\omega_i^n, t) \times \cos[\omega_k t + \beta_i(t) \Psi_i(t)] \exp(-j\omega_i^n t) \} \}, \quad (5)$$

где $Hil\{*\}$ – вычисление преобразования Гильберта, $\arg\{*\}$ – вычисление аргумента функции.

В связи с тем, что при модуляции кинемами $Ki(t)$ нормального физиологического шума $S^n(t)$ несущая частота ω_i^n информационно флуктуирует возле своего среднего значения, анализ ее девиации осуществлялся оригинальным методом, предусматривающим итерационное вычисление несущих частот кинем (5) по критериям стационарности исследуемого демо-

дулированного аналитического сигнала (постоянства математического ожидания $M[*]$ и дисперсии $D[*]$ с задаваемым диапазоном точности $\pm x$):

$$\left\{ \begin{array}{l} M_m[S_{i_{Fi}}(\omega_i, t)] = M_d[S_{i_{Fi}}(\omega_i, t)] \pm x_{M,d} \\ D_m[S_{i_{Fi}}(\omega_i, t)] = D_d[S_{i_{Fi}}(\omega_i, t)] \pm x_{D,d} \end{array} \right\},$$

где подстрочные прописные индексы m, d относятся к соответствующим процессам модуляции и демодуляции, x_d – параметр допустимого отклонения при демодуляции определялся как $x_{M,d} = 0,05M_m$.

Индекс угловой модуляции в выражении (5) определялся для аналитического сигнала как отношение максимальной девиации аргумента к максимальной девиации несущего сигнала

$$\beta(t) = \frac{\Psi_i^{\max}(\omega_i^n, t) - \Psi_i^{\min}(\omega_i^n, t)}{\pi},$$

где $\Psi_i^{\max}(\omega_i^n, t), \Psi_i^{\min}(\omega_i^n, t)$ – максимальное и минимальное значение аргумента выражения (5) для i -ой частотной полосы. Адекватность метода подтверждена инверсным восстановлением анализируемого слова.

Данные слов анализировались на усредненных временных интервалах фонем (bloc) $T_a = 94$ ms в 19 равноартикуляционных частотных полосах [5] (band). Результаты анализа параметра индекса угловой модуляции $\beta(t)$ слова «лошадка» приведены на рис. 3.

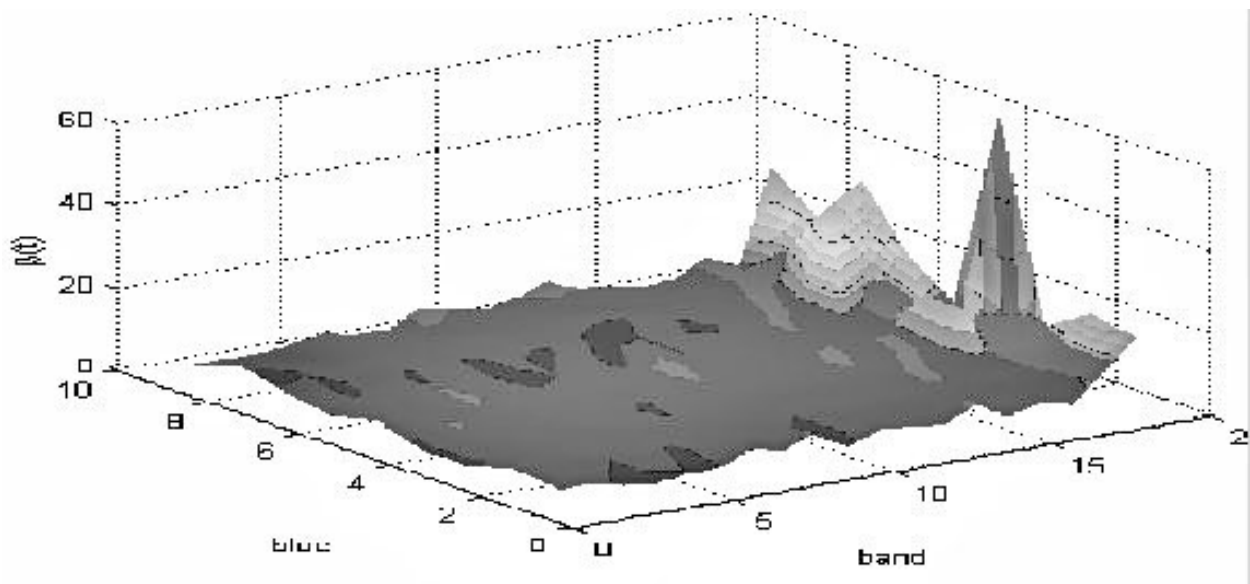


Рис. 3. Результаты анализа зависимости информационного параметра индекса угловой модуляции $\beta(t)$ от частоты (band) и времени (bloc) слова «лошадка», артикулированного шепотной речью.

Максимальные значения параметра $\beta(t)$ наблюдаются в полосе частот первых трех формант, а также высокочастотной области спектра, что хорошо согласуется с результатами ранее проведенных исследований [2, 4].

Для сравнения максимального индекса модуляции были проведены испытания со

словами, которые артикулированы вокализованной речью, в частности на рис. 4 представлена зависимость параметра индекса угловой модуляции $\beta(t)$ от частоты (band) и времени (bloc) слова «лошадка» (длительность 1017 мс), артикулированного вокализованной речью.

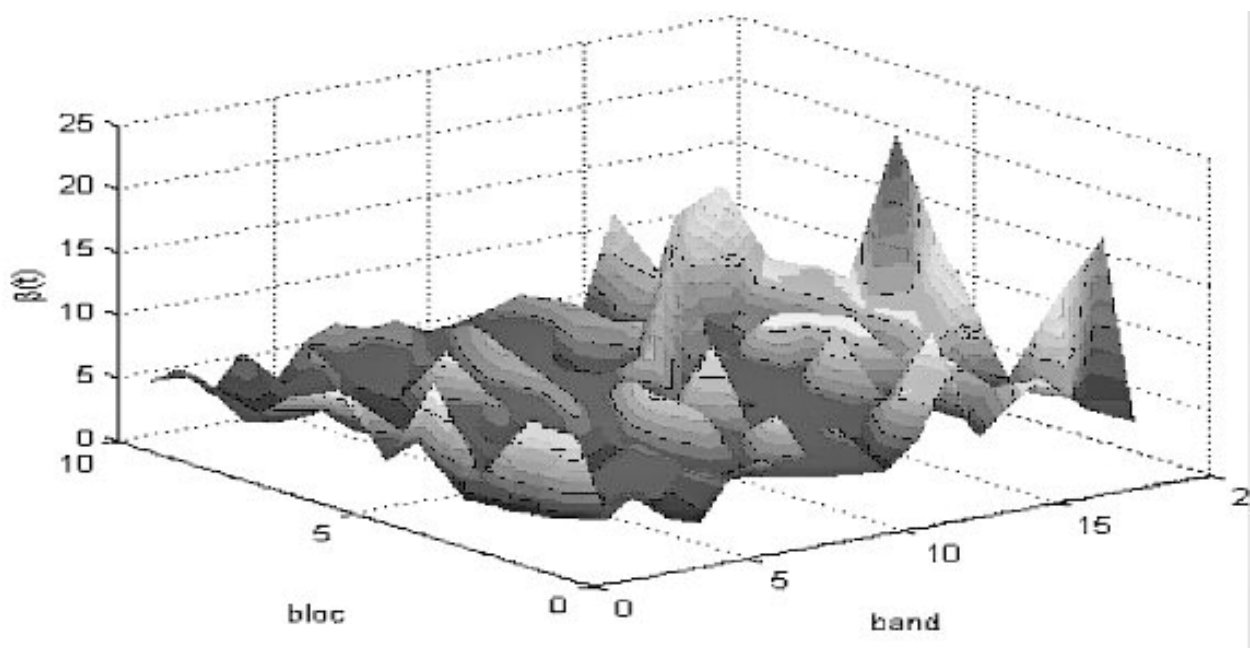


Рис. 4. Результаты анализа зависимости информационного параметра индекса угловой модуляции $\beta(t)$ от частоты (band) и времени (bloc) слова «лошадка», артикулированного вокализованной речью.

Сравнивая рис. 3 и рис. 4, видно, что значение параметра индекса угловой модуляции $\beta(t)$ претерпело значительные изменения: появились максимумы на частотах первых трех фор-

мант, а также значительно уменьшилась амплитуда максимума на частотах пятой форманты. Исходя из анализа индекса модуляции, можно сделать вывод, что спектр сигнала одного и то-

го же слова также значительно изменился. Для выяснения причины столь значительной вариативности спектра проведем анализ ширины спектра в равноартикуляционных полосах. Известно [9], что спектр $S_{\varphi}(\omega, t)$ сигнала с угловой модуляцией определяется как:

$$S_{\varphi}(\omega, t) = A(t) \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} J_i[\beta(t)] \cos(\omega_i^n + i\omega k_i)t, \quad (6)$$

где $J_i[\beta(t)]$ – функция Бесселя 1-го рода порядка i от аргумента $\beta(t)$. Как видно из анализа выражения (6), спектр РС в каждой равноартикуляционной полосе чувствителен к параметру $\beta(t)$ и содержит бесконечное количество составляющих с частотами $\omega_i^n + i\omega k_i$; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Амплитуда i -й составляющей равна $A(t)J_i[\beta(t)]$, т.е. пропорциональна функции Бесселя i -ого порядка от аргумента $\beta(t)$. При индексах модуляции, больших единицы [10], ширина спектра $S_{\varphi}(\omega, t)$ близка к удвоенной девиации частоты кинем $2\omega k$, на границах равноартикуляционных полос происходит суперпозиция спектров сигналов, что и определяет значительную вариативность и неравномерность [11] спектра фонем РС.

Выводы

В процессе анализа исследовались частоты кинем $Ki_F(t)$, частоты девиации несущих частот частотных групп на интервале времени длительности слова, а также максимальные индексы угловой модуляции несущих частот в полосе частотной группы. Исследования проводились со словами, артикулированными как шепотной, так и вокализованной речью.

В результате исследований установлено:

1) Частоты кинем $\omega k_i(t)$ лежат в диапазоне (2...250) Гц, с максимумом (24...30, 60...100) Гц, что хорошо согласуется с нечетными гармониками частоты девиации первых трех формант.

2) Для шепотной речи индекс угловой модуляции $\beta(t)$ несущих частот в полосе частотной группы лежит в диапазоне (0,7...60), максимальное значение индекса модуляции наблюдается в частотных диапазонах первых трех формант и высокочастотной части спектра РС.

3) При индексах модуляции $\beta(t)$, больших единицы, ширина спектра $S_{\varphi}(\omega, t)$ близка к удвоенной девиации частоты кинем $2\omega k$, на границах равноартикуляционных полос происходит суперпозиция спектров сигналов, что определяет значительную вариативность и неравномерность спектра фонем РС как для шепотной, так и для вокализованной речи.

Результаты проведенных исследований позволяют оценить помехоустойчивость РС, а также адаптировать сигнал маскирования по информационным параметрам кинем, что повышает информационную разведзащищенность выделенных помещений от ТРП при анализе в модели угроз корреляционных методов демаскирования РС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДСТУ 3396.2-97. Державний стандарт України. Захист інформації, Технічний захист інформації. Терміни та визначення. – К., 1998. – 12 с.
2. Фланган Дж. Анализ, синтез и восприятие речи: Пер. с англ./ Под ред. А. А. Пирогова. – М.: Связь, 1968. – 396 с.
3. Бодуэн де Куртенэ И. А. Разница между фонетикой и психофонетикой. Избранные труды по общему языкознанию, Т. 2, – М., 1963. – 547 с.
4. Вокодерная телефония. Методы и проблемы. / Под ред. А. А. Пирогова – М.: Связь, 1974. – 536 с.
5. Цвикер Э. Ухо как приемник информации. / Э. Цвикер, Р. Фельдкеллер / Пер. с нем. под ред. Б. Г. Белкина. – М.: Связь, 1971. – 225 с.
6. Журавлев В. Н. Анализ гипотезы фазовой чувствительности слухового рецептора / В. Н. Журавлев, А. Е. Архипов // Тези доп. III Міжн. наук. конф. «Інтелектуальні системи прийняття рішень і прикладні аспекти інформаційних технологій (ISDMIT'2007)» – Євпаторія, 2007.
7. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. – М., 1982. – 624 с.
8. Витязев В. В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учеб. пособие. – СПб., 2001. – 58 с.
9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб., 2003. – 608 с.
10. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
11. Михайлов В. Г. Измерение параметров речи / В. Г., Михайлов, Л. В. Златоустова. – М., 1987. – 168 с.

Поступила в редколлегию 30.03.2008.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ С УЧЕТОМ СТОИМОСТИ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Розроблено уточнену модель розрахунку режимів тяги з урахуванням вартості як активної, так і реактивної енергії в умовах застосування змінних тарифів оплати електроенергії.

Разработана уточненная модель расчета режимов тяги с учетом стоимости как активной, так и реактивной энергии в условиях применения переменных тарифов оплаты электроэнергии.

The improved computation model for traction modes which takes into account the cost of both active and reactive energy in the conditions of application of variable tariffs for payment of electric power is developed.

Введение

Железнодорожный транспорт Украины – один из наибольших в стране потребителей топливно-энергетических ресурсов. Сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности работы железных дорог. Расчет рациональных (по расходу или стоимости энергии) режимов ведения поезда является одним из направлений снижения потребления электроэнергии. В настоящее время все более актуальной становится задача оптимизации режимов движения поезда по критерию минимума стоимости электроэнергии, цена которой в различные периоды суток при различных методах закупки неодинакова. Закупка электроэнергии может производиться по дифференцированным тарифам оплаты, тогда ее стоимость в ночной и пиковый период колеблется более, чем в 7 раз (ночь – 0,25, полу пик – 1,02, пик – 1,8 по отношению к одноставочному тарифу); возможно использование механизма оптового рынка электроэнергии, при котором цена меняется в каждый час суток, а ее вариация составляет до 10 %.

Методика расчета оплаты за электроэнергию

Основная часть электроэнергии потребляется электродвигателями локомотивов. Любой асинхронный электродвигатель является потребителем и реактивной мощности. Для его работы требуется создание переменного магнитного поля, для чего необходим намагничивающий или, как говорят, реактивный ток. При отсутствии компенсирующих устройств в сетях реактивный ток (реактивная мощность) поступает к двигателям из сетей энергоснабжающей организации, и следовательно, подлежит оплате. Поэтому задачу

компенсации реактивной мощности (КРМ) в сети можно рассматривать как задачу энергосбережения. Проблема компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий в последнее время стала актуальнее и острее в связи с внедрением «Методики расчетов платы за перетоки реактивной мощности между электропередающей организацией и ее потребителями» (Министерство топлива и энергетики, приказ № 19 от 17.01.2002) [1].

На основании методики, плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии, определяется по формуле

$$П = П1 + П2 - П3, \quad (1)$$

где $П1$ – основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии; $П2$ – надбавка (при $\text{tg } \phi > 0,25$) за недостаточную оснащенность электрической сети потребителя устройствами КРМ; $П3$ – скидка платы при участии в оптимальном суточном регулировании режимов сети энергоснабжающей организации в расчетный период.

Величина надбавки $П2$ находится в нелинейной зависимости от $\text{tg } \phi$, и при $\text{tg } \phi > 0,6$ может принимать значения, сравнимые с основной платой $П1$ за потребление и генерацию реактивной электроэнергии.

Уменьшение величины $\text{tg } \phi$ за счет применения компенсирующих устройств реактивной мощности на локомотивах – довольно сложная задача, требующая централизованного решения. Эту задачу можно решать путем введения рациональных режимов управления движением поезда с применением критерия минимума расхода реактивной энергии или минимума стоимости потребленной реактивной мощности.

Постановка задачи

Необходимо разработать методику, которая позволит рассчитывать участковые времена хода и их реализацию – режимные карты, оптимальные не только по расходу электроэнергии на тягу, но и по стоимости электроэнергии с учетом переменных тарифов оплаты и расхода реактивной энергии.

Разработка критерия оптимальности

Основой оптимизации перегонных времен хода является математическое моделирование движения поезда. Поезд представлен как гибкая нерастяжимая нить. В качестве метода оптимизации режимов вождения поездов между пунктами остановки при заданном времени хода выступает динамическое программирование в дискретной форме [2].

Предложен и исследован усовершенствованный критерий эффективности движения поездов, который учитывает активную и реактивную составляющую электрической энергии и переменные тарифы на оплату электроэнергии в разные периоды суток.

Целевая функция для оценки закона управления движением поезда на участке $u(x)$ представляет собой функционал (затраты электроэнергии на тягу поезда) [2, 3]:

$$A[u] = \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) dx}{v(x, u)}, \quad (2)$$

где $I_{da}(v, u)$ – активный ток электровоза.

С учетом стоимости электроэнергии (функция $c(t)$ – определяет ценовой коэффициент в зависимости от времени t) при расходе активной и реактивной энергии функция (2) может иметь вид:

$$A[u] = \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot c(t) dx}{v(x, u)} + \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot \sin \varphi(I_{da}(*)) \cdot D \cdot c(t) dx}{v(x, u)} + П2, \quad (3)$$

где первый член отражает стоимость расхода только активной энергии, а второй – стоимость реактивной, D – коэффициент ЕЕРП, который характеризует часть влияния реактивного перетока в точке учета на технико-экономические показатели в расчетном режиме, кВт/квар.; $П2$ – надбавка за недостаточное оснащение средствами компенсации реактивной энергии.

$$П2 = П1 \cdot C_{баз} \cdot (K_{\phi} - 1) \quad (4)$$

$П1$ – основная плата за потребленную и сгенерированную реактивную энергию, второе слагаемое выражения (3), $C_{баз} = 1$ – нормативное базовое значение коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации в сетях потребителя;

K_{ϕ} – коэффициент, который рассчитывают по регламентированной таблице в зависимости от фактического значения коэффициента $\text{tg } \phi$ потребителя в среднем за отчетный период; для тяговых подстанций железнодорожного транспорта переменного тока он равен 1,0, а для постоянного тока = 0,5. Для железнодорожного транспорта переменного тока значение надбавки $П2$ равняется 0.

Целевая функция задачи представляется следующим образом:

$$A[u] = \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot \{\cos \varphi(I_{da}(*)) + D \cdot \sin \varphi(I_{da}(*))\} \cdot c(t) dx}{v(x, u)}. \quad (5)$$

Вычисления ЕЕРП (коэффициент D) выполняются электропоставляющей организацией один раз в два года. Полученные значения ЕЕРП, базового коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации и коэффициента убытков от генерации реактивной мощности из сети потребителя закрепляются в договоре [1].

Моделирование режимов ведения поездов

Для использования уточненного функционала задачи расчета оптимальных по стоимости режимов тяги необходимо знать значения показателя потребления реактивной энергии (мощности), которым является коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Для построения характеристики $\cos \varphi$ были использованы данные из опытных поездок на локомотиве ВЛ-80т. Измеренные зависимости значения $\cos \varphi(I_{da})$ от активного тока локомотива были аппроксимированы кривой вида:

$$f(x) = \frac{A}{B - e^{-Cx}} \quad (6)$$

На рис. 2 представлены точки измеренных во время испытаний значений и кривая их аппроксимации по методу наименьших квадратов.

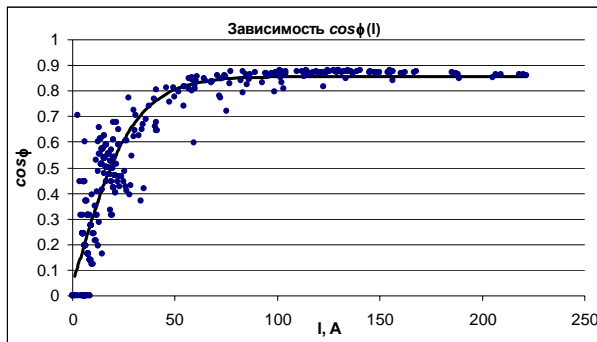


Рис. 2. Аппроксимация функции $\cos \varphi(I_{da})$

Выполнены расчеты управления поездом на участке по уточненной методике [3] с применением дифференцированных тарифов на оплату электроэнергии. На рис. 3 показана зависимость скорости локомотива при оптимизации движения по общему расходу электроэнергии.



Рис. 3. Оптимизация режимов тяги по общему расходу электроэнергии



Рис. 4. Оптимизация режимов тяги по стоимости полного расхода

Можно отметить отличие характера управления поездом при различных критериях оптимизации. В первом – классическом – случае получается минимальный расход электроэнергии (рис. 3). Для второго случая, при дифференцированном тарифе (рис. 3), расход электроэнергии выше, т.к. для уменьшения расхода на оплату потребовалось использовать большее



Рис. 1. Оптимизация режимов тяги с учетом платы за реактивную энергию

количество энергии в зоне с меньшей стоимостью. Для третьего случая на рис. 1 стоимость энергии подсчитана более точно с учетом затрат на использование реактивной энергии, стоимость которой составляет примерно 10 % от тарифа на активную электроэнергию.

Вывод

В ходе исследований показано существенное отличие режимов ведения поезда, оптимальных по стоимостным показателям, от режимов, оптимальных по критерию минимума электропотребления при учете оплаты за использование реактивной мощности.

Разработана уточненная модель расчета режимов тяги с учетом стоимости как активной так реактивной энергии в условиях применения переменных тарифов оплаты электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Про затвердження «Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії». Наказ Міністерства палива та енергетики України № 19 від 17.01.2002; зареєстр. в Міністерстві юстиції України 01.02.2002 р. за № 93/6381.
2. Блохин Е. П. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов / Е. П. Блохин, А. Н. Пшинько, Г. В. Евдомах, В. В. Скалзуб, В. Б. Землянов // Залізничний транспорт України. – № 6, 2001. – С. 19-22.
3. Скалзуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии // Транспорт: Зб. наук. пр. – Вип. 12. – Д., 2002. – С. 148-157.

Поступила в редколлегию 26.07.2007.

М. М. КОЛОС (Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ И РАЗМЕРОВ ПАРКА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ПРОДУКЦИИ РУП «ПО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»

Білорусь є одним із найбільших виробників калійних добрив. Для РУП «ВО «Білоруськалій», як для більшості великих промислових підприємств, ритмічність основного виробництва залежить від своєчасності транспортного обслуговування. У статті розглядається актуальна проблема забезпечення перевезень вагонним парком. Проаналізовані результати фактичного використання вагонів різних власників, визначені розміри економічного ефекту при формуванні власного вагонного парку. Встановлені розміри вагонного парку, виходячи з умов вивезення зазначеного обсягу продукції та дотримання сталійного часу в порту.

Беларусь является одним из крупнейших производителей калийных удобрений. Для РУП «ПО «Беларуськалий», как для большинства крупных промышленных предприятий, ритмичность основного производства зависит от своевременности транспортного обслуживания. В статье рассматривается актуальная проблема обеспеченности перевозок вагонным парком. Проанализированы результаты фактического использования вагонов различных собственников, определены размеры экономического эффекта при формировании собственного вагонного парка. Установлены размеры вагонного парка, исходя из условий вывоза заданного объема продукции и соблюдения сталийного времени в порту.

Belarus is one of the largest manufacturers of potash fertilizers. For “Belaruskaliy”, as for the majority of large industrial enterprises, the main manufacturing rhythmicity depends on the timely transport services. An urgent problem of providing of transportations by the wagon stock is considered in the article. The results of the actual usage of wagons belonging to various owners are analyzed, whereas the economic benefits of forming their own wagon stock are determined. Based upon the conditions of transporting the certain volume of goods and the necessity to observe lay days in a port, the wagon stock size is determined.

Введение

Вопрос целесообразности формирования собственного вагонного парка становится особенно актуальным, когда ритмичность подачи вагонов под погрузку или ритмичность завоза сырья являются залогом стабильности основного производства.

Практика свидетельствует, что крупнейшие предприятия формируют собственный вагонный парк с целью снижения транспортной зависимости от перевозчика, при этом обеспечивается надежность поставок сырья на собственное производство или вывоза готовой массовой продукции.

Для Белорусской железной дороги проблема обновления парка железнодорожного подвижного состава стоит очень остро. Если на начало 2003 года на Белорусской железной дороге 30 % парка грузовых вагонов эксплуатировались с истекшим сроком службы, то по итогам 2006 года их количество возросло до уровня 34,5 % от всего парка дороги.

К настоящему времени ситуация на рынке предоставления вагонов для перевозки характеризуется их недостатком у Белорусской же-

лезной дороги и заинтересованностью российских операторов железнодорожного подвижного состава в новых рынках сбыта собственных услуг, то есть к экспорту собственных транспортных услуг на территории Республики Беларусь.

Вопрос о целесообразности формирования собственного вагонного парка на базе крупнейших предприятий должен рассматриваться не только как путь снижения транспортных издержек и обеспечения непрерывности основного производства, но и как мера, направленная на защиту общегосударственных интересов при организации экспортных поставок [1].

Вагонный парк в системе смешанных перевозок

Географическая отдаленность основных потребителей белорусского калия обуславливает поставку продукции морским транспортом. Для белорусских предприятий-экспортеров отсутствие собственного выхода к морю оборачивается необходимостью транзита по территории иностранных государств и обеспечением перевалки груза на морской транспорт.

Методологическую и теоретическую основу в области взаимодействия различных видов транспорта в транспортных узлах и пунктах перевалки составили труды: Артынова А. П., Воеводского Е. Н., Зильдмана В. Я., Негрея В. Я., Персианова В. А., Постана М. Я., Повороженко В. В., Правдина Н. В., Райя С., Резера С. М., Смехова А. А., Комарова А. В. и других ученых. Работа транспорта с позиций логистики как самостоятельного научного направления была охарактеризована в трудах Смехова А. А., Миротина Л. Б., Ташбаева Ы. Э., Елового И. А., Куренкова П. В., Котляренко А. Ф., Николашина В. М., других ученых.

Вместе с этим, существуют большие трудности в практической применимости теоретических наработок. Реализация аналитических моделей [2–6] требует адекватного отражения взаимосвязей системы, причем число таких связей с появлением новых субъектов хозяйствования в транспортных узлах (стивидорные, тальманские, сюрвейерские, страховые, экспедиторские, транспортные предприятия различных форм собственности) возросло на порядок по сравнению с периодом разработки основных аналитических подходов.

Стохастические модели [7–10], построенные на базе теории массового обслуживания, теории запасов, чаще всего опираются на большое число допущений. Даже сами авторы отмечают «большие аналитические и вычислительные трудности, которые возникают при исследовании таких моделей, связанные с необходимостью оперировать многомерными марковскими процессами и в итоге решать (даже в самых простых случаях) краевые задачи теории функций нескольких комплексных переменных, что требует привлечения нестандартных специальных методов» [10].

Построение имитационной модели [11–13] сопряжено со своими трудностями: требуется составление матрицы всех возможных состояний исследуемой системы, что является процессом трудоемким и продолжительным по времени. За это время в системе может появиться новый объект, что приводит к необходимости почти полностью пересматривать имитационную модель.

Новый виток в изучении и формализации происходящих процессов в пунктах взаимодействия различных видов транспорта с позиций логистики наблюдается в настоящее время.

В работах Смехова А. А. [14, 15] транспорт понимается как существенный элемент логи-

стики, от которого зависит надежность функционирования всей системы. Сформулировано условие развития транспорта с позиций логистики – это соединение экономических интересов отправителя, железной дороги и получателя на базе создания комплексных транспортно-технологических систем.

В работах Николашина В. М. [16, 17] огромное внимание уделяется процессам интеграции участников товародвижения, подчеркивается, что материальные, финансовые, информационные потоки и ресурсы, существующие разрозненно на различных видах транспорта, должны быть связаны при помощи общей системы логистического управления.

В работах Елового И. А. [18, 19] транспортные и производственные системы рассматриваются как единое целое – производственно-транспортная система, обеспечивающая основное требование логистики: обеспечение требуемого объема товаров необходимого качества в нужное время в нужном месте

В работе Куренкова П. В., Котляренко А. Ф. [20] с комплексных позиций анализируются внешнеторговые перевозки, сделана попытка максимально охватить возможное количество факторов, влияющих на функционирование системы доставки внешнеторговых грузов.

Однако в большинстве работ не учитывается, что наиболее заинтересованной стороной в нормальном функционировании системы доставки является отправитель, имеющий наименьшее влияние на управляющие параметры этой системы. Поэтому вопросы формирования вагонного парка в рамках логистической системы доставки минеральных удобрений рассматриваются с позиций предприятия-экспортера продукции.

Общая концепция состоит в необходимости разработки практических принципов оценки структуры и размеров вагонного парка, направленной на максимизацию конечного результата – повышение ценовой конкурентоспособности продукции на рынках сбыта, а рынок транспортных услуг увязывается воедино с рынком товарным.

Таким образом, формирование системы доставки минеральных удобрений РУП «ПО «Беларуськалий» должно основываться на применении логистических принципов [21]. Вагонный парк при этом обуславливает формирование транспортного потока в порожнем или груженом состоянии. Он является необходимым связующим звеном и должен обеспечивать с одной стороны вывоз продукции с промышленного предприятия, с другой – ритмичность взаимодействия желез-

нодорожного и морского транспорта в смешанном сообщении.

Оценка эффективности формирования собственного вагонного парка для перевозки минеральных удобрений

На период исследований (2004-2006 гг.) система транспортного обслуживания РУП «ПО «Беларуськалий» характеризовалась недостаточностью собственного вагонного парка, необходимого для вывоза продукции. Белорусская железная дорога также не могла обеспечить подачу под погрузку достаточного количества специализированного подвижного состава для перевозки минеральных удобрений [22].

В таких случаях возможен ряд оперативных вариантов компенсации дефицита вагонов. Например, привлечение неспециализированных вагонов собственности железной дороги для перевозки минеральных удобрений, в частности, хопперов-зерновозов и хопперов-цементовозов. Техническая норма загрузки хоппера-цементовоза минеральными удобрениями на 10 тонн ниже, чем при загрузке вагона-минераловоза. Из-за зависимости тарифной ставки от загрузки вагона (весовой категории), целесообразность привлечения вагонов-цементовозов ограничивается повышенными тарифными ставками железных дорог (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчета провозных платежей

Маршрут	Расстояние, км	Техническая норма загрузки, т	Затраты на перевозку, USD/т
Калий-3 – Вентспилс	587	60	10,61
		50	12,16
Калий-3 – Николаев	397	60	7,51
		50	8,60
Калий-3 – Клайпеда	274	60	5,36
		50	6,14

Конструкция выгрузочного узла вагона-зерновоза рассчитана на легкоистекаемый, неслеживающийся груз. Использование вагонов-зерновозов для перевозки минеральных удобрений приводит к увеличению продолжительности выгрузки вагона из-за слеживаемости груза с последующим сводообразованием при выгрузке.

Еще одним вариантом может являться привлечение к перевозке на условиях аренды вагонов, принадлежащих железным дорогам других государств или экспедиторам-нерезидентам Республики Беларусь. Однако, зависимость от иностранных компаний-операторов при обслуживании основных валютообразующих экспортных потоков негативно сказывается на экономических интересах государства в целом.

На основании обработки статистических данных проанализировано количество рейсов, приходящихся на один вагон рабочего парка. Построены гистограммы (рис. 1), показывающие фактическую интенсивность использования вагонов различных собственников при перевозке продукции РУП «ПО «Беларуськалий».

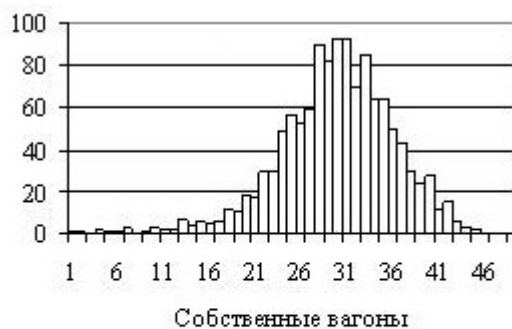


Рис. 1. Гистограммы распределения годового количества рейсов вагонов

Анализируя полученные характеристики распределения количества выполненных рейсов и гистограммы, можно сделать вывод о наиболее интенсивном использовании собственных

вагонов. Из всех эксплуатируемых вагонов собственные имеют наибольшее среднее значение выполненных рейсов – 29,83 рейса за год, при наименьших значениях дисперсии выборки. Это объясняется тем, что вагоны принадлежности РУП «ПО «Беларуськалий» не имеют жесткой привязки к какому-либо направлению или роду перевозимого груза.

Основные статистические характеристики количества рейсов, выполненных вагоном за год, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения статистических характеристик

Статистические характеристики выборки	Собственные вагоны	Арендные вагоны	Вагоны железных дорог
Среднее	29,83	26,82	10,30
Дисперсия выборки	40,08	119,25	97,25
Среднее квадратичное отклонение	6,33	10,92	9,86
Коэффициент вариации	0,21	0,41	0,96
Мода	30,00	33,00	1,00
Медиана	30,00	30,00	7,00
Максимум	45,00	49,00	43,00
Минимум	1,00	1,00	1,00

Зарубежные экспедиторские фирмы, которые являются арендодателями специализированных вагонов, часто могут являться совладельцами стивидорных компаний или представляют их интересы. Поэтому, предоставляя вагоны в аренду, такие арендодатели оговаривают количество вагонов, «привязанных» к интересующему их направлению. Таким образом, направления курсирования арендованных на таких условиях вагонов ограничены. Это вызывает дополнительные простои в ожидании погрузки и ведет к снижению интенсивности использования такого вагонного парка, что подтверждается повышенным значением дисперсии выборки 119,25 рейсов против 40,08 рейсов при эксплуатации собственных вагонов.

Вагоны собственности железных дорог – это в основном вагоны-цементовозы, которые используются только как исключительная мера компенсации дефицита вагонного парка из-за более высокой стоимости транспортировки

вследствие низкой статической нагрузки таких вагонов. Это подтверждается тем, что для таких вагонов среднее значение составляет 10,3 рейсов при моде, равной 1 рейсу.

Обобщая результаты проведенных исследований по фактическому использованию вагонов различных собственников для перевозки минеральных удобрений, можно сделать вывод о том, что собственные вагоны используются наиболее интенсивно. Более эффективное использование вагонов собственного парка становится возможным из-за отсутствия ограничений по направлениям следования в сравнении с арендованными вагонами. По сравнению с вагонами парка железных дорог – собственные вагоны являются более специализированными, подготовленными к перевозке конкретного груза, обеспечивающими большую сохранность и минимизацию продолжительности грузовой операции.

Эффективность формирования собственного вагонного парка для перевозки продукции характеризуется приростом чистой прибыли, которая определяется положительными и (или) отрицательными результатами в трех сферах деятельности: инвестиционной, операционной и финансовой.

В составе инвестиционной деятельности отражаются расходы, связанные с приобретением вагонов, их последующей специализацией, модернизацией. Операционная деятельность отражает экономию текущих эксплуатационных расходов и потерь, обусловленных последующей эксплуатацией собственных вагонов по сравнению с применением вагонов общего парка железной дороги. В составе финансовой деятельности отражаются доходы от рефинансирования дополнительной прибыли, которая может быть получена за счет применения собственных вагонов-минераловозов (табл. 3).

Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что использование для перевозок минеральных удобрений РУП «ПО «Беларуськалий» собственных вагонов экономически обосновано и дает прирост чистой прибыли от 1,59 до 5,45 USD/ваг.-сут.

Целесообразность использования собственных специализированных вагонов подтверждается положительными результатами, полученными как при анализе показателей фактического использования вагонов, так и по результатам расчета экономической эффективности формирования собственного вагонного парка.

Определение необходимого количества подвижного состава

Необходимое количество подвижного состава определяется, исходя из двух условий:

- по условию обеспечения завоза заданного объема грузов в порты;
- по условию соблюдения стальной нормы времени.

Таблица 3

Результаты расчета эффективности формирования собственного вагонного парка

Наименование расходов и доходов	Результат, USD/ваг.-сут.
Приобретение вагонов	-5,21...-3,31
Итого по инвестиционной деятельности	-5,21...-3,31
Минимизация потерь от несортировки груза или его порчи	0,48
Сокращение платы за пользование вагонами	4,47
Сокращение оборотных средств	0,39
Снижение величины провозных плат	12,13
Затраты на содержание и эксплуатацию собственных вагонов	-5,73
Амортизационные отчисления от стоимости собственных вагонов	-5,21...-3,31
Увеличение выплат налога на имущество	-0,09...-0,04
Итого по операционной деятельности	6,44...8,39
Доход от рефинансирования дополнительной прибыли	0,36...0,37
Итого по финансовой деятельности	0,36...0,37
ВСЕГО	1,59...5,45

Необходимое количество подвижного состава для транспортировки заданного объема грузов в направлении i -го порта определяется по формуле

$$N_i^{\text{объем}} = \frac{Q_i \Theta_i}{(365 - T_{\text{рем}}) P_{\text{ст}}^i}, \quad (1)$$

где Q_i – объем продукции РУП «ПО «Беларуськалий», перегружаемый в i -ом порту, тонн; Θ_i – оборот вагона в направлении i -го порта,

сут; $T_{\text{рем}}$ – продолжительность нахождения вагона в ремонте, сут; $P_{\text{ст}}^i$ – статическая нагрузка вагона на направлении i -го порта, т/вагон.

Срок оборота вагонов является одним из наиболее общих критериев эффективности работы системы доставки и одним из наиболее важных параметров, от которого зависят размеры вагонного парка.

По второму условию размер вагонного парка не должен лимитировать продолжительность стоянки судна в порту. Стальной нормой времени определяется ответственность порта за стоянку судна и зависит от нормативного времени, затрачиваемого на грузовые работы.

Время обработки судна на перегрузочном комплексе рассчитывают делением массы груза на норму погрузки для установленной номенклатуры грузопотока. В общем случае, значение нормы погрузки i -го грузопотока зависит от грузоподъемности (дедвейта) судна и мощности перегрузочного оборудования

$$H_i = f(Q_{DWT}, W_{\text{пер}}), \quad (2)$$

где H_i – норма погрузки для i -го груза, т/сутки; Q_{DWT} – дедвейт судна, т; $W_{\text{пер}}$ – мощность перегрузочного оборудования, т/сутки.

За превышение стальной нормы времени порт выплачивает владельцу судна штраф – демерредж. Однако, если задержка в обработке судна произошла по причинам, зависящим от грузо-владельца, то этот штраф относится на ответственность грузо-владельца. Чаще всего это происходит из-за невозможности грузо-владельца обеспечить ритмичный подвод груза в порт для перевалки.

Для осуществления дальнейших расчетов целесообразно перейти от значений мощности перегрузочного оборудования к показателям интенсивности перевалки по вариантам «вагон-судно» и «склад-судно», которые учитывают влияние погодных условий в портах разных бассейнов, перерывы в работе на технологические операции, профилактику оборудования, продолжительность перезарядки железнодорожного фронта выгрузки.

Проведенные исследования [22] показали, что на специализированных терминалах по перевалке калийных удобрений в портах Клайпеда, Вентспилс, Николаев (табл. 4), соблюдается следующее неравенство:

$$\lambda_{\text{ваг-суд}} < H < \lambda_{\text{скл-суд}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{скл-суд}}$, $\lambda_{\text{ваг-суд}}$ – соответственно интенсивность перегрузки груза со склада на судно и из вагона на судно, т/сутки.

Таблица 4

Сравнительный анализ соотношений интенсивности перегрузки груза и норм погрузки

Показатель	Порт Клайпеда, терминал KLASCO	Порт Клайпеда, терминал ВКТ
Мощность перегрузочного оборудования $W_{\text{пер}}$, т/час	1500	700
Интенсивность перевалки груза из вагона на судно $\lambda_{\text{ваг-суд}}$, т/сутки	5940	5280
Суточная норма погрузки H , т/сутки	20000	6000
Интенсивность перевалки груза со склада на судно $\lambda_{\text{скл-суд}}$, т/сутки	25200	11760

В большинстве случаев интенсивность погрузки груза по варианту вагон-судно определяется не мощностью перегрузочного оборудования, а резервами пропускной и перерабатывающей способности станции примыкания, подъездного пути, железнодорожной инфраструктуры самого порта и перегрузочного терминала, организацией работы на рассматриваемом направлении, количеством задействованных на направлении вагонов [22].

С учетом ограничений по размерам складов в порту и заинтересованности в более коротких сроках оборачиваемости средств, обуславливается такая технология перевалки, когда за стальнойное время организуется сгущенный подвод вагонов и перевалка по варианту «вагон-судно», а в перерывах между подачами вагонов или из-за их отсутствия – перевалка по варианту «склад-судно». Необходимое количество вагонов для обеспечения такой работы определяется по формуле

$$N_i^{\text{время}} = \frac{\Theta_i \lambda_{\text{ваг-суд}} (\lambda_{\text{скл-суд}} - H)}{P_i^{\text{ст}} (\lambda_{\text{скл-суд}} - \lambda_{\text{ваг-суд}})}. \quad (4)$$

График, отображающий результаты расчета необходимого количества вагонов по двум условиям, приведен на рис. 2. Необходимость наличия меньшего количества вагонов с ростом нормы погрузки объясняется тем, что для соблюдения стальнойного времени в этом случае

большая часть груза должна перерабатываться по варианту «склад-судно».

Методика определения значения $N_i^{\text{время}}$ [23] увязывает важнейшие технологические параметры: грузоместимость судна, размеры складских емкостей в порту, способность порта принимать суда с определенным дедвейтом, количество вагонов на направлении и срок их оборота. Это позволяет оптимизировать параметры грузопотока, направляемого в порт в оперативном режиме, избежать штрафных санкций за сверхнормативный простой судна, сократить затраты, связанные с омертвлением оборотных средств.

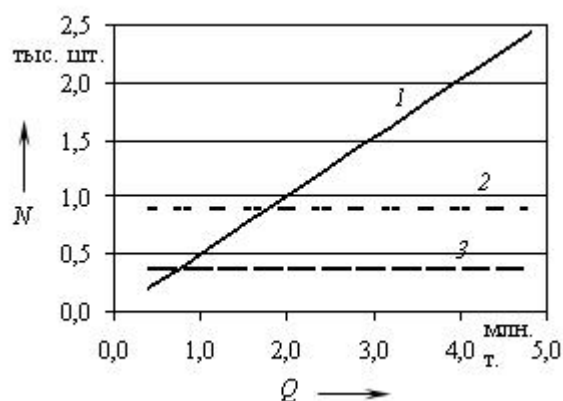


Рис. 2. Результаты определения необходимого количества вагонов:

1 – по условию обеспечения перевозки заданного объема грузов; 2 – по условию соблюдения стальнойного времени при $H = 8$ тыс. т/сут; 3 – по условию соблюдения стальнойного времени при $H = 18$ тыс. т/сут

Заключение

Целесообразность формирования собственного вагонного парка на базе крупных предприятий обусловлена не только уменьшением транспортных издержек для отдельно взятого предприятия, но и направленностью на снижение импорта транспортных услуг и защиту общегосударственных интересов.

Вопросы формирования вагонного парка в рамках логистической системы доставки минеральных удобрений рассматриваются с позиций предприятия-экспортера продукции и направлены на разработку практических принципов оценки структуры и размеров вагонного парка.

Анализ фактического использования вагонного парка при перевозках продукции РУП «ПО «Беларуськалий» позволяет сделать вывод о наиболее эффективном использовании собственных вагонов по сравнению с вагонами парка железных дорог и арендованными вагонами.

Результаты технико-экономической оценки целесообразности формирования собственного вагонного парка позволяют сделать вывод о том, что эта мера экономически обоснована и дает прирост чистой прибыли от 1,59 до 5,45 USD/ваг.-сут.

Научная новизна работы состоит в том, что размеры необходимого вагонного парка определяются, исходя из условий обеспечения завоза заданного объема грузов в порты и соблюдения стальной нормы времени, что позволяет увязать важнейшие технологические параметры системы доставки, как в части железнодорожной перевозки, так и в части работы порта перевалки и флота.

Оценка целесообразности формирования собственного парка вагонов, проведенная на примере РУП «ПО «Беларуськалий», является применимой и для других крупных промышленных предприятий-экспортеров Республики Беларусь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еловой И. А. Создание компаний операторов в Республике Беларусь / И. А. Еловой, М. М. Колос // Менеджмент и маркетинг: опыт и проблемы. Сб. науч. тр. – Вып. 6 / Под общ. ред. И. А. Акулича. – Минск: Право и экономика, 2004. – С. 166-168.
2. Воеводский Е. Н. Управление системой обслуживания судов в портах. – М.: Транспорт, 1983. – 207 с.
3. Резер С. М. Комплексное управление перевозочным процессом в транспортных узлах. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
4. Смехов А. А. Автоматизация управления транспортно-складскими процессами. – М.: Транспорт, 1985. – 239 с.
5. Правдин Н. В. Взаимодействие различных видов транспорта: Примеры и расчеты / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев / Ред. Н. В. Правдин. – М.: Транспорт, 1989. – 208 с.
6. Воеводский Е. Н. Стохастические модели в проектировании и управлении деятельностью портов / Е. Н. Воеводский, М. Я. Постан. – М.: Транспорт, 1987. – 318 с.
7. Гнеденко Б. В. Введение в теорию массового обслуживания. Изд. 2-е, доп. и перераб. / Б. В. Гнеденко, Н. Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987.
8. Прабху Н. Стохастические процессы теории запасов. – М.: Мир, 1984. – 185 с.
9. Воеводский Е. Н. Классификация стохастических моделей взаимодействия встречных транспортных потоков: Информационные и математические модели процессов функционирования транспортных систем / Е. Н. Воеводский, М. Я. Постан. – К.: Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова АН УССР, 1987. – С. 59-64.
10. Постан М. Я. Вероятностные модели взаимодействия потоков грузового транспорта в перевалочных пунктах и их применение // Транспорт: наука, техника, управление: Сб. ОИ / ВИНТИ, 1991. – № 11. – С. 2-11.
11. Васильченко А. И. Прогнозирование подвода вагонов под выгрузку в морские порты // Автоматизация процессов взаимодействия транспортных систем. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. – С. 62-70.
12. Артынов А. П. Программный моделирующий комплекс для исследования транспортных систем: структура и модели объекта управления: Препринт / А. П. Артынов, Г. А. Кондратьев. – Владивосток: ИАПУ ДВО АН СССР, 1988. – 35 с.
13. Артынов А. П. Автоматизация процессов планирования и управления транспортными системами / А. П. Артынов, В. В. Скалецкий. – М.: Наука, 1981. – 280 с.
14. Смехов А. А. Введение в логистику. – М.: Транспорт, 1993. – 112 с.
15. Смехов А. А. Логистический подход к установлению уровня тарифов // Железнодорожный транспорт, 1996. – № 5. – С. 55-57.
16. Логистические транспортно-грузовые системы: Учебник / Под ред. В. М. Николашина. – М.: Изд. центр «Академия», 2003.
17. Николашин В. М. Теоретические основы логистических технологий (Учебное пособие). – М.: МИИТ, 2004.
18. Еловой И. А. Основные показатели эффективности транспортно-технологических систем // Транспорт: наука, техника, управление: Сб. ОИ / ВИНТИ, 2001. – № 10. – С. 34-37.
19. Еловой И. А. Эффективность логистических транспортно-технологических систем (теория и методы расчетов). Ч. 1, 2. – Гомель: БелГУТ, 2000. – 536 с.
20. Куренков П. В. Котляренко А. Ф. Внешнеторговые перевозки в смешанном сообщении. Экономика. Логистика. Управление. – Самара: СамГАПС, 2002. – 636 с.
21. Колос М. Анализ систем доставки калийных удобрений ПО «Беларуськалий» с позиций логистики // Transport (Научный журнал Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса и Академии наук Литвы), 2006. – т. XXI, No. 4. – Р. 286-288.
22. Совершенствование транспортно технологических систем доставки продукции РУП «ПО «Беларуськалий» с участием железнодорожного транспорта: Отчет о НИР № 3397 / Белорус. гос. ун-т трансп.; рук. Еловой И. А.; исп. Колос М. М. и др. – Гомель, 2005. – 200 с.
23. Колос М. М. Формирование логистической системы доставки минеральных удобрений // Вестник транспорта, 2007. – № 8. – С. 26-30.

Поступила в редколлегию 19.03.2008.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ / АУТЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Розглянута організація підсистем ідентифікації / аутентифікації в інформаційних системах, виконано аналіз їх недоліків. Показана доцільність використання систем генерації одноразових паролів. Описано програмне забезпечення комплексу генерації одноразових паролів, проведено дослідження його характеристик (часового вікна та вимог до апаратної бази).

Рассмотрена организация подсистем идентификации / аутентификации в информационных системах, выполнен анализ их недостатков. Показана целесообразность использования систем генерации одноразовых паролей. Описано программное обеспечение комплекса генерации одноразовых паролей, проведено исследование его характеристик (временного окна и требований к аппаратной базе).

The identification / authentication subsystem architecture of information systems is considered; the analysis of their demerits is done. Advisability of using the onetime passwords generation systems is shown. The software complex of onetime passwords generation is described; the research of their characteristics (the time window and hardware requirements) is performed.

Сьогодні все більшого значення набувають питання інформаційної безпеки. Електронні способи ідентифікації людини, застосовувані в системах забезпечення санкціонованого допуску до матеріальних і інформаційних ресурсів, одержали в цей час широке поширення. Існують декілька відмінних принципів ідентифікації та аутентифікації користувачів. У кожного з них є свої переваги й недоліки, тобто немає єдиної технології для використання в усіх системах. Тому перед розроблювачами програмного та апаратного забезпечення встає питання вибору способу ідентифікації. Дана робота присвячена розробці та дослідженню комплексу ідентифікації користувачів інформаційних систем (ІС).

СПОСОБИ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА АУТЕНТИФІКАЦІЇ

Кожен користувач ІС повинен ідентифікувати себе. Звичайний спосіб ідентифікації - введення імені користувача при вході в систему. У свою чергу, система повинна перевірити дійсність особистості користувача, тобто що він є саме тим, за кого себе видає. Аналізуючи засоби ідентифікації та аутентифікації можна виділити три основних способи ідентифікації. В основному [1, 2, 3] способи ідентифікації класифікують за факторами, що використовуються для ідентифікації (рис. 1).

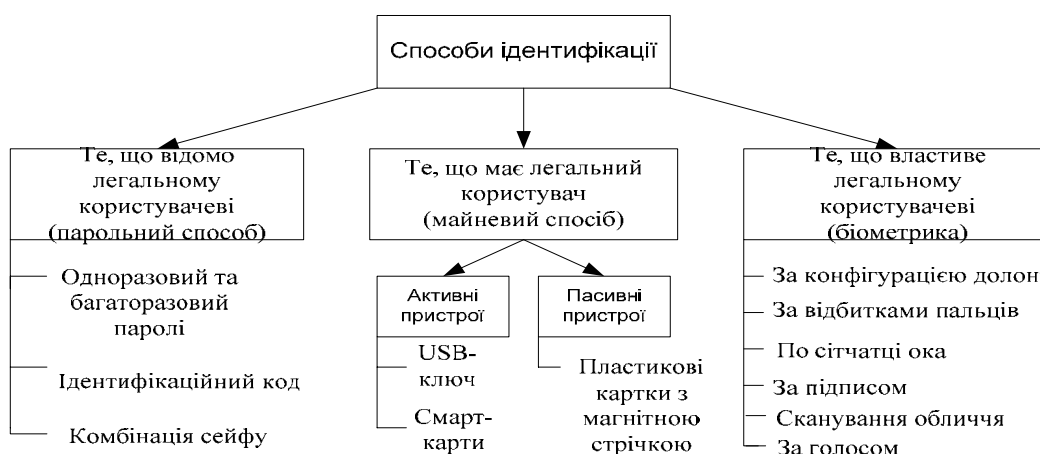


Рис. 1. Класифікація способів ідентифікації та аутентифікації в ІС

Останнім часом більшу популярність одержав біометричний спосіб ідентифікації. Майнова ідентифікація з використанням активних

пристроїв – основний конкурент біометричному способу за стійкістю.

Парольний і майновий спосіб з використанням пасивних пристроїв у цей час мають найбільше поширення завдяки своїй низькій вартості. Саме цей фактор і є вирішальним у багатьох ІС, де не потрібна особлива стійкість. Більшого поширення одержує багатофакторна ідентифікація, коли для визначення особистості застосовується відразу декілька способів. Такий ме-

тод ідентифікації дає велику стійкість і при цьому витрати на його реалізацію мінімальні (наприклад, пластикова картка, яка поєднує в собі парольну та майнову ідентифікації; при цьому користувач повинен фізично мати таку картку і знати *PIN*-код для її застосування).

Узагальнене порівняння способів ідентифікації (на основі даних [4, 5]) наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння способів ідентифікації

Способи ідентифікації	Парольний	Майновий		Біометричний
		Активні пристрої	Пасивні пристрої	
Параметри порівняння				
Необхідність запам'ятовування пароля	+	-	+	-
Необхідність спеціальних апаратних засобів	-	+	+	+
Можливість помилки введення інформації користувачем	+	-	-	-
Можливість помилки системи при ідентифікації	-	-	-	+
Відносна стійкість до злому	низька	висока	середня	висока
Відносна питома вартість (на одного користувача)	низька	висока	середня	висока

З розглянутих вище способів найкраще співвідношення ціна/якість має парольний спосіб (за умови використання одноразових паролів). Саме цей спосіб обрано авторами для подальшого дослідження.

РОЗРОБКА ВНУТРІШНЬОЇ АРХІТЕКТУРИ КОМПЛЕКСУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

Для генерації одноразових паролів найчастіше застосовуються апаратні генератори, кожен з яких окремо початково настроєний. Такі пристрої несуть у собі базовий секрет, засоби для відліку часу або лічильник, а також засоби для хешування або шифрування [1]. В якості ключа шифру використовується базовий секрет, а в якості блоку даних, що хешується (шифрується) – показання годинника або лічильника, що налаштовується (які, наприклад, ведуть відлік часу з деякого моменту ініціалізації пристрою або кількості спроб авторизації, відповідно). Дані годинник або лічильник повинні бути синхронізовані з аналогічним серверним годинником або лічильником. Початкову синхронізацію виконує адміністратор сервера.

В апаратній реалізації таких пристроїв звичайно застосовується мікросхема, що робить хешування (шифрування) за допомогою блочного алгоритму *DES* [1]. При програмній реалізації можна використовувати і інші алгоритми хешування або блочні шифри. Такими алгоритмами, на думку авторів, можуть бути *MD5*, *DES*, *AES*, ГОСТ 28147-89. В результаті порівняння та аналізу алгоритмів хешування (шифрування) [4, 5, 6, 7] для реалізації системи обрано шифр *DES*, що відповідно до стандартів *ANSI X9.9*, *ANSI X9.19*, *ISO 8730*, *ISO 8731-1:1987* є алгоритмом формування хеш-функцій у системах аутентифікації [2]. Даний шифр виступав як федеральний стандарт США з 1977 року по грудень 2001 року [8]. Також в даному шифрі розмір блоку даних становить 64 біта, що цілком достатньо для розв'язуваного завдання.

Після хешування (шифрування) на виході відповідного блоку ми маємо пароль у вигляді символної або числової послідовності. Залежно від настроювання внутрішнього годинника або лічильника даний пароль динамічно змінюється через певні інтервали часу. Зміна відбувається внаслідок того, що блок даних, який ши-

фрується, на вході постійно змінюється, а функція хешування забезпечує при найменшій зміні вхідних даних на виході утворювати кардинально різні послідовності, які не піддаються певним закономірностям.

Апаратна реалізація генератора одноразових паролів тягне за собою чималі грошові витрати, тому що кожен користувач інформаційної системи повинен мати даний пристрій, який коштує близько сотень доларів [1]. Тому даний пристрій має сенс реалізувати програмно, при цьому кожен користувач буде мати свою копію даної програми та набір конфігураційних файлів, де будуть зберігатися унікальні налаштування. Все це можна зберігати на носії інформації, наприклад, флеш-накопичувачі. Таким чином, одержуємо вже двохфакторну систему ідентифікації / аутентифікації.

Комплекс складається із двох частин – клієнтської та серверної. Основним призначенням створюваного програмного продукту є використання у навчальних цілях та дослідженні, тому клієнтська та серверна частини матимуть деякі особливості та спрощення. Клієнтська частина (далі клієнт) буде перебувати у користувача і являтиме собою генератор одноразових паролів. Серверна частина (далі сервер) являє собою користувальницький інтерфейс, куди вводиться логін і одноразовий пароль користувача та на підставі перевірки пароля дозволяється або забороняється доступ до інформаційної системи.

Для забезпечення більшої безпеки при побудові ключа вводиться запит на введення *PIN*-коду, що разом з базовим секретом і дасть ключ для функції хешування.

Отримана в результаті схема клієнтської частини комплексу ідентифікації користувачів інформаційних систем представлена на рис. 2.

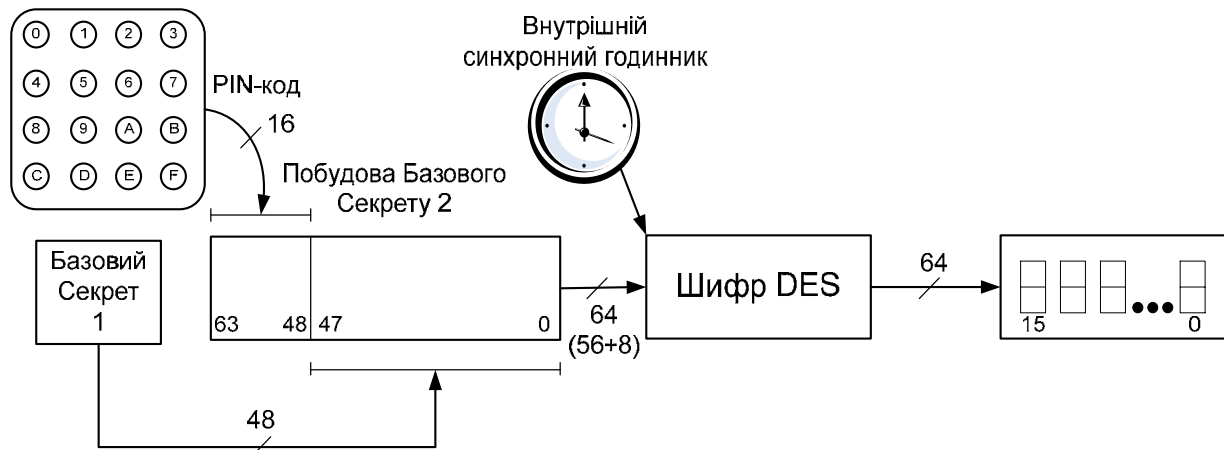


Рис. 2. Клієнтська частина комплексу ідентифікації користувачів ІС

Тут на підставі *PIN*-коду й базового секрету 1 будується ключ (базовий секрет 2) і за допомогою його відбувається шифрування блоку даних (показань внутрішнього годинника). У результаті одержуємо одноразовий пароль, який для зручності представлений у шістнадцятирічному вигляді.

В якості алгоритму шифрування був обраний шифр *DES*, який припускає розмір блоку й ключа 64 біта, а тому розрядності базового секрету 2 і показань внутрішнього годинника повинні відповідати даному числу. Налаштування внутрішнього годинника робить адміністратор системи і синхронізує його із внутрішнім годинником сервера. Також адміністратор видає користувачеві базовий секрет 1.

Таким чином, розрядність *PIN*-коду обрано рівним 16 біт (4 шістнадцятирічних цифри), а розрядність базового секрету № 1 – 48 біт (12 шістнадцятирічних цифр). Показання внутрішнього годинника зберігаються у вигляді

внутрішньої змінної, що становить 8 байт, тобто 64 біта блоку даних, що шифрується. На виході одержуємо пароль розрядністю 64 біта (відповідно до шифру *DES*), а це становить 16 шістнадцятирічних цифр.

Серверна частина комплексу будується аналогічно клієнтській, за винятком того, що на сервері в базі даних зберігається вже сформований базовий секрет 2 користувачів.

Схема серверної частини комплексу ідентифікації користувачів інформаційних систем представлена на рис. 3.

До складу серверної частини, як видно з рис. 3, входить база даних користувачів. База даних містить в собі логін і вже сформований базовий секрет 2 кожного користувача, а також початкове налаштування внутрішнього годинника для кожного користувача.

Користувач сам вибирає собі логін і *PIN*-код, які адміністратор вносить до бази даних.

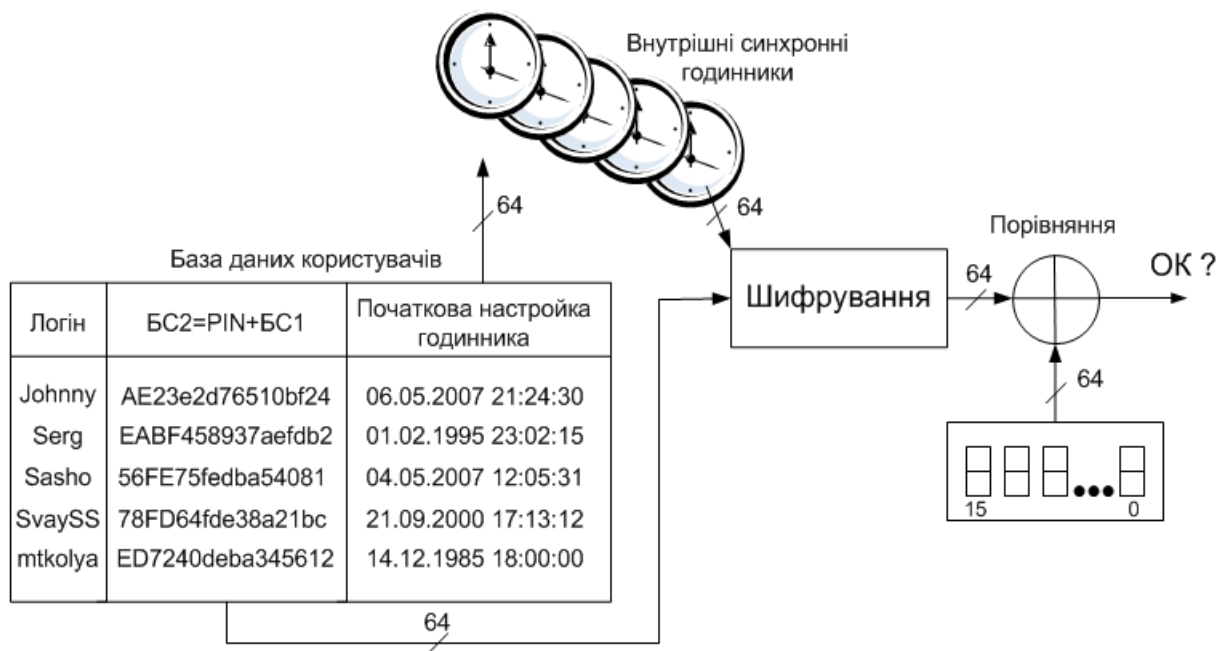


Рис. 3. Серверна частина комплексу ідентифікації користувачів ІС з можливим варіантом бази

Робота сервера відбувається в такий спосіб. При введенні логіну та одноразового пароля в сервер відбувається вибірка з користувальницької бази даних за логіном особистих даних користувача: базового секрету 2 і початкової настройки внутрішнього годинника, які потім беруть участь у шифруванні. Шифрування відбувається при різних показаннях внутрішнього годинника з деяким значенням часового вікна, яке вводиться для того, щоб користувач встиг ввести згенерований пароль. Сервер генерує всілякі комбінації пароля в рамках часового вікна і підряд порівнює їх з уведеним користувачем паролем. Якщо відбувся збіг паролів, то пароль вважається коректним і користувачеві надається доступ до інформаційної системи, у протилежному випадку доступ відхиляється. Користувач повинен увести згенерований пароль у рамках часового вікна, інакше пароль також буде вважатися некоректним і доступ буде відхилений.

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСУ

Для програмної реалізації комплексу було використано середовище *Delphi*. Правильність роботи шифру *DES* перевірялася за допомогою спеціальної функції *CryptHashData* бібліотеки

CryptoAPI. Для цього брався деякий блок даних, який спочатку шифрувався за допомогою розробленої програми, а потім за допомогою функції *CryptHashData* і перевірялись вихідні дані.

Екранні форми клієнтської та серверної частин наведені на рис. 4 та 5.

Для роботи комплексу в клієнтській частині програми повинні бути два конфігураційних файли *bs1.txt* і *bs3.txt* з особистими налаштуваннями користувача. У *bs1.txt* утримується 16-бітне число в шістнадцятиричному виді (наприклад, *AE23*), в *bs3.txt* перебуває дата-час (наприклад, 06.05.2007 21:24:30). У серверній частині комплексу повинен перебувати файл бази даних користувачів *database.txt* наступного виду (можливо декілька записів):

Лапін_Е.В. Johnny AE23e2d76510bf24
06.05.2007 21:24:30

Розглянемо роботу комплексу на прикладі користувача з логіном *Johnny*. Уводимо *PIN*-код *AE23* і одержуємо згенерований одноразовий пароль, нижче якого виводяться особисті дані користувача. Натиснувши на кнопку «Рашифрувати», переконаємося в правильності роботи функції шифрування. На рис. 4 зображене вікно клієнтської частини програми в дії.

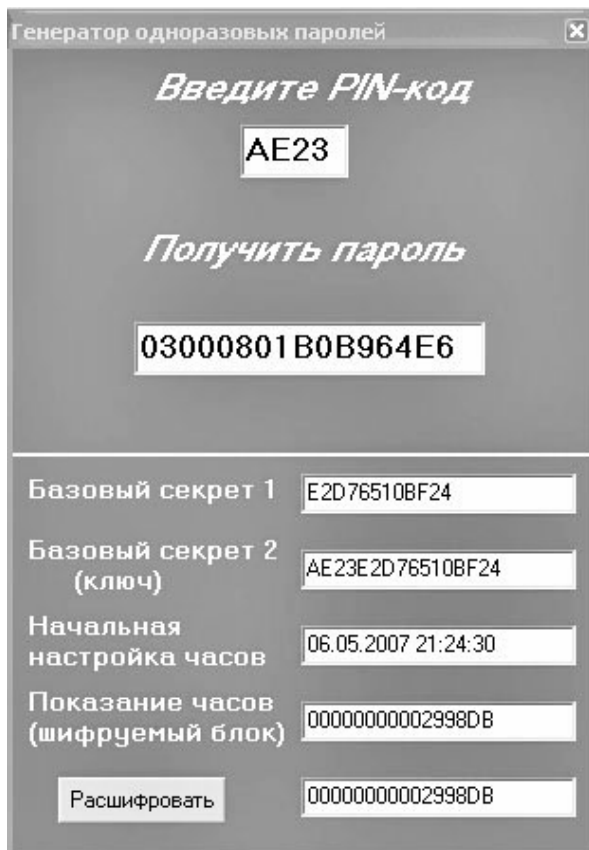


Рис. 4. Вікно клієнтської частини комплексу в дії

При роботі клієнтської частини комплексу відбувається зчитування конфігураційних файлів *bs1.txt* і *bs3.txt*, де зберігаються Базовий Секрет 1 і початкове настроювання внутрішнього годинника відповідно користувача з логіном *Johnny*.

Уводимо логін і одноразовий пароль у серверну частину комплексу в рамках заданого часового вікна 20 с і переконуємося, що сервер дозволяє доступ у систему користувачеві (рис. 5).

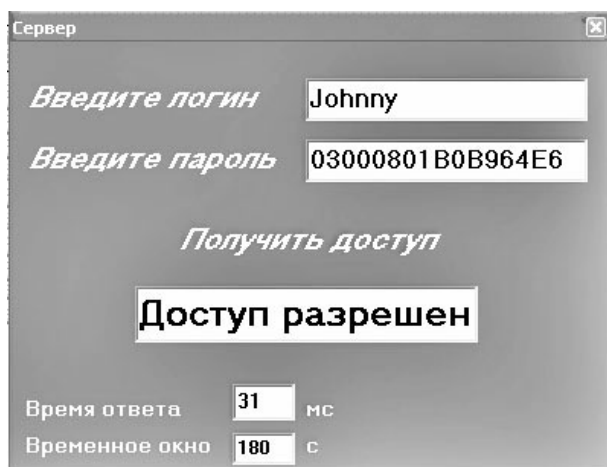


Рис. 5. Сервер дозволяє доступ користувачеві

Тепер перевіримо коректність пароля через 3 хв 30 с. Переконаємося, що сервер забороняє користувачеві доступ до системи (рис. 7).

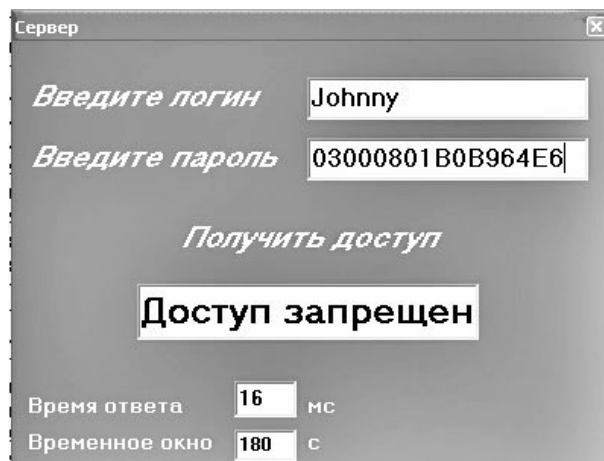


Рис. 6. Сервер забороняє доступ користувачеві

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ВЕЛИЧИНИ ЧАСОВОГО ВІКНА

Зробимо розрахунок необхідної продуктивності центрального процесору (ЦП) для забезпечення розумного часу видачі відповіді про дозвіл доступу. Розрахунок будемо робити для ситуації, коли доступ намагається отримати один користувач.

Відповідно до вихідного тексту програмного коду, для реалізації одного циклу шифрування за алгоритмом *DES* необхідно виконати $N = 8232$ коротких операцій (додавання, бітові операції тощо). Прийmemo, що кожна коротка операція, в середньому, займає 2 такти центрального процесору.

Згідно [9] середній час, що потрібен для уведення та передачі згенерованого пароля користувачем складає не більше 3 хв. Таким чином, часове вікно складає 180 с, тобто ЦП повинен виконати $M = 180$ перевірок одноразового пароля (з урахуванням того, що інтервал внутрішнього годинника складає 1 с). Розрахуємо частоту ЦП, що потрібна для забезпечення часу відповіді не більше $t_0 = 1$ с. Частоту ЦП можна розрахувати за формулою:

$$f = 1/T, \quad (1)$$

де T – час виконання такту.

Значення t_0 розраховується за формулою:

$$t_0 \leq M \times N \times \tau, \quad (2)$$

де τ – час виконання короткої операції.

Звідти, в граничному випадку:

$$\tau = t_0 / (M \times N). \quad (3)$$

Враховуючи, що кожна коротка операція складається з 2 тактів, маємо:

$$T = \tau / 2. \quad (4)$$

Таким чином, одержуємо кінцеву формулу для розрахунку потрібної частоти ЦП:

$$f = 2 / \tau = 2 \times M \times N / t_0. \quad (5)$$

Підставивши значення величин у формулу (5), отримуємо:

$$f = 2963520 \text{ Гц}. \quad (6)$$

Згідно формули (6), потрібна частота ЦП складає 2,96 МГц. Тобто, це є дуже малою величиною, сучасні комп'ютери обладнанні ЦП з частотою на порядок більше.

Проводячи тестування програми на комп'ютері з ЦП *AMD Sempron 3200+* частотою 1,6 ГГц, виявлено, що для забезпечення часу відповіді сервера в 1 с, величина часового вікна становить приблизно 32000 с, тобто майже 9 годин. За такий час кожен користувач зможе ввести пароль.

Досвідченому користувачу для введення пароля вистачить близько 10 секунд, тому автори рекомендують встановлювати величину часового вікна 20-30 с. Це також зменшить навантаження на серверну частину системи при генеруванні паролів.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Пакет програм, що розроблений в рамках даної роботи, може бути використаний в навчальному процесі або як демонстраційний засіб. Він може використовуватись в курсі «Методи та засоби захисту інформації» (спеціальність «Захист інформації в комп'ютерних системах та мережах») при вивченні методів та засобів ідентифікації та аутентифікації. За допомогою даного пакету програм можуть бути вивчені (продемонстровані):

- загальні уявлення про ідентифікацію / аутентифікацію за допомогою одноразових паролів;
- шифрування за алгоритмом *DES*;
- вплив величини часового вікна на продуктивність роботи системи та відмови в обслуговуванні користувачів;
- розрахунки кількісних величин (величина часового вікна, вимоги до апаратної частини тощо).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Смит Р. Э. Аутентификация: от паролей до открытых ключей. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2002. – 432 с.
2. Домарев В. В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты. – К.: ООО «ТИД «ДС», 2001. – 688 с.
3. Хорошко В. А. Методы и средства защиты информации. – К.: Изд-во «Юниор», 2003. – 504 с.
4. Столингс В. Криптография и защита сетей. Принципы и практика; 2-е изд. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 672 с.
5. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы и исходные тексты на языке С; 2-е изд. – 2003.
6. Иванов М. А. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях. – М.: Кудиц-образ, 2001. – 386 с.
7. Государственный стандарт Союза ССР. Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования. ГОСТ 28147-89 в действии от 01.09.90.
8. Аскеров Т. М. Защита информации и информационная безопасность: Учебн. пособ. / Под общей ред. К. И. Курбакова. – М.: Рос. экон. акад., 2001.
9. Анин Б. Защита компьютерной информации. – СПб.: БХВ-Петербург, 2000. – 384 с.

Надійшла до редколегії 30.03.2008.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В КОНСТРУКЦИИ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ

В статті наводиться обґрунтування існування причинно-слідчого зв'язку між різними елементами рейкових екіпажів. Наводиться ймовірна оцінка взаємного зв'язку між технічним станом окремих елементів.

В статье приводится обоснование существования причинно-следственной связи между различными элементами рельсовых экипажей. Приводится вероятностная оценка взаимной связи между техническим состоянием отдельных элементов.

In the article the substantiation of existence of cause-consequence relation between different elements of railway vehicles is presented. The probability assessment of mutual relation between technical conditions of separate elements is also presented.

Железнодорожные рельсовые экипажи, как известно, представляют собой сложные механические системы, которые состоят из множества узлов и деталей, соединенных различными видами связей. При этом связи носят характер упругого, жесткого или контактного соединения [1, 2]. Однако существует еще одна связь между элементами рельсового экипажа и его функциональными характеристиками. Эта связь имеет причинно-следственный характер. Проследим возможную последовательность влияния изменения состояния отдельных элементов на состояние других элементов и рельсового экипажа в целом.

Например, такая неприметная деталь, как шплинт валика тормозной рычажной передачи препятствует выпадению валика и соответственно предотвращает разъединение рычагов, а, следовательно, способствует нормальной работе тормозной системы. Двухсторонний излом шплинта или неправильная его установка в конечном итоге могут привести к отказу работы тормозной рычажной передачи и снижению или полной потере тормозной эффективности рельсового экипажа. При этом сложившаяся аварийная ситуация имеет свою степень вероятности. И пусть порядок ее мизерно мал, при определенных обстоятельствах он может быть весьма существенен. Опять-таки это зависит от функционального состояния других элементов.

Возьмем другой пример – колесная пара пассажирского вагона, которая непосредственно передает нагрузку от экипажа на рельсошпальную решетку. При возникновении ползуна на поверхность катания колеса следует возрастание динамической нагрузки как на вагон и, естественно, это в первую очередь отрицательно сказывается на показателях комфорта-

сти пассажиров, при этом способствуя чрезмерному нагружению всех элементов вагона и пути. А при определенных величинах ползунов и их расположении на колесах (на одной тележке, на двух, с одной стороны вагона, по диагонали) возможна ситуация, угрожающая безопасности движения. И, опять-таки, подобные отказы имеют свою степень вероятности.

Далее приведем еще несколько примеров теоретически возможной причинно-следственной связи между механическими элементами рельсовых экипажей и их отказами. Изобразим это в виде структурной схемы (рис. 1).

Таким образом, отказ или отклонение от номинальных функциональных характеристик одного или нескольких элементов рельсового экипажа закономерно отражается на функциональных характеристиках других элементов, что может повлечь за собой изменение динамических характеристик экипажа в целом и привести к снижению показателей безопасности движения и снижению показателей надежности.

Далее рассмотрим математическое описание взаимосвязи технических и функциональных параметров рельсовых экипажей, рассматриваемых как технические объекты.

Пусть $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ представляет собой перечень элементов, из которых состоит технический объект. Считаем, что каждый из элементов может находиться в нескольких состояниях. Например, элемент ω_1 может находиться в состояниях $V_{10}, V_{11}, V_{12}, \dots, V_{1k_1}$, где под V_{10} понимаем новый элемент, который удовлетворяет всем нормативным требованиям (нормативной документации), под V_{11} понима-

ем состояние, когда некоторое нормативное требование не выполняется, но он способен выполнять свои функциональные возможности,

хотя и не так как новый, и т.д., а состояние V_{1k} соответствует понятию отказа данного элемента.



Рис. 1. Структурная схема причинно-следственной связи некоторых деталей рельсовых экипажей

Для характеристики объекта в целом введем вектор

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_n),$$

где a_1 принимает целые значения от 1 до k_1 ,

a_2 принимает целые значения от 1 до k_2

и т.д.

Очевидно, что таких векторов будет

$$K = \prod_{i=1}^n k_i.$$

Переход из состояния в состояние будем описывать переходной вероятностью:

$$P(t, b | s, a), \quad (1)$$

представляющей собой вероятность перехода из состояния a при наработке s в состояние b при наработке $t \geq 5$.

Вектор b устроен аналогично вектору a . Относительно вероятности перехода (1) считаем, что дальнейшая эволюция зависит только от состояния в момент наработки s , а как мы пришли в это состояние, на дальнейшем развитии не сказывается. В теории случайных процессов [3] такие процессы известны как процессы Маркова А. А.

По физическому смыслу наработка t является непрерывной величиной и больше или равна 0. Состояний в предлагаемой модели будет конечное число, равное K . Такие Марковские процессы известны как цепи Маркова с непрерывным временем [3]. Необходимо заметить, что в реальных технических объектах число деталей (элементов) составляет не одну сотню, и если каждый элемент может находиться в трех состояниях, тогда

$$K = 3^n \Big|_{n=100} = 5 \cdot 10^{47},$$

что представляет трудность не только работы, но даже перечислить их становится весьма затруднительно. Для преодоления этих трудностей производится агрегирование состояний. Другими словами, если A – набор всех векторов типа a , то это множество разбивается на ряд подмножеств, которые будем обозначать как A_1, A_2, \dots, A_m , причем их объединение равно A , а пересечения $A_i \cap A_j = \emptyset, i \neq j$. Задача агрегирования может быть решена различными способами. Одним из требований при агрегировании является требование, что если технический объект находится в состоянии из множества A_i , то переход из этого множества может произойти в состояние из множеств $A_{i+1}, A_{i+2}, \dots, A_n$. При этом требования вероятности перехода $P(t, A_j | s, A_j), t \geq s$ будут отличными от нуля если $j \geq i$.

Следующее требование – при разбиении множества A исходят из характеристик технического объекта по своим функциональным возможностям, а иногда и по последствиям. Мы же пока ограничимся таким разбиением, когда состояния из A_{n-1} соответствуют потере работоспособности, а состояния из A_n будем характеризовать не только потерей работоспособности, но и имеющими «тяжелые» последствия, что в инженерной практике называют авариями.

Простейший вариант агрегирования представлен на рис. 2.

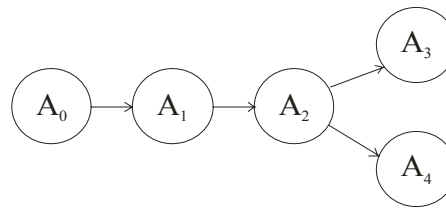


Рис. 2. Граф простейшего варианта агрегирования

В графе на рис. 2 под A_0 понимают состояние, которое удовлетворяет всем нормативно-техническим требованиям, т.е. это состояние соответствует новому объекту (вагону). Состояние A_1 – это такое состояние, когда не выполняются некоторые нормативно-технические требования, но работоспособность выполняется в полном объеме (например, царапина на кузове, изменение цвета покраски и т.д.). Что касается A_2 , то это состояние, когда нарушаются не только нормативно-технические требования, но ухудшается их работоспособность (например, ухудшились динамические характеристики вагона). Состояние A_3 , как и состояние A_4 , характеризуются потерей работоспособности, т.е. имеет место отказ, но по своим последствиям состояние A_4 можно назвать аварией.

Вероятности перехода из состояния в состояние характеризуются конструкцией объекта и средой или условиями эксплуатации.

В зависимости от того, в каком состоянии находится технический объект, выполняются те или иные ремонтные воздействия, и тогда граф возможных состояний, представленный на рис. 2, пополним дугами, отражающими ремонтные воздействия (рис. 3).

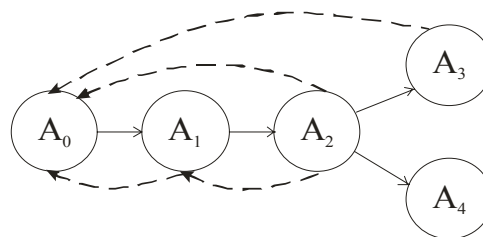


Рис. 3. Граф возможных состояний и переходов с учетом ремонтных воздействий

Если обозначить через $P_i(t)$ вероятность того, что при наработке t объект находится в состоянии A_i , то эти вероятности определяются из системы дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова [4] и в рассматриваемом случае представляют собой

$$\begin{aligned}
\frac{dP_0}{dt} &= -\lambda_{01}P_0 + \mu_{10}P_1 + \mu_{20}P_2 + \mu_{30}P_3; \\
\frac{dP_1}{dt} &= \lambda_{01}P_0 - \lambda_{12}P_1 + \mu_{21}P_2; \\
\frac{dP_2}{dt} &= \lambda_{12}P_1 - \lambda_{23}P_2; \\
\frac{dP_3}{dt} &= \lambda_{23}P_2 - \mu_{30}P_3; \\
\frac{dP_4}{dt} &= \lambda_{34}P_2.
\end{aligned}
\tag{2}$$

К этой системе дифференциальных уравнений необходимо добавить начальные условия, отражающие состояние объекта в начальный момент. Например, если при $t=0$ объект был новым, то

$$P_0(0) = 1, P_k(0) = 0, k = 1, 2, 3, 4. \tag{3}$$

Система уравнений (2) и начальные условия (3) позволяют рассчитать вероятность $P_i(t)$ и тем самым оценить конструкцию, систему ее содержания и условия ее эксплуатации.

Заметим, что при получении уравнений (2) сделано предположение о вероятности перехода, а именно

$$P(t + \Delta t, A_j | t, A_i) = \lambda_{ij}(t) \cdot \Delta t + O(\Delta t),$$

когда Δt достаточно мало.

Функции $\lambda_{ij}(t)$ характеризуют интенсивность переходов как свойства конструкции и условия эксплуатации, а функции $\mu_{ij}(t)$ отражают свойства системы содержания.

В настоящее время разработаны достаточно адекватные математические модели конструкции [1, 2, 5] и предложены модели ремонтного воздействия [6]. Объединение подобных моделей в единую систему весьма интенсивно разрабатывается, а данная работа представляет собой вариант попытки подобного объедине-

ния. Отдельным блоком оценки рисков при возможных отказах деталей и узлов рельсовых экипажей на показатели безопасности движения предлагается использовать математическую модель пространственных колебаний рельсовых экипажей с возможностью моделирования изменения состояния и параметров различных элементов [2].

Таким образом, проектирование конструкций рельсовых экипажей для определенных условий эксплуатации следует сочетать с решением задач по определению системы их технического содержания и обслуживания, что позволит определить рациональную конструкцию и ее оптимальные параметры, исходя из требуемых динамических характеристик и соответствующей системы ремонта и технического обслуживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. – Д.: Новая идеология, 2002. – 240 с.
2. Мямлин С. В. Математическая модель пространственных колебаний пассажирского вагона в обычной постановке / С. В. Мямлин, В. И. Приходько // Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2006. – № 7. – С. 266-276.
3. Карлин С. Основы теории случайных процессов. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
4. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей / Успехи математических наук. – Вып. 5. – 1938. – С. 5-41.
5. Камаев В. А. Оптимизация параметров ходовых частей железнодорожного подвижного состава. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
6. Босов А. А. Функции множества и их применение. – Днепропетровск: Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.

Поступила в редколлегию 27.03.2008.

Ю. И. ХМАРСКИЙ (ДИИТ)

О ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМ СТАНЦИОННОЙ АВТОМАТИКИ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Розглядається структура і принцип побудови мікропроцесорних схем низової залізничної автоматики за релейно-контактним принципом, які реалізують тривірневу фільтрацію помилок, забезпечуючи найбільш високу захищеність систем станційної автоматики від помилок.

Рассматривается структура и принцип построения микропроцессорных схем низовой железнодорожной автоматики по релейно-контактному принципу, которые реализуют трехуровневую фильтрацию ошибок, обеспечивая наиболее высокую защищенность систем станционной автоматики от ошибок.

A structure and principle of construction of microprocessor circuit of local railway automation is examined on relay-and-contact principle, which realize the three-level filtration of errors providing the highest protection of the systems of station automation from errors.

Несмотря на бурный прогресс в области полупроводниковой электроники, большинство систем станционной железнодорожной автоматики, особенно в странах СНГ, включая Украину, построены на релейно-контактных элементах. Безусловно, по мере развития полупроводниковых элементов, были попытки пробного исполнения систем автоматики на бесконтактных элементах, однако они не дали нужного результата из-за надежности.

Невольно возникает вопрос о причине столь большого долголетия релейно-контактных устройств. Очевидно, что причина заключается в некой «скрытой» повышенной надежности этих устройств. И это действительно так. Для пояснения рассмотрим упрощенную логическую цепочку, которая является типовой для систем станционной автоматики (рис.1).

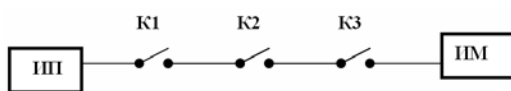


Рис. 1. Упрощенная логическая цепочка

На рис. 1 показана цепочка, которая управляет включением исполнительного механизма (ИМ). При совпадении трех логических условий, которые реализуются совпадением замкнутого положения контактов K1, K2, K3, питание от источника питания (ИП) подается на исполнительный механизм. В системах железнодорожной автоматики такими механизмами могут быть стрелки, сигналы светофоров и т.д. Логическими условиями – отсутствие враждебных маршрутов.

Нетрудно заметить, что схема реализует простую операцию конъюнкции:

$$Y = X1 \& X2 \& X3, \quad (1)$$

где Y – сигнал включения исполнительного механизма, $X1, X2, X3$ – сигналы логических условий (реализуемых на рис. 1 контактами K1, K2, K3).

Реализация подобной схемы на бесконтактных логических элементах показана на рис. 2.

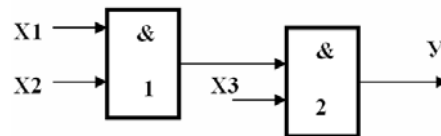


Рис. 2. Упрощенная логическая цепочка на бесконтактных логических элементах

Главное отличие схем на рис. 1 и рис. 2 заключается в том, что реализация логической функции y у них существенно отличается. В релейно-контактных схемах реализация логики (замыкание и размыкание контактов) лишь создает условия (формирует цепочку подключения) для подачи питания на исполнительный механизм. В логических электронных элементах каждый логический элемент по построению обязательно использует источник питания, и, следовательно, может быть источником активного питающего сигнала на выходе элемента при его отказе.

Исследования надежности при различных способах построения логических схем показывают, что логические схемы обладают свойством фильтрации ложных сигналов, которое зависит от вероятностных характеристик входных сигналов и логики распределения этих сигналов в схеме [1, 2, 3], а также от логики выходного элемента схемы [4]. Сравнивая схе-

мы реализации, показанные на рис. 1 и рис. 2, приходим к выводу, что схемы построения на релейно-контактных элементах обладают повышенной фильтрующей способностью по принципу их построения.

Например, из рис. 1 видно, что при разомкнутом состоянии всех трех контактов ложное замыкание одного или даже двух контактов не приводит к подаче питания на исполнительный механизм. В схеме на рис. 2 ложное срабатывание элемента 1 приводит к сигналу на выходе всей схемы только при $X3 = 1$, а ложное срабатывание элемента 2 сразу вызывает ложное включение исполнительного механизма. Из этого простого примера видно, что релейно-контактные схемы по своему принципу построения обладают повышенной фильтрующей способностью, т.е. защищенностью от ложных срабатываний.

К сожалению, типовые электронные бесконтактные элементы такими свойствами, по своему построению, не обладают, и поэтому простая замена релейно-контактных схем бесконтактными элементами невозможна, т.к. не дает нужного уровня надежности, что является обязательным критерием в схемах железнодорожной автоматики. Правда, в последнее время идет активная разработка станционных систем на бесконтактных элементах, имеются опытные станции, где основной упор сделан на микропроцессорные устройства, однако по принципу построения – это те же логические элементы, а, следовательно, уровень структурной надежности, который дают релейно-контактные схемы, может достигаться только за счет значительно усложнения, а, следовательно, удорожания системы. Кроме того, следует отметить, что даже при неправильном действии оператора, наличие, цепочек, подобных рис. 1, как последней инстанции, не приводит к ложному включению исполнительного механизма, если существуют другие разомкнутые контакты (эквивалент наличия враждебных маршрутов).

Из вышесказанного следует вывод, что при построении схем железнодорожной автоматики наличие логических схем, подобных релейно-контактным, как последней инстанции, обладающей способностью фильтрации ложных сигналов, практически обязательна. Однако, применение релейно-контактных схем связано с другой проблемой – необходимостью довольно затратных мер по контролю за их состоянием, своевременной замене новыми и т.д. Положение дополнительно усложняется тем, что

львиная доля таких реле производится в России.

Поэтому возникает вопрос: можно ли при современном состоянии развития полупроводниковой и, прежде всего, силовой электроники найти бесконтактные элементы, полностью эквивалентные по своим свойствам релейно-контактным устройствам?

Для поиска таких устройств рассмотрим основные функции, выполняемые реле (рис. 3).

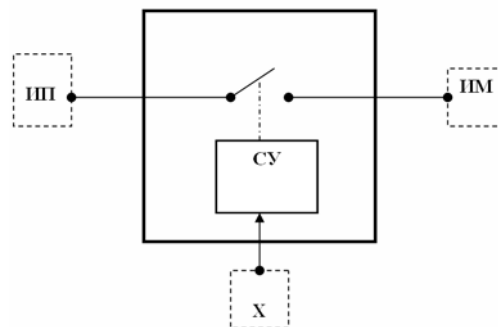


Рис. 3. Основные функции, выполняемые реле

Основная функция – передача питания замыканием контакта со входа ИП на выход к исполнительному механизму ИМ, или ко входу следующего реле. Требование к этой цепочке – повышенное напряжение и сравнительно большие токи. Управление состоянием контакта должно осуществляться внутренней схемой управления от входного низковольтного и низкими токами сигнала X (в современных условиях – желательно согласующемуся с уровнем ТТЛ). Кроме того, из важных условий – наличие гальванической развязки между силовой цепью и схемой управления и, безусловно, эти элементы должны быть бесконтактными.

Анализ состояния современной элементной бесконтактной базы показывает, что в принципе такие элементы есть. Такими элементами являются твердотельные оптоэлектронные реле. Выпускаются они в настоящее время многими (к сожалению, зарубежными) фирмами. Выпускаемые оптореле имеют различную мощность, разнообразие типов по электрическим характеристикам, количеству контактов и другим параметрам. Для примера можно назвать американскую фирму *CRYDOM*, выпускающую довольно широкий спектр (более 1000) различных твердотельных оптоэлектронных реле с гарантируемым временем наработки на отказ от 20 000 000 до 40 000 000 часов. Производит твердотельные оптоэлектронные реле и Россия, например ЗАО «Протон – Импульс». Число производителей оптореле в мире постоянно увеличивается, совершенствуются

их свойства, становится шире ассортимент. Можно предположить, что в настоящее время можно найти альтернативные варианты оптореле для каждого типа контактных реле железнодорожной автоматики. (К сожалению, такой анализ специалистами по железнодорожной автоматике не проводился).

Многообразие типов твердотельных оптореле на современном мировом рынке вселяет уверенность о возможности такой замены, а в случае подбора для каждого железнодорожного реле его оптоэлектронного заменителя возможен даже особо плавный переход от существующих схем низовой контактной автоматики к бесконтактным схемам. Так как схемы твердотельных заменителей компактны и на первых порах могут просто размещаться в корпусах заменяемых реле (даже без изменения в монтаже стивов!), т.е. при таком плавном переходе появляется возможность работы «смешанных» схем, с постепенной заменой новыми элементами. Безусловно, в дальнейшем от старых громоздких стивов следует также плавно переходить к компактным современным изделиям. Такой плавный переход очень важен для нашего государства, т.к. не требуют одновременных огромных финансовых затрат.

Базируясь на вышесказанном, укрупненная структура системы станционной железнодорожной автоматики с повышенной безопасностью может быть представлена в следующем виде (рис. 4):

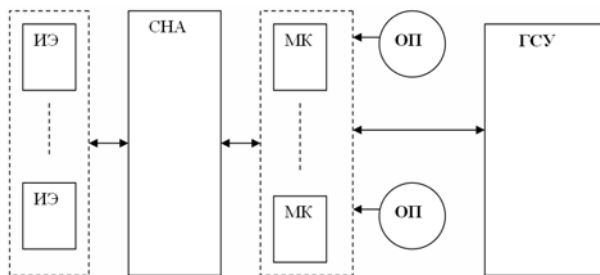


Рис. 4. Укрупненная структура системы станционной железнодорожной автоматики с повышенной защищенностью

Структура имеет четыре уровня. Самым низовым уровнем являются исполнительные элементы.

Исполнительные элементы ИЭ (стрелки, сигналы и т.д.) управляются (получают питание) схемами низовой бесконтактной автоматики (СНА) на оптореле, построенными по принципу релейно-контактной автоматики. Эти схемы являются, как уже отмечалось, последней фильтрующей инстанцией возможных ошибок.

В свою очередь, схемы низовой автоматики получают сигналы управления от системы управления, построенную на современных микропроцессорах (микроконтроллерах). Микропроцессорная система управления является необходимым звеном в управлении, так как дает несомненные преимущества по сравнению с прямым управлением от одного компьютера, которые заключаются в следующем:

- Возможность построения распределенной системы, что повышает ее живучесть.
- Возможности микропроцессорной системы гораздо выше, чем у схем низовой автоматики, поэтому она может реализовывать более сложные алгоритмы управления, анализировать более сложные ситуации ошибок как оператора, так и схем низовой автоматики и исполнительных элементов, оперативно реагировать на ситуацию. Таким образом, микропроцессорный уровень является средней фильтрующей инстанцией возможных ошибок.
- Каждый микропроцессорный модуль специализирован на более узкий круг задач управления по сравнению со всей системой и эти задачи он должен решать даже при отсутствии связи с инстанцией более высокого уровня.
- В связи с компактностью микропроцессорных устройств они могут быть размещены непосредственно на объекте, что повышает надежность принимаемой информации и упрощает средства их доставки.

Микропроцессорный уровень связан с головным системным уровнем (ГСУ). На этом уровне находится более мощная вычислительная техника. Если эта техника должна обеспечить возможность прямого вмешательства в управление, то для решения таких задач на этом уровне желательно предусмотреть промышленные ЭВМ. Данный уровень отличается глобальностью и мощностью решаемых задач. Принципиально этот уровень получает информацию от всех уровней системы, следовательно, имеет еще большие возможности для анализа возможного выявления ошибок и отказов, однако, он может быть и их источником для схем более низкого уровня. Но в принципе осуществляет первый уровень фильтрации глобальных ошибок.

Таким образом, данная структура и принцип построения схем низовой автоматики по релейно-контактному принципу обеспечивают трехуровневую фильтрацию ошибок, обеспечивая наиболее высокую защищенность систем станционной автоматики от ошибок.

В заключение уточним этапы разработки и внедрения уровня низовой автоматики таких систем.

- Первым этапом является анализ характеристик существующих реле железнодорожной автоматики и выбор оптоэлектронных твердотельных реле с такими же характеристиками.

- Вторым этапом является постепенная замена контактных реле на бесконтактные в тех же корпусах и тех же стативах.

- Третьим этапом является замена устаревших громоздких монтажных стативов на современное монтажное оборудование.

Однако следует отметить, что, несмотря на то, что схемы, построенные по релейно-контактному принципу, уже обладают повышенной фильтрующей способностью, анализ их на возможность улучшения этих свойств необходим. Поэтому третий этап начинается с анализа вероятностных характеристик сигналов схем низовой автоматики, проверки их фильтрующих свойств и коррекции схем с целью по-

лучения оптимальных фильтрующих свойств, а затем их практическая реализация.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хмарский Ю. И. Вопросы обеспечения надежности логических схем на ранних этапах проектирования // Труды ДИИТа. – Вып. 140/4. – Д., 1973.
2. Хмарский Ю. И. Метод логико-вероятностных соотношений // Труды ДИИТа. – Вып. 140/4. – Д., 1973.
3. Хмарский Ю. И. Синтез комбинационных логических схем по критерию надежности // Труды ДИИТа. – Вып. 162/9. – Д., 1975.
4. Хмарский Ю. И. Исследование влияния логики выходного элемента на потенциальную надежность синтезируемой схемы / Ю. И. Хмарский, И. В. Жуковицкий // Труды ДИИТа. – Вып. 172/7. – Д., 1975.

Поступила в редколлегию 30.03.2008.

И. А. ВАКУЛЕНКО (ДИИТ)

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ТЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫДЕРЖЕК ПРИ СУБКРИТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сфероїдизація та коалесценція цементиту вуглецевої сталі залежить від формування нових та переміщення існуючих меж розподілу.

Сфероидизация и коалесценция цементита углеродистой стали зависят от формирования новых и перемещения имеющихся границ раздела.

The spheroidization and coalescence of the carbon steel cementite depend on formation of new boundary surfaces and displacement of existing ones.

По сравнению с однофазными металлами и низкоуглеродистыми сталями, развитие процессов структурообразования в гетерофазных системах в значительной мере определяется присутствием частиц второй фазы. Стали, предназначенные для изготовления изделий холодным пластическим деформированием, должны обладать различным структурным состоянием, которое обеспечивало бы требуемый уровень пластических характеристик. Так, для высокоуглеродистых сталей с составом, близким к эвтектоидному, предназначенных для получения холоднотянутой высокопрочной проволоки, оптимальной структурой является мелкодисперсный перлит [1]. В противоположность этому, для низко- и среднеуглеродистых сталей, которые используются в качестве подката для холодной высадки, структура уже должна быть в виде глобулей цементита, определенным образом распределенных в ферритной матрице. В этом случае, для сталей в горячекатаном состоянии развитие процессов сфероидизации и коалесценции цементита приобретает особо важное значение [2].

С увеличением степени и скорости холодной или теплой пластической деформации процессы сфероидизации цементита ускоряются [3]. Обусловлено приведенное положение различными факторами. Во-первых, это дробление цементитных пластин, составляющих перлитную колонию. Во-вторых, прирост плотности дефектов кристаллического строения в ферритных участках, непосредственно соприкасающихся с цементитом. Как показано в [1, 2], начальные стадии развития сфероидизации связаны с формированием и последующим ростом утолщений на концах цементитных пластин. При дальнейшей сфероидизации возникшие

вытянутые, с различным соотношением между осями, частицы начинают приобретать форму, приближенную к сферической.

Целью работы явилась попытка оценить различные факторы, которые влияют на развитие сфероидизации и коалесценции цементита в углеродистых сталях.

Материалом для исследования служили углеродистые стали с содержанием углерода 0.23...0.6 % C. Процесс сфероидизации изучали за счет варьирования длительностью отжига при температурах вблизи субкритического значения (680 °C), с исходной структурой после гомогенизирующего отжига (сталь с 0.6 % C). Коалесценцию изучали на сталях после закалки, отпуска 450 °C, деформации 20...40 %, отжига 680 °C. Структуру исследовали под световым и электронным микроскопом с использованием методик количественной металлографии [4].

Анализ структуры сталей свидетельствует, что начальные этапы процесса сфероидизации пластин цементита наблюдаются уже после нескольких часов выдержки при субкритических температурах (рис. 1, а). Ранее практически ненаблюдаемые границы, отделяющие перлитные колонии друг от друга либо от зерен структурно-свободного феррита, становятся более заметными. После выдержек длительностью более 20...30 час появившиеся дополнительные границы раздела в ферритной составляющей перлитной колонии приводят, в местах соприкосновения с цементитной пластиной, к локальному ее утонению и, в конечном счете, к делению на отдельные части (рис. 1, б). Дальнейшее увеличение длительности выдержки в указанном температурном интервале сопровождается прогрессирующим развитием сфероид-

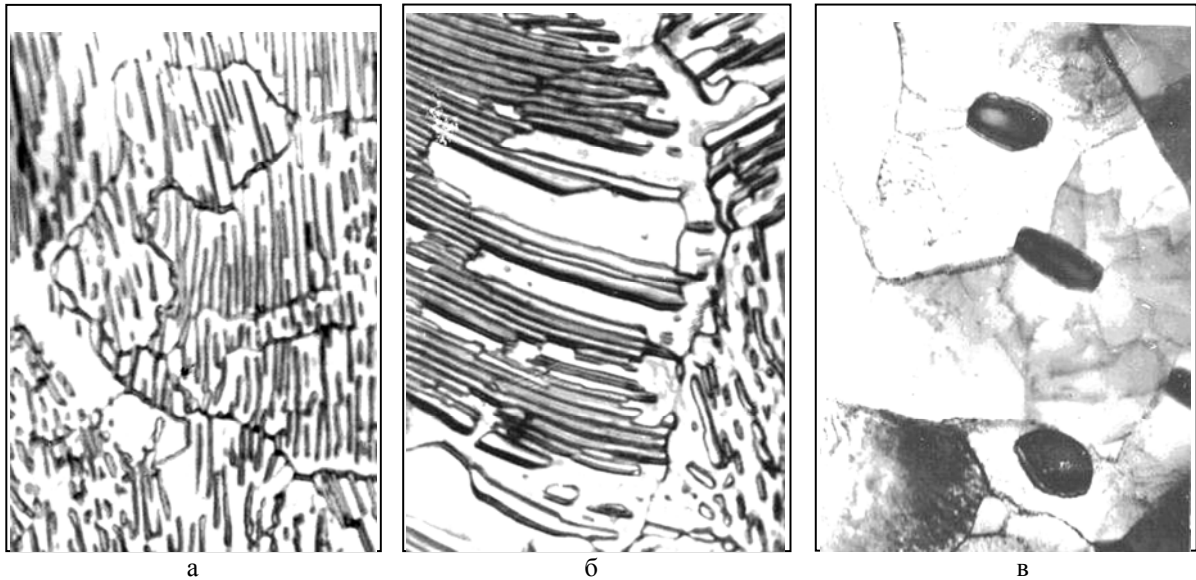


Рис. 1. Перлитная колония углеродистой стали после отжига при 680 °С в течение: а - 25 ч ; б - 50 ч; в - 100 ч. а, б - увеличение 2000; в – 14000.

дизации и коалесценции цементита. Учитывая определенную последовательность процессов сфероидизации и коалесценции, рассмотрим в отдельности факторы, оказывающие влияние на развитие указанных явлений. Как показано в [5], в процессе длительных выдержек при субкритических температурах (вблизи A_{c1}) подавляющее большинство пластин цементита, особенно участки вблизи концов, окружены скоплениями параллельных дислокаций. По мере увеличения длительности выдержек перераспределение указанных дислокаций приводит к формированию субграниц, которые соединяют частицы по форме приближающейся к глобулярной (рис. 1, в). Более того, в ферритных участках, представляющих ранее перлитную колонию, начинают формироваться границы раздела, в тройных стыках выделяются глобулы цементита (рис. 2). Как показано в [6], располагаемые мелкодисперсные выделения цементита в тройных стыках зерен феррита либо на границах, разделяющих зерна, находятся в более термодинамически выгодных позициях по сравнению с расположенными внутри зерна. Связано приведенное положение с особенностями процесса массопереноса атомов углерода при сфероидизации цементита. Так, при нагреве перлитной колонии до температур вблизи критического значения (A_{c1}) возрастает концентрация атомов углерода в феррите, непосредственно соприкасающимся с цементитом. Кроме этого, направленная диффузия углерода на границы и субграницы феррита, обусловленная снижением запасенной энергии границы [6], приводит к выделению карбидной фазы в

указанных местах структуры. Приведенный процесс уменьшения энергии системы, когда цементит выделяется на границах, а не внутри зерна, становится понятным, если учесть различия в удельных объемах атомов феррита и цементита. Так, в процессе растворения цементитной частицы, которая обладает менее плотной кристаллической решеткой [7], возникает определенное количество дефектов кристаллического строения, которые компенсируют возникающие напряжения от объемных несоответствий структурных составляющих. Более

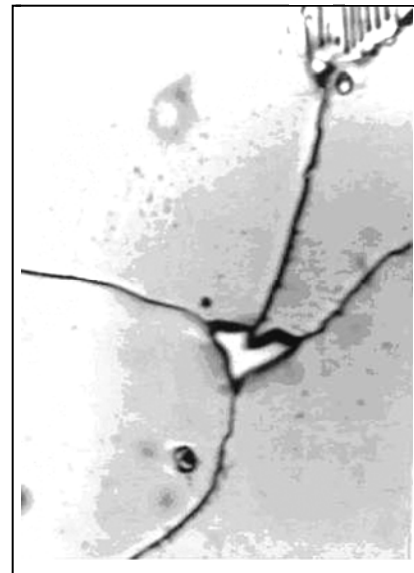


Рис. 2. Структура стали с 0.23 % С после отжига при температуре 680 °С в течение 30 ч, увеличение 2000

того, появившиеся дислокации перемещаясь формируют сетку, в углах которой располагаются частицы цементита. В процессе выдержки огрубление структуры приводит к возникновению большеугольных границ феррита, положение которых оказывает влияние на процессы коалесценции после завершения сфероидизации пластин цементита.

Таким образом, если развитие процесса сфероидизации пластинчатого цементита в отожженных углеродистых сталях, кроме возникновения определенной плотности дефектов кристаллического строения в феррите, обусловлено еще и формированием дополнительных границ раздела, на которых выделяются глобулы цементита, коалесценция же сопровождается несколько иными структурными изменениями. Как показано [8], анализ изменения диаметров частиц цементита, представляющих определенные размерные группы, в течение выдержки стали при температурах вблизи субкритического значения, позволяет представить процесс коалесценции как чередование этапов растворения и роста глобул в зависимости от места их расположения. Учитывая изменения соотношений между пограничной диффузией атомов углерода и диффузионным массопереносом внутри зерен феррита (в процессе выдержки стали при температурах вблизи A_{c1}), на первый взгляд хаотический характер смены этапов растворения глобул внутри зерна и

роста их за счет располагаемых на границах в действительности имеет определенный циклический вид [9]. На основании микроструктурных исследований установленный циклический характер смены этапов растворения и роста карбидных частиц обусловлен перемещениями и формированиями дополнительных границ раздела в ферритной матрице.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабич В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков . – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Пирогов В. А. и др. // Термическая обработка металлов, 1979, № 8. – С. 60-61.
3. Гриднев В. Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – К.: Наук. думка, 1974 – 231 с.
4. Панченко Е. В. и др. Лаборатория металлографии. – М.: Металлургия, 1965 – 439 с.
5. Марцинив Б. Ф. и др. // Тезисы докладов. Конференция по электронной микроскопии. – М.: Наука, 1982. – С. 352.
6. Smith C. S. // Trans. ASME, 1948, v. 175. –P. 15.
7. Stuart H. et al. // JISI, 1966, v 204. – P.711.
8. Вакуленко И. А. и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1990, № 11. – С. 66-67
9. Вакуленко И. А. // Известия АН СССР. Металлы. 1991, № 3. – С.73.

Поступила в редколлегию 22.01.2008.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАПІВ ЗАРОДЖЕННЯ ТА ЗРОСТАННЯ ТРІЩИН ПРИ НАТУРНОМУ ВИПРОБУВАННІ НА ВТОМЛЕНІСТЬ

Для залізничної осі в залежності від стадій зростання тріщини наведені закономірні зміни структури поверхні руйнування при випробуваннях на втомлюваність.

Для железнодорожной оси в зависимости от стадий роста трещины приведены закономерные изменения структуры поверхности разрушения при испытаниях на усталость.

For a railway axle in dependence on stages of crack growth the regular changes of structure of destruction surface during the fatigue tests are presented.

В сучасних умовах роботи мережі залізничного транспорту України, коли одночасно зі збільшенням навантаження підвищують швидкість перевезень, оцінка ресурсу роботи елементів рухомого складу є достатньо актуальною проблемою. Враховуючи умови використання, можна вважати, що одним із найбільш навантажених елементів колісної пари є залізнична вісь. Циклічна зміна різноманітних впливів сприяє зародженню та зростанню тріщин різної природи походження від тріщин втомлення до тріщин імпульсного навантаження металу, при цьому швидкість їх зростання може змінюватися в дуже широкому інтервалі значень [1, 2].

Систематизація випадків формування тріщин в залізничних осях вантажних вагонів указує на необхідність систематичного підходу до оцінки процесів руйнування осей з урахуванням виконання вимог нормативно-технічної документації як при виготовленні осі, так і вимог стосовно умов експлуатації. Аналіз отриманих результатів показує, що при зародженні та подальшому зростанні тріщини розвиток процесів структурних перетворень, які в свою чергу обумовлені кінетикою накопичення дефектів кристалічної будови металу, в значній мірі зв'язані з первинним структурним станом металу при виготовленні осі [3].

Мета роботи – дослідження етапів зростання тріщини при циклічних навантаженнях під час ресурсних випробувань залізничної осі.

Для проведення досліджень була вибрана залізнична вісь поточного виробництва Дніпродзержинського металургійного комбінату. Проведення стандартних випробувань показало, що як за хімічним складом (0,46 % С, 0,75 % Мп, 0,22 % Si, 0,017 % S, 0,016 % Р), так і по рівню механічних властивостей при розтяжінні (межа міцності 667 Н/мм², відносне по-

довження 24,5 %, ударна в'язкість 0,6 МДж/м²) метал залізничної осі повністю відповідає вимогам ГОСТу 4728-96. Металографічні дослідження проводили з використанням світлового мікроскопа "Eriquant". Фактографічні дослідження були використані для пояснень щодо змін внутрішньої будови металу під час зростання тріщини в процесі ресурсних випробувань залізничної осі.

Додатково до досліджень хімічного складу металу осі та рівня механічних властивостей на відповідність вимогам нормативно-технічної документації, був проведений аналіз мікроструктури сталі. Структура металу осі являє собою дрібно пластинчатий перліт з визначеною морфологією та кількістю структурно вільного фериту, який розташований по границях перлітних колоній (рис. 1).

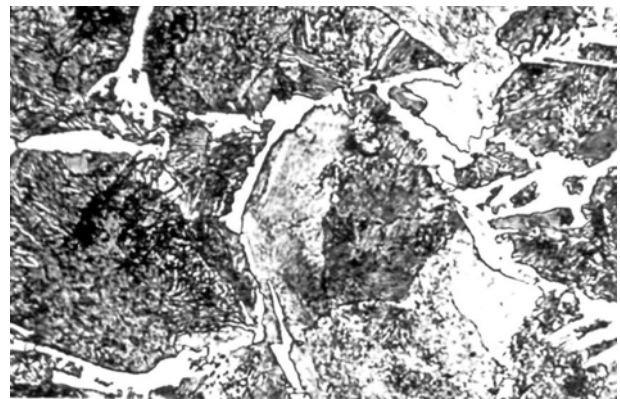


Рис. 1. Структура сталі шийки залізничної осі, (збільшення 800)

Структура, яка приведена на рис. 1, являє собою найбільш типовий вигляд та повністю відповідає стехіометрії. Окрім цього, дослідження мікроструктури металу показали наявність неметалевих включень різної природи походження, які за розмірами, кількістю та морфологічними особливостями повністю від-

повідують вимогам ГОСТу 4728-96.

Для оцінки рівня опору металу процесам зародження тріщин втоми були проведені дослідження по визначенню межі міцності з аналізу побудованої діаграми Велера (рис. 2).

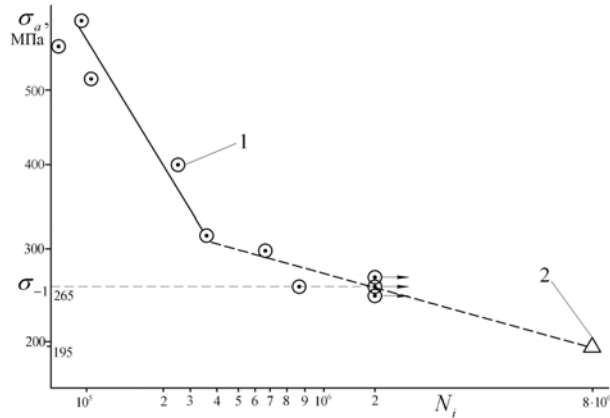


Рис. 2. Вплив амплітуди навантаження (σ_a) на кількість циклів (N_i) до руйнування зразка (1) і залізничної осі (2)

Випробування проводили на циліндричних зразках, які піддавалися навантаженню при згині з обертанням. По зовнішньому вигляду діаграму необхідно підрозділити на дві ділянки: для кількості циклів навантаження до $4 \cdot 10^5$ та більше цього значення, які відповідають мало- та великоцикловому втомленню, відповідно. Враховуючи той факт, що для оцінки міцнісних характеристик металу, коли випробування проводилось на зразках, часто обмежують кількість циклів до руйнування базовими значеннями, в першому наближенні можна прийняти значення 265 Н/мм^2 як умовну величину межі міцності при втомі. Однак, за методикою натурних випробувань на втомлюваність залізничних осей амплітуда навантаження дорівнювала 195 Н/мм^2 , а N_i руйнування досягло значення $8 \cdot 10^6$ циклів. Незважаючи на неспівпадіння схеми навантаження зразків (згин з обертанням) та при натурних випробуваннях залізничної осі (згин), разом з впливанням масштабного фактора, була отримана достатньо висока кореляція експериментальних даних (рис. 2). Отриманий результат дозволяє переносити пояснення щодо стадійності процесів втомлення, отриманих на зразках, на загальну картину розвитку тріщини при руйнуванні залізничної осі (рис. 3).

За зовнішніми якісними ознаками поверхню зламу можна підрозділити на декілька областей (рис. 4). В області I, в місці А відбулося зародження тріщини, яка за рахунок накопичення

дефектів кристалічної будови в гирлі при циклічному навантаженні послідовно зростала.

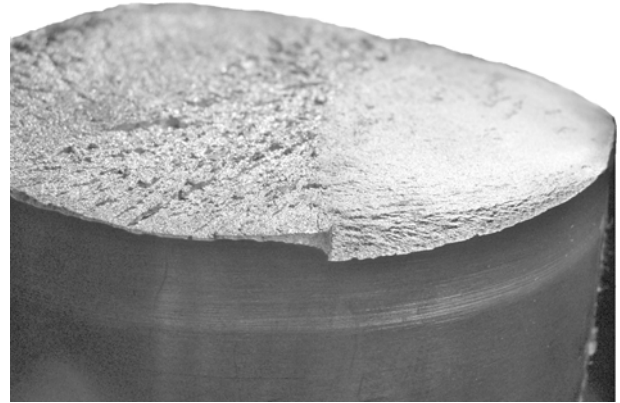


Рис. 3. Вигляд фрагменту поверхні руйнування залізничної осі після натурних випробувань

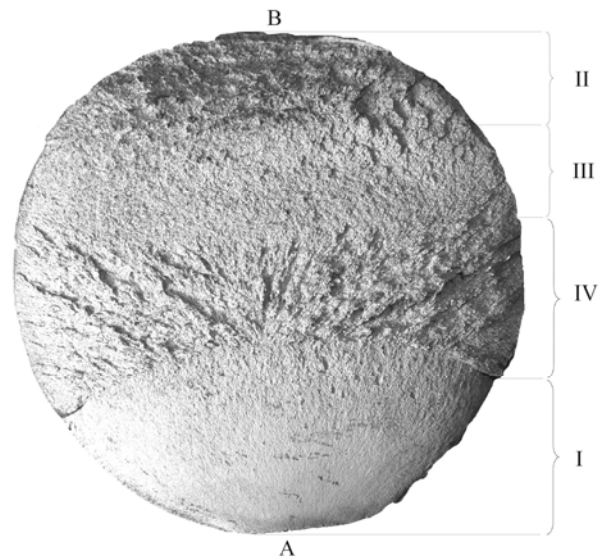


Рис. 4. Злам залізничної осі після випробувань на циклічний згин, (зменшення в 2,3 рази)

Зміна вигляду зламу свідчить, що послідовне зниження перетину неушкодженого металу осі супроводжувалось неухильним підвищенням швидкості від інкубаційного до прискореного періодів [2, 4]. Але за рахунок симетричного циклу навантаження, коли до 30...35% перетину осі було пройдено тріщиною, а її орієнтація послідовно відхилялась від площини перетину (рис. 3), при визначених умовах її зростання було зупинено. Обумовлено наведене явище формуванням умов на протилежній боковій поверхні другого зародка тріщини (В). Висока швидкість зростання тріщини В, практично без ознак втомлення привела до розвитку процесів деформаційного зміцнення і, як наслідок цього, до підвищення опору зростаючої тріщини. Внаслідок цього подальше зростання тріщини перейшло в область III, з явними озна-

ками малоциклового втомлення. Підтверджують це формування чисельних дрібних борозенок (рис. 4).

Після досягнення перетину неушкодженого металу критичного значення відбувся перехід тріщини від осередків А і В у стадію остаточного статичного долому (IV). Достатньо висока швидкість остаточного руйнування осі підтверджується наявністю радіальної зони в зламі з дуже грубими рубцями. Окрім цього, орієнтація наведених рубців показує, що домінуючим в формуванні зони IV є розповсюдження руйнування від первинної тріщини втоми від осередку А.

На підставі проведених досліджень, за відсутністю явних ознак по впливу на характер зростання тріщин втомлення з боку структурних параметрів металу (неоднорідність структури металу, перебільшення припустимої межі по впливу неметалевих включень), можна вважати, що залізнична вісь являє собою достат-

ньо надійний елемент рухомого складу в разі дотримання вимог нормативно-технічної документації щодо умов її використання.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Трошенко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – К.: Наук. думка, 1971. – 267 с.
2. Вакуленко І. О. Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень при зародженні тріщин / І. О. Вакуленко, О. О. Чайковський, М. А. Грищенко // МтаТОМ, 2007. – № 2. – С. 44-47.
3. Вакуленко И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании. – Д.: Gaudeamus, 2003, – 94 с.
4. Иванова В. С. Современные представления о природе усталостного разрушения и новые направления исследований. – В кн.: Усталость металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – С. 3-14.

Надійшла до редколегії 27.03.2008.

І. О. ВАКУЛЕНКО (ДІТ), О. М. ПЕРКОВ (ІЧМ НАНУ), В. Г. АНОФРІЄВ (ДІТ),
В. С. КРОТ (Укрзалізниця)

АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

Виникнення руйнування залізничного колеса обумовлено формуванням високих локальних напружень від неоднорідної пружно-пластичної деформації за рахунок циклічної зміни температур під час гальмування.

Возникновение разрушения железнодорожного колеса обусловлено формированием высоких локальных напряжений от неоднородной упруго-пластической деформации при циклической смене температур при торможении.

The destruction occurrence in a railroad wheel is caused by formation of the high local stresses produced by the inhomogeneous elastic-plastic deformation when the cyclic temperature change takes place during and after braking using brake shoes.

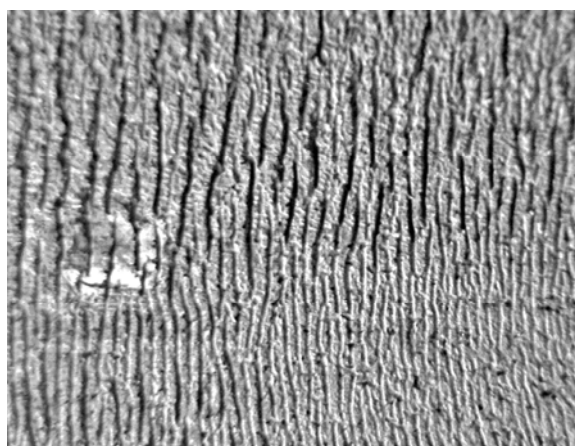
На сьогоднішній день інтенсивний розвиток техніки неможливо уявити без прогресуючого зростання рівня вимог до металів і сплавів, особливо до тих, які використовуються для виготовлення елементів конструкцій, які працюють в складних умовах температурно-силових впливів. До таких елементів відносять залізничне колесо, яке при експлуатації зазнає впливання від навантажень, температур, що циклічно змінюються, навколишнього середовища та ін. Аналіз чисельних випадків виникнення ушкоджень залізничних коліс (рис. 1) свідчить, що головною причиною руйнування металу є розвиток процесів структурних перетворень, які обумовлені неухильним накопиченням дефектів під час експлуатації колеса [1]. Вивчення механізму суб- та мікроструктурних змін в металі колеса в залежності від умов навантаження дозволить визначити причину виникнення ушкоджень і, як наслідок цього, розробити пропозиції щодо зниження визначених негативних впливів.

Мета роботи – визначення причин виникнення вищербин по поверхні кочення залізничного колеса.

Аналіз схеми можливих навантажень, яким піддається залізничне колесо під час експлуатації, показує, що чисельні впливання необхідно розділити на ті, які можливо усунути і які є невід'ємною частиною технологічного процесу роботи колеса як опорного елемента рухомого складу. До одних з впливань, які неможливо усунути, відносять розвиток процесів деформаційного зміцнення металу за рахунок взаємодії колеса з рейкою під час кочення та розігріву приповерхневого шару металу обода при взаємодії його з гальмівними елементами.



а)



б)

Рис. 1. Вищербини металу на поверхні кочення залізничного колеса (а), термічні тріщини в місцях поблизу переходу від поверхні кочення до гребеня (б)

Так, у процесі гальмування, коли напруження тертя від взаємодії колеса з гальмівними колідками перебільшує аналогічну характеристику для контактної пари колесо-рейка, досягаються умови формування наварів. Наведене

явище може бути повністю або частково усунуто за рахунок ретельного налагодження гальмівних систем рухомого складу.

Окрім екстреного гальмування при виникненні небезпеки руху, наведені засоби повинні складатися з наближення до умов одночасного початку процесу гальмування та досягнення приблизно одного рівня напружень тертя від взаємодії з гальмівною колодкою для всіх коліс визначеного потяга. Якщо формування наварів на залізничних колесах можна усунути, то запобігти формуванню «білих плям» на поверхні кочення значно складніше. На основі проведених досліджень [2] було визначено, що в порівнянні з наваром виникнення «білих плям» має свої особливості. Цей процес, подібно навару, зв'язаний з інтенсивним розігрівом металу обода, однак зчіплювання з металом рейки відсутнє. При гальмуванні в тонкому приповерхневому шарі металу обода дуже швидко зростає температура до значень, яких достатньо для початку розвитку процесів фазових перетворень [3]. Після закінчення процесу гальмування інтенсивний відвід тепла розігрітого металу до більш заглиблених об'ємів, з урахуванням стабільності аустеніту колісної сталі, може супроводжуватися структурними змінами за механізмом зсуву [3]. В цьому випадку вже незначні відхилення в стабільності процесів розігріву та охолодження металу будуть супроводжуватися виникненням визначеної структурної неоднорідності. Підтверджують наведене положення експериментальні дані, які отримані при вивченні структурних змін під час формування «білих плям». Приповерхневі шари металу (відносно поверхні кочення) мають дуже значний градієнт структур від мартенситного типу, після відпуску при різних температурах, до перлітних з різною дисперсністю (рис. 2). Така структурна неоднорідність обов'язково буде мати свої наслідки у вигляді формування неоднорідного комплексу властивостей у визначених мікрооб'ємах металу, що, в свою чергу, буде сприяти виникненню різного опору процесам зародження та зростання мікротріщин.

Окрім впливу температури на кінетику структурних перетворень в металі обода, визначене впливання на рівень внутрішніх напружень може спостерігатися з боку диску колеса. Так, дійсно, якщо вважати, що при короткочасних режимах гальмування тепловідвід від обода, окрім навколишнього середовища, незначно нагріває місця спряжиння диска і обода, то при відносно тривалих або достатньо частих гальмуваннях положення суттєво змінюється.



а)



б)

Рис. 2. Структури сталі після структурних перетворень за механізмом зсуву та відпуску при 650 °С, 5 хв. (а), ізотермічний розпад аустеніту при 650 °С (б).

Збільшення 800 (а), 2000 (б)

В цих випадках теплові впливання від ободу будуть більш значною мірою сприяти підвищенню температури диску колеса. Зміна геометричних розмірів диску буде супроводжуватися виникненням розтягуючої складової внутрішніх остаточних напружень в металі обода. Таке впливання буде сприяти зниженню опору металу зародженню та зростанню тріщин та може розглядатися як додатковий фактор, який знижує тріщиностійкість обода залізничного колеса. Окрім цього, зміні етапів гальмування та закінчення цього процесу відповідає закономірна зміна температури розігріву металу, а з урахуванням одночасного, для різних коліс та колісних пар, початку гальмування різким збільшенням амплітуди циклічної зміни температури. По характеру впливання – зміна нагріву на охолодження супроводжується зміною виникаючих деформацій за цикл. Явища, що спостерігаються, можуть бути віднесені до малоциклової втоми. В наведеному випадку за відносно малий період часу велика швидкість накопичення різноманітних дефектів кристалічної будови достатньо швидко переводить метал в стан з неконтрольованим зростанням тріщини.

За рахунок розвитку наведених процесів відбувається виникнення вищербин металу з поверхні кочення залізничних коліс [2].

На підставі аналізу проведених досліджень визначено, що підвищення надійності залізничних коліс при експлуатації може бути досягнуто за рахунок використання сталей зі зниженою концентрацією неметалевих включень різної природи походження та формування в металі структурного стану з підвищеним опором зародженню і зростанню мікротріщин.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Вакуленко И. А. Зависимость усталостной прочности от структурного состояния стали для железнодорожных колес / И. А. Вакуленко,

Н. А. Грищенко, О. Н. Перков. – В кн.: Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте. – К., 2007. – С. 242-244.

2. Класифікація несправностей вагонних колісних пар та їх елементів. – К.: Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2006. – 79 с.
3. Вакуленко І. О. Чинники, які впливають на розвиток втомленості металу в процесі експлуатації залізничних коліс / І. О. Вакуленко, О. М. Перков, М. А. Грищенко // Залізничний транспорт України, 2007. – № 5. – С. 70-71.

Надійшла до редколегії 27.03.2008.

Т. М. МЕЩЕРЯКОВА (Львівська філія ДПТУ), М. О. КУЗІН (Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАНУ)

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДВИГУНІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

З використанням методу імітаційного моделювання структури проведено аналіз впливу кількості твердої фази на параметри зносостійкості антифрикційного сплаву Б16. Розроблена методика оптимізації лінійної інтенсивності зношування в залежності від кількісного співвідношення між структурними складовими матеріалу, отримані розрахункові дані корелюють з результатами випробовувань на зносостійкість.

С использованием метода имитационного моделирования структуры проведен анализ влияния количества твердой фазы на параметры износостойкости антифрикционного сплава Б16. разработана методика оптимизации линейной интенсивности изнашивания в зависимости от количественного соотношения между структурными составляющими материала, полученные расчетные данные коррелируют с результатами испытаний на износостойкость.

A method of structure simulation was used to investigate the influence of the hard phase quantity on parameters of the wear resistance of antifriction alloy B16. A method of optimization of linear intensity of wear depending on the quantitative correlation between the structural components is developed; the calculation data obtained correlate with the results of the wear resistance tests.

В тягових двигунах локомотивів, що експлуатуються на залізницях України, використовуються бабітові вкладиші підшипників ковзання (рис. 1). Матеріал бабітового підшипника ковзання – це відносно пластична і в'язка основа з включенням твердих опорних часточок.

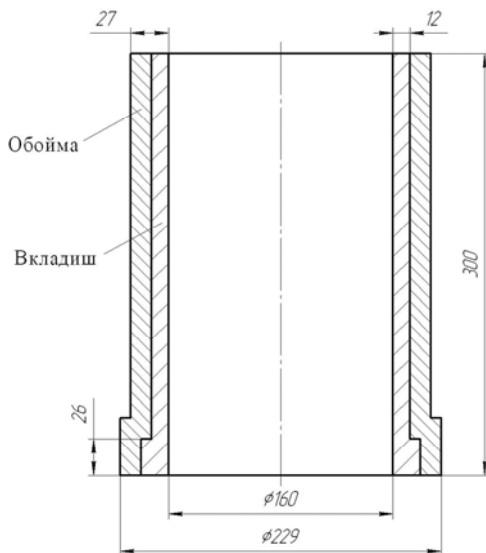


Рис. 1. Схема підшипника ковзання тягового двигуна магістрального електровоза, отриманого відцентровим литтям

В умовах тертя зношується пластична основа, а вал контактуватиме з твердими включеннями. Перевагами бабітових підшипників ков-

зання є можливість повторного використання їх матеріалу для виготовлення нових вкладишів вузлів тертя.

Виготовлення і ремонт деталей вузлів тертя тягових електродвигунів проводять методом відцентрового лиття.

Дана робота присвячена питанню вивчення впливу параметрів структури матеріалу вкладиша підшипника ковзання, який виготовлений з бабіту Б16, на його зносотривкість.

При виготовленні вкладиша підшипника використовують установки відцентрового литва з горизонтальною віссю обертання (рис. 2).

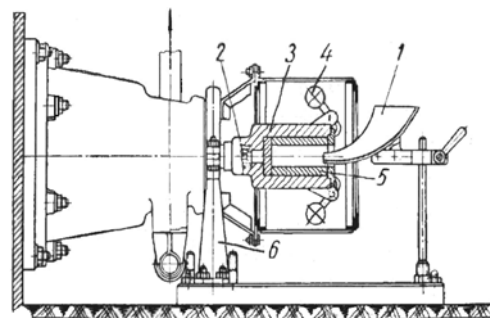


Рис. 2. Схема установки для отримання вкладиша підшипника ковзання: 1 – заливочна воронка; 2 – шток виштовхувача; 3 – виливниця; 4 – відцентровий затвор; 5 – виливок; 6 – упорний люнет

Відцентрові сили суттєво впливають на формування структури, оскільки до складу бабіту

входять фази з різними фізико-хімічними властивостями. Хімічний склад бабіту Б16 наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад бабіту Б16

Sb, %	Cu, %	Sn, %	Pb, %
15...17	1,5...2	15...17	основа

Фазовий склад сплаву складається з фаз типу: тверді включення – кристали фази SnSb матриця – свинець. Ці фази різняться за своєю питомою вагою: SnSb – $6,3 \text{ г/см}^3$ (визначено графічним методом), Pb – $11,34 \text{ г/см}^3$.

Різниця в густині приводить до того, що на частинки свинцю і зміцнюючої фази діє різне значення відцентрової сили. В результаті утворюється неоднорідна структура по перерізу вилівка, оскільки значення відцентрової сили для Pb в 1,79 рази більша, ніж для SnSb (рис. 3).

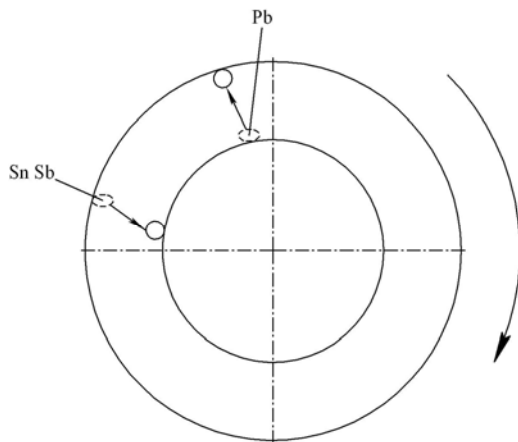


Рис. 3. Схема руху частинок в структурі бабіту Б16 при відцентровому литті

В зв'язку з цим проводили аналіз мікроструктури, визначали механічні властивості і зносостійкість сплаву по товщині вкладиша підшипника ковзання. Мікροструктурний аналіз підтвердив наявність зональної неоднорідності по товщині вкладиша, яку умовно можна поділити на три структурні зони. Перша зона, наближена до поверхні контактної взаємодії, містить найбільшу кількість зміцнюючої фази, яка в деяких ділянках утворює суцільний шар, а м'яка матриця розташована у вигляді окремих ділянок (рис. 4).

У другій зоні зростає кількість ділянок м'якої складової, які утворюють навколо зміцнюючої фази суцільні оторочки або окремі ділянки (рис. 5 а, 5 б).

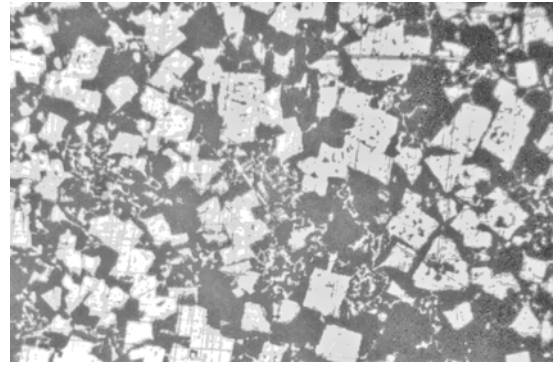


Рис. 4. Мікροструктура вкладиша підшипника з бабіту Б16 біля краю контактної взаємодії отриманого відцентровим литтям (зона 1), $\times 125$

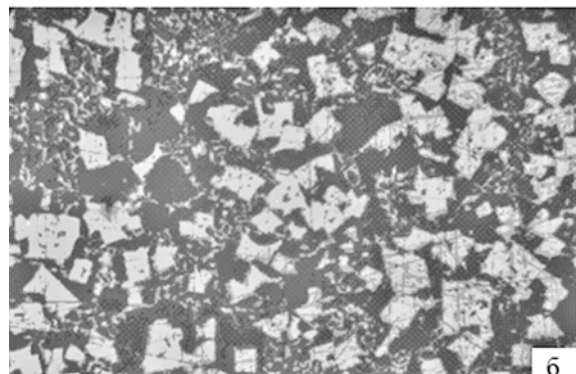
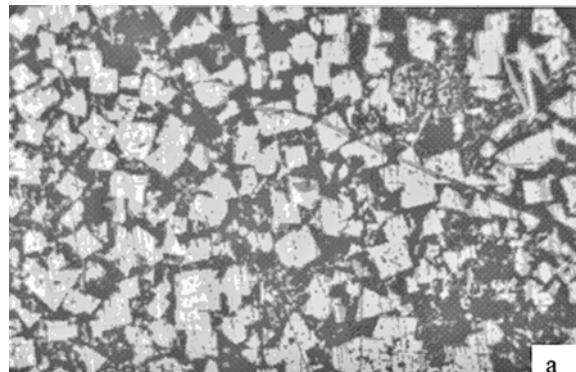


Рис. 5. Мікροструктура вкладиша підшипника з бабіту Б16, отриманого відцентровим литтям (зона 2); світлі включення – зміцнюючі фази SnSb і Cu_3Sn , окремі голки – Cu_2Sb ; темні ділянки – твердий розчин на основі свинцю, $\times 125$:
а – $\approx 4600 \text{ мкм}$; б – $\approx 5200 \text{ мкм}$
(від краю контактної взаємодії)

В третій зоні зустрічаються окремі часточки зміцнюючої фази, які в окремих місцях виходять на зовнішню поверхню вкладиша підшипника ковзання (рис. 6 а, 6 б). Аналіз результатів показав різне значення кількості зміцнюючої фази в досліджених зонах. Вміст зміцнюючої фази в зоні I коливається від 74 % до 43 %; в зоні II – від 60 % до 11 %; в зоні III – вміст включень з 11 % поступово зменшується до нуля і біля зовнішнього діаметра вкладиша структура складається з матриці – Pb (рис. 7).

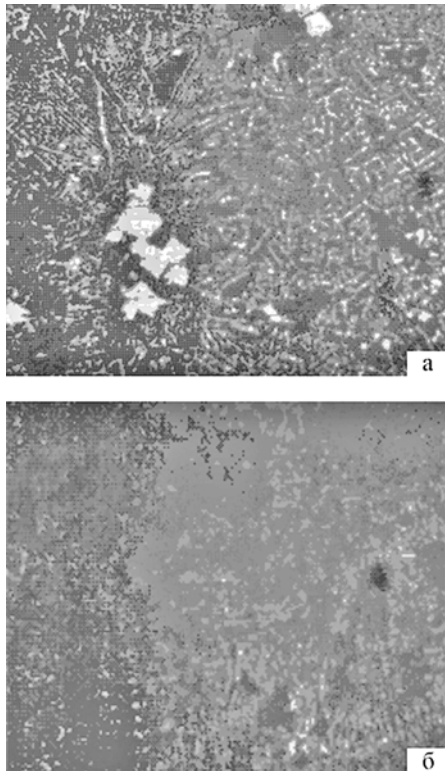


Рис. 6. Мікроструктура вкладки підшипника з бабіту Б16, отриманого відцентровим литтям (зона 3), $\times 125$: а – ≈ 14800 мкм; б – ≈ 16000 мкм (від краю контактної взаємодії)

Для вивчення впливу параметрів структури бабіту Б16 на його зносостійкість використали метод імітаційного моделювання. При аналізі поведінки бабіту Б16 в умовах тертя представляли його матеріал як гетерогенне (неоднорідне) середовище. Опис поведінки матеріалу в умовах тертя проводили з використанням ієрархічних багаторівневих моделей механіки деформованого середовища.

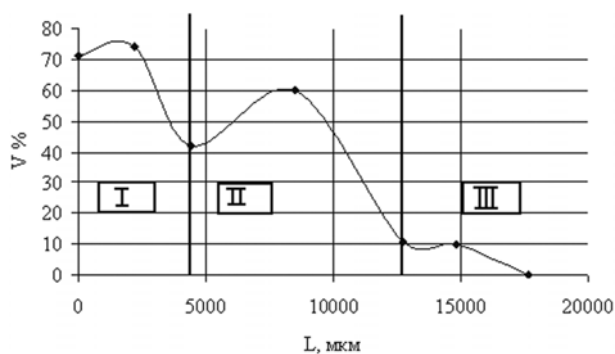


Рис. 7. Вміст зміцнюючої фази в бабіті Б16 по товщині вкладки підшипника ковзання від поверхні контактної взаємодії

Розглядалися наступні варіанти структурних рівнів, що спираються на системи масштабних

факторів, які відповідають різним ієрархічним розмірам фізичних об'єктів: а) рівень елементарних об'ємів компонентів (мікрорівень); б) рівень елементів структури (мезорівень); в) рівень ефективних характеристик (макрорівень).

На рівні елементарного мікрооб'єму (мікрорівні) вибирається такий об'єм матеріалу, розміри якого набагато більші міжатомних віддалей, але менші характерних розмірів фазових складових сплаву. На цьому рівні справедливі положення механіки суцільного ізотропного середовища. На мезорівні розглядається об'єм матеріалу, розміри якого складали 10^2 розміру структурних компонент. Мезорівень являє собою фрагмент кусково-неоднорідного середовища. На макрорівні матеріал розглядається як квазіоднорідне середовище, властивості якого за просторовими координатами змінюються достатньо повільно, що дозволяє приймати їх постійними в околі характерних точок. Такий матеріал характеризується ефективними властивостями, які є узагальненням інформації про поведінку матеріалу на мезорівні. Характерні розміри області, яка аналізується, є 10^2 - 10^3 розмірів структурних складових, які можуть бути співставленні з усім матеріалом.

Вхідними параметрами при побудові імітаційної моделі в роботі були наступні: 1) відсоткове співвідношення структурних складових; 2) набір параметрів, які характеризують форму і розміри складових; 3) розподіл структурних складових за розмірами. Метод імітаційного моделювання дозволив побудувати фрагмент структури матеріалу за вищевказаними параметрами.

За допомогою імітаційної моделі були побудовані фрагменти мезоструктур, які відповідають 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 % вмісту твердої складової в бабітах (рис. 8).

В дослідженому модельному матеріалі модуль пружності м'якої складової вибрали на рівні 23,5 ГПа (прийняли рівним модулю пружності свинцю), а модуль пружності твердої складової прийняли як середнє значення між модулем пружності олова (58,6 ГПа) і сурми (54,9 ГПа). Визначення коефіцієнта Пуассона фази SnSb проводили аналогічно.

Для визначення і опису механічних властивостей модельного структурно-неоднорідного матеріалу був використаний метод скінчених елементів, а також теорія ефективних властивостей.

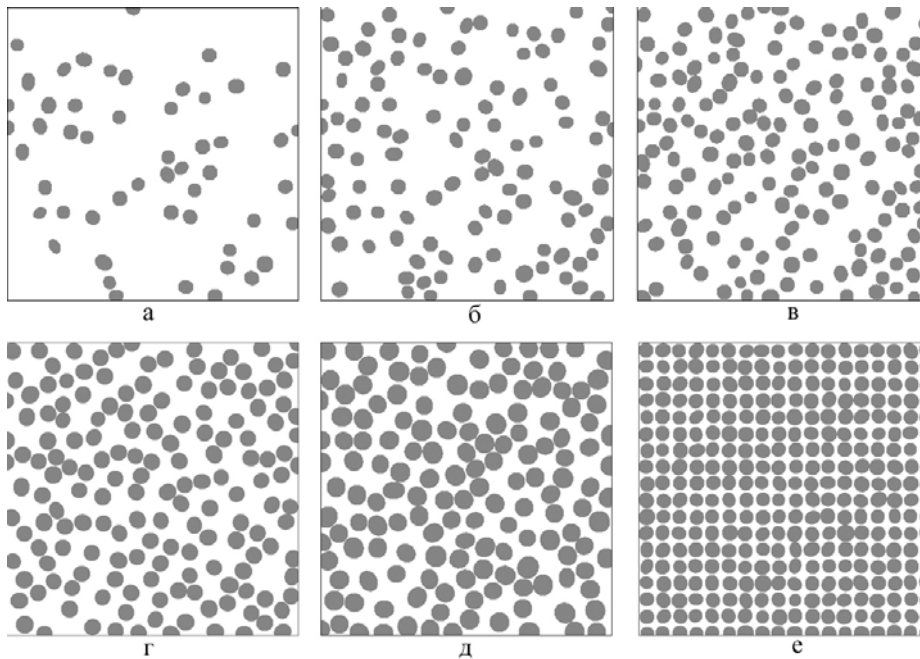


Рис. 8. Імітаційні моделі гетерогенних матеріалів: білий колір – м'яка складова, темний колір – тверда складова; а – 10 % твердої складової; б – 20 % твердої складової; в – 30 % твердої складової; г – 40 % твердої складової; д – 50 % твердої складової; е – 60 % твердої складової

Згідно з цими підходами, якщо реакція структурно-неоднорідного матеріалу на зовнішнє навантаження еквівалентна реакції деякого однорідного матеріалу, який знаходиться в аналогічних умовах навантаження, то властивості такого матеріалу можуть бути прийняті в якості ефективних властивостей структурно-неоднорідного матеріалу (рис. 9).

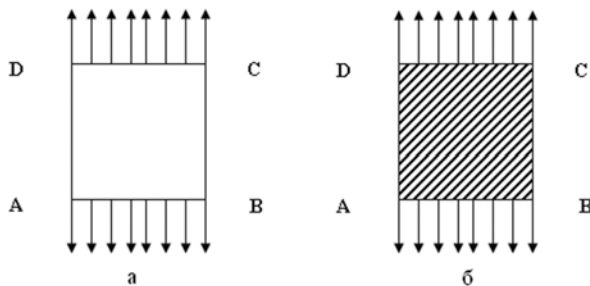


Рис. 9. Граничні умови в чисельному експерименті для визначення ефективних властивостей структурно-неоднорідного матеріалу:
а – фрагмент структурно-неоднорідного матеріалу,
б – еквівалентний однорідний матеріал з ефективними властивостями; граничні умови:

$$A-B, C-D: \sigma_1 = \sigma^*, \tau_{21} = 0;$$

$$B-C, D-A: \sigma_2 = 0, \tau_{12} = 0$$

Умовою еквівалентних реакцій двох матеріалів на зовнішнє навантаження може бути прийнята умова рівності їх питомих енергій деформування:

$$W^{eq} = W^{het}, W^{eq} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij})d\varepsilon_{ij},$$

$$W^{het} = \frac{1}{V} \left(\sum_k \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} V_k \right), V = \sum_k V_k \quad (1)$$

де W^{eq} – потенційна енергія деформування однорідного матеріалу, W^{het} – потенційна енергія деформування структурно-неоднорідного матеріалу, V_k – об'єм матеріалу, що належать різним структурним компонентам, k – число компонентів з різними фізико-механічними властивостями.

З використанням методу скінчених елементів розроблено програмний комплекс, який дозволяє розраховувати механічні властивості матеріалів в залежності від вмісту структурних складових. При цьому в програмі можна задавати параметри механічних властивостей структурних складових (рис. 10). Результати розрахунків наведені в табл. 2 та на рис. 11, 12.

Показано, що суттєва зміна модуля пружності і коефіцієнта Пуассона спостерігається за наявності в структурі твердої складової в кількості від 40 % до 60 %.

Встановлено функціональні залежності механічних характеристик матеріалу від його структурних складових з використанням поліноміальної інтерполяції [4].

В результаті, за допомогою програми Maple 6.0, були отримані наступні аналітичні залежності механічних характеристик матеріалу від процентного вмісту складових:

$$E(x) = 32.2100 - 2.2415 \cdot x + 0.2617 \cdot x^2 - 0.0114 \cdot x^3 + 0.0002 \cdot x^4 - 1.4175 \cdot 10^{-5} \cdot x^5, \quad (2)$$

$$\mu(x) = 0.5739 - 0.0309 \cdot x + 0.0023 \cdot x^2 - 0.8202 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 0.1319 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 0.7867 \cdot 10^{-8} \cdot x^5. \quad (3)$$

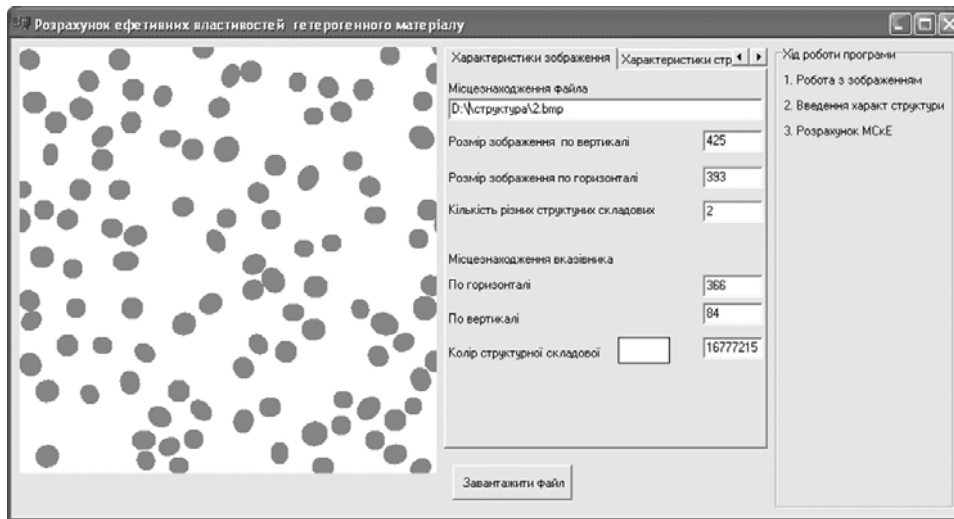


Рис. 10. Інтерфейс програми під час розрахунку гетерогенного фрагменту матеріалу

Таблиця 2

Результати чисельних експериментів з дослідження впливу структури бабіту Б16 на механічні властивості

Номер експерименту	Відсоток		Номер «структури»	Модуль пружності твердої складової, ГПа	Модуль пружності м'якої складової, ГПа	Коефіцієнт Пуасона твердої складової	Коефіцієнт Пуасона м'якої складової	Еквівалентний модуль пружності (результат чисельного експерименту), ГПа	Еквівалентний коефіцієнт Пуасона (результат чисельного експерименту)
	Твердої складової	М'якої складової							
1	10	90	1	56,8	23,5	0,365	0,446	26,57	0,4279
2	20	80	2	56,8	23,5	0,365	0,446	30,56	0,4169
3	30	70	3	56,8	23,5	0,365	0,446	31,39	0,4055
4	40	60	4	56,8	23,5	0,365	0,446	33,45	0,386
5	50	50	5	56,8	23,5	0,365	0,446	41,3	0,384
6	60	40	6	56,8	23,5	0,365	0,446	42,66	0,364



Рис. 11. Залежність модуля пружності матеріалу від відсоткового вмісту твердої (SnSb) і м'якої (Pb) складових

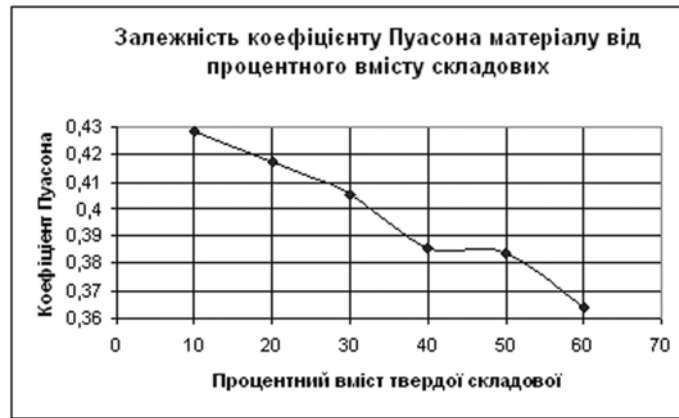


Рис. 12. Залежність коефіцієнту Пуасона матеріалу від відсоткового вмісту твердої (SnSb) і м'якої (Pb) складових

Одержані результати дозволяють визначити контурний тиск P_c і середній фактичний тиск при контакті P_r [4]:

$$P_c = 0.2 \cdot E^{0.8} \left(\frac{H_B}{R_\beta} \right)^{0.4} \cdot P_a^{0.2}, \quad (4)$$

$$P_r = 0.5 \cdot E^{\frac{2V}{2V+1}} \cdot \Delta^{\frac{V}{2V+1}} \cdot P_c^{\frac{1}{2V+1}}, \quad (5)$$

де Δ – комплексна характеристика шорсткості; H_B – висота хвилі; R_β – радіус хвилі; V – параметр опорної поверхні; P_a – номінальний тиск.

Величина цих тисків безпосередньо впливає на лінійну інтенсивність зношування, оскільки згідно [4] вона дорівнює:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot 2^{\frac{1}{2V}} \cdot P_a \cdot P_c^{\frac{1}{2V}} \cdot P_r^{t-1} \cdot \Delta^{\frac{1}{2V}} \cdot \left(\frac{kf_M}{\sigma_0} \right)^{t_y}, \quad (6)$$

де K_1 – стала, яка залежить від параметрів геометрії нерівностей; α – коефіцієнт перекриття; σ_0 – параметр фрикційної втоми; f_M – молекулярна складова сили тертя.

Проведемо оптимізацію лінійної інтенсивності зношування за відсотковим вмістом твердої складової в гетерогенному матеріалі, вважаючи, що параметри поверхні контакту є заданими:

$$\frac{dI}{dx} = 0, \quad (7)$$

$$x = 56.3445. \quad (8)$$

При заданому значенні x друга похідна $\frac{d^2I}{dx^2} > 0$, тобто забезпечується мінімум інтен-

сивності зношування.

Одержані результати корелюють з дослідженнями підшипника ковзання, отриманого методом відцентрового литва, наведеними в роботі [6]. Як видно, за наявності в структурі 54...58 % твердої фази SnSb зносостійкість бабіту Б16 є найвищою (рис. 13).

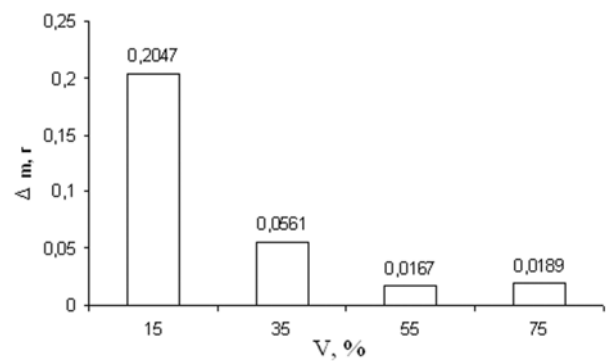


Рис. 13. Вплив кількості фази SnSb на зносостійкість бабіту Б16

Висновки:

1. З використанням уявлень про багаторівневий характер формування механічних властивостей матеріалу контактуючих систем та розробленої імітаційної моделі структури проведено кількісний аналіз впливу твердої складової від 10 до 60 % на модуль пружності і коефіцієнт Пуасона бабіту Б16.

2. Більш точний розрахунок пружних характеристик на основі аналізу механічних властивостей дозволив розробити методику чисельної оцінки лінійної інтенсивності зношування гетерогенного матеріалу із врахуванням його структури.

Проведена оптимізація отриманих залежностей дозволила встановити оптимальний вміст твердої фази в бабіті Б16 на рівні 56,34 %, при якій спостерігається підвищення зносостійкос-

ті, що підтверджується результатами проведених експериментальних досліджень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Горячева И. Г. Механика фрикционного контактного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
2. Арзамасов Б. И. Материаловедение / Б. И. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
3. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: Справочник, 2-е изд. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
4. Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Т. Корн, Г. Корн. – М.: Наука, 1977.
5. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2-х кн. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978.
6. Бурак Я. Технологічне підвищення стійкості проти спрацювання підшипників ковзання шляхом оптимізації параметрів структури контактуючих металічних систем / Я. Бурак, М. Кузін, О. Кузін // Машинознавство, 2006. – № 2. – С. 38-43.

Надійшла до редколегії 27.03.2008.

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ДЕРЖАВНОГО ВТРУЧАННЯ У ПЕРЕРОЗПОДІЛ ДОХОДІВ

Стаття присвячена теоретико-методичним проблемам дослідження факторів впливу державного регулювання процесів розподілу доходів. Аналізується ефективність державного регулювання перерозподілом доходів.

Статья посвящена теоретико-методическим проблемам исследования факторов влияния государственного регулирования процессов распределения доходов. Анализируется эффективность государственного регулирования перераспределения доходов.

The paper is devoted to theoretical and methodic problems of research of factors of influence of the state regulation of the processes of incomes distribution. The efficiency of state regulation of redistribution of incomes is analyzed.

Відомо, що державне регулювання, як і ринковий механізм, має свої плюси та мінуси. В цьому контексті значимим і вагомим стане вибір співвідношення державних та ринкових пропорцій взаємовпливів на проведення економічних відносин, а в деяких випадках і спільні дії щодо управління народним господарством, тобто, коли ринок дає збій, держава може відкоригувати результати його роботи і домогтись поліпшення функціонування економіки.

Однак саме по собі державне регулювання економіки далеко не ідеальне. Воно також має свої недоліки, які самі можуть служити джерелом економічної неефективності. Прикладом цього слугує теорія суспільного вибору, яку розробляли свого часу Дж. Б'юкенен, Д. Мюллер, У. Нісканен, М. Олсон та яка спрямовується як раз на дослідження чинників неефективності державного регулювання економіки.

Державні заходи, які покладаються на перерозподіл національних доходів, в економічній науці оцінюються неоднозначно. Деякі науковці вважають, що активне втручання держави в процеси збору та перерозподілу фінансових ресурсів, важелі вирівнювання доходів населення призводять до зниження ділової (підприємницької) активності в суспільстві й скороченню ефективності відтворювальних процесів у виробництві в цілому.

Зменшення підприємницької активності, у свою чергу, обмежує розміри надходження податків, обумовлює необхідність формування інших заходів для реалізації державних програм щодо соціальних виплат, адже їх невиконання спонукає до зростання негативних

настроїв в суспільстві. Адже, як зауважує П. Хейне, дійсно люди, що мають яхти – багаті, а люди, які риються на смітниках – бідні.

Але якщо державою будуть введені нові правила, згідно з якими кожен власник яхти буде обкладатись щорічним податком у 10 тис. дол. США, які будуть надходити до спеціального фонду "смітників", та якщо кожний із цих "поміічників" одержить право на отримання з цього фонду щорічної грошової допомоги, наприклад, у розмірі 2000 дол., то швидше за все, відбудеться наступне: кількість власників зареєстрованих яхт скоротиться, а число осіб, що називають себе "поміічниками", дивно швидко зросте.

Нерівність у розподілі доходів породжує в країні соціальне розшарування суспільства на багатих і бідних. Визначення бідності, так само як і визначення щастя та благополуччя, є поняттям достатньо складним.

Як правило, основою для ідентифікації бідності визначається мінімальний споживчий бюджет. У такому бюджеті видаткова частина складається на основі набору життєво необхідних людині або його родині споживчих товарів, послуг та інших витрат. Мінімальний споживчий бюджет людини (родини) розглядається як бюджет фізіологічного мінімуму, як мінімальні заходи щодо підтримки здоров'я та благопристойності, або як бюджет мінімального достатку. Мінімальний достаток визначається як границя сімейного доходу, за якою не забезпечується відтворення населення. На його основі визначається поріг бідності і розраховується так званий прожитковий мінімум.

Поряд із мінімальним споживчим бюджетом розраховують також раціональний та реальний споживчі бюджети. Раціональний споживчий бюджет – це теоретично розроблений ідеальний бюджет, у якому видаткова частина формується, виходячи із раціональних норм споживання матеріальних та духовних благ, послуг у їх визначеному й доцільному з наукового погляду наборі споживчих продуктів. Раціональний споживчий бюджет – це інструмент соціально-економічного аналізу й орієнтир, або мета, до якої варто прагнути. Реальний споживчий бюджет відбиває доходи і витрати родин, які реально склались, та які обчислюються за місяць або рік.

Перерозподіл доходів пов'язують також із витокотом коштів. За розрахунками А. Оукена, витік через “діри худого відра перерозподілу” складає 250 дол., з кожних 350 дол., що призначені для грошової допомоги. Кошти ідуть, в основному, не за призначенням, а спрямовуються на утримання чиновників, розкрадаються, тощо.

Неокласики сучасного спрямування вказують також і на ті обставини, що нерівність у доходах, у значній мірі породжується об'єктивною дією ринкового цінового механізму. Адже прагнення цілком знищити диференціацію доходів означало б намір цілком зруйнувати сам ринковий механізм.

Інші науковці вважають, що скорочення ролі держави у регулюванні доходів населення призведе до росту диференціації доходів, соціальної напруженості, загострення соціа-

льних конфліктів, а в підсумку до падіння виробництва, зниження його ефективності.

Різномірні наукові підходи до значення та меж державного втручання у перерозподіл доходів зводяться у кінцевому підсумку до проблем протиставлення ефективності державного впливу і соціальної рівності, та соціальної справедливості такого перерозподілу.

Тому масштаби втручання держави у перерозподіл доходів повинні визначатись рівнем економічного розвитку країни, співвідношенням політичних сил, духовними підґрунтям суспільства, а також визначеним рівнем суспільної самосвідомості.

БИБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аткинсон Э. Б. Лекции по экономической теории государственного сектора / Э. Б. Аткинсон, Дж. Э. Стиглиц. – М.: Аспект Пресс, 1995. – 832 с.
2. Базилевич В. Д. Державні фінанси: Навч. посіб. / В. Д. Базилевич, Л. О. Баластрик; За заг. ред. В. Д. Базилевича. – К.: АТІКА, 2002. – 368 с.
3. Василик О. Д. Теорія фінансів. – К.: Основи, 2002. – 547 с.
4. В. С. Власюк. Важелі управлінських впливів на проведення фінансово-кредитної політики: Монографія. – Д.: ДНУЗТ, 2006. – 268 с.
5. Деньги: [Публ. зарубез. ученых-экономистов по вопросам ден. политики в условиях рыноч. отношений / Сост. авт. вступ. ст. А. А. Чухно]. – К.: Украина, 1997. – 509 с.

Надійшла до редколегії 19.02.2008.

ЛЮДСЬКИЙ КАПІТАЛ: ВИЗНАЧЕННЯ, ОСОБЛИВОСТІ, ВІДТВОРЕННЯ

У статі досліджено категорію «людський капітал»: з'ясовано різницю у підходах до визначення людського капіталу; узагальнені та систематизовані особливості людського капіталу; досліджено процес його відтворення.

В статье проведено исследование категории «человеческий капитал»: определена разница в подходах к трактовке человеческого капитала; обобщены и систематизированы особенности человеческого капитала; исследован процесс его воспроизводства.

In the article the research of category «human capital» is conducted: the difference in approaches to interpretation of human capital is determined; the features of human capital are generalized and systematized; the process of its reproduction is explored.

Вступ. Перехід економічно розвинутих країн світу до постіндустріального етапу розвитку має тісний зв'язок з процесом накопичення та зростання людського капіталу. У ХХІ столітті лідером буде не та країна, яка має більше природних ресурсів або основних фондів і навіть фінансів, а та, яка володітиме більшим і якіснішим людським капіталом. В Україні, на жаль, склалась така ситуація, коли люди для багатьох державних діячів, керівників підприємств, підприємців втрачають цінність. Західна теорія та практика також не відразу стала цінити людину, але коли склалась відповідні обставини і західна система вичерпала ресурси індустріального етапу розвитку, раціональний західний менталітет зробив ставку на людину. Зараз ми маємо можливість не проходити десятиріччями той шлях, який подолали західна наука та практика, а зробити значний стрибок уперед, скориставшись позитивним досвідом. Тому нам необхідно осмислення теорії людського капіталу та досвіду її практичного використання.

Теорія людського капіталу виникла у 60-х роках на Заході. Цей науковий напрям створили та розвинули такі відомі американські та англійські вчені як: Г. Беккер, Т. Шульц, Л. Туроу, М. Блауг, С. Боуле, У. Боуен, Б. Кикер, Е. Денісон, Дж. Кендрік, Ф. Уелч та ін.

У 90-х роках дана проблематика набула свого розвитку у працях російських, українських та білоруських вчених: В. Автономова, В. Антонюка, Ю. Биченко, А. Добриніна, С. Дятлова, П. Дьоміна, Р. Капелюшнікова, М. Критського, І. Кокарева, Н. Кротової, Л. Лісогор, І. Нікітіної та ін.

Але категорія «людський капітал» є досить новою для вітчизняної науки, і тому існує багато питань, які потребують аналізу та подальшої теоретичної розробки, зокрема ті, які і будуть розглядатись у статті. Завдання статті полягає у

тому, щоб: пояснити різницю у підходах до визначення категорії «людський капітал»; узагальнити та систематизувати особливості людського капіталу; проаналізувати процес його відтворення.

Викладення основного матеріалу. Виникнення теорії людського капіталу було пов'язане з двома моментами. По-перше, з тим, що і науковці і менеджери стали визнавати визначальну роль людини у процесі виробництва, забезпеченні конкурентних позицій як окремого підприємства, так і країни у цілому. Стало зрозумілим, що без значних інвестицій у розвиток людини, тобто її освіти, підвищення кваліфікації, творчих здібностей, а також у її здоров'я підприємство не буде мати стабільного розвитку та лідерства на ринку. І, по-друге, з необхідністю економічної оцінки інвестицій у розвиток людського потенціалу.

Дотепер не існує єдиного визначення цієї складної категорії. Але усі автори підкреслюють декілька важливіших ознак:

- це активи, які є у людини у вигляді природжених якостей: фізичних, психологічних, інтелектуальних, а також ті якості, здібності, які набуває людина протягом життя (знання, вміння, навички, мотивація);

- це активи, які потребують значних інвестицій;

- це активи, які генерують на протязі певного періоду часу доход.

Так, один із класиків теорії людського капіталу Г. Беккер визначав, що «людський капітал – це сукупність природжених здібностей та отриманих знань, навичок, мотивацій, доцільне використання якої сприяє збільшенню доходу (на рівні індивіду, підприємства або суспільства)» [1, с. 162]. Також він підкреслював, що «людський капітал формується за рахунок інвестицій у людину, серед яких можливо назвати

навчання, підготовку на виробництві, витрати на охорону здоров'я, міграцію та пошук інформації про ціни та доходи» [1, с. 29].

Едвін Дж Долан під людським капіталом розуміє «капітал у вигляді розумових здібностей, отриманий через формальне навчання чи освіти, або через практичний досвід» [2, с. 250]. С. Фішер дає наступне визначення: «людський капітал – це ступінь утіленої у людині спроможності приносити дохід. Людський капітал включає природжені здібності, талант, освіту, набуту кваліфікацію» [3, с. 303].

Західні теоретики підкреслювали важливість інвестицій в освіту та здоров'я людини, важливість освіти протягом усього життя. Також вони розуміли важливу роль усіх ланок суспільства у формуванні людського капіталу: сім'ї, яка дає виховання та забезпечує інвестування в освіту; підприємства, яке створює умови для життя і розвитку людини як творчої особистості; і держави, яка повинна створювати умови для гармонійного розвитку людини у суспільстві, а також брати на себе важливіші функції управління людським капіталом – державні інвестиції у розвиток освіти, здоров'я, культури, регулювання заробітної плати та ринку праці, рівня майнової диференціації у суспільстві, регулювання правових відносин у цій сфері та інші.

Сучасні російські, українські, білоруські автори вносять доповнення до визначення цієї складної категорії, наведемо окремі з них.

П. Дьомін вважає, що людський капітал можна охарактеризувати, як «природжений, сформований в результаті інвестицій і накопичений визначений рівень здоров'я, освіти, навичок, здібностей, мотивацій, енергії, культурного розвитку, як конкретного індивіду, групи людей, так і суспільства в цілому, які доцільно використовуються в тій чи іншій сфері суспільного відтворення, сприяють економічному росту та впливають на розмір доходів їх володаря» [4].

Н. В. Кротова пропонує включати в структуру людського капіталу не тільки здібності людей до продуктивної праці, але й соціальні, психофізичні, культурні здібності людини [5]. Ю. Г. Биченко виділяє у складі людського капіталу культурний капітал [6].

І. А. Кокарев дає таке визначення людського капіталу: це сукупність творчих здібностей, особистісних якостей та мотивації індивідів, які знаходяться в їх власності, накопичуються за рахунок інвестицій та використовуються в тій чи іншій сфері суспільного виробництва на протязі усього періоду трудового життя робітників з метою отримання ними у майбутньому більшого доходу [7, с. 25].

А. І. А. Нікітіна вважає, що у визначенні людського капіталу необхідно зробити акцент на зростанні національного багатства країни [8].

Тобто, активи людського капіталу доповнюються такими важливішими якостями як культура людини, її моральні якості, а ми пропонували внести до активів капітал духовної культури людини [9].

Крім того, ми вважаємо вірним той погляд, що мова повинна йти не тільки про генерування доходу. Людина дає суспільству не тільки матеріальну користь, але і здійснює певну соціальну, культурну, виховну діяльність, яка впливає на формування духовно-моральних якостей окремої особистості та суспільства у цілому. Тому результатом функціонування людського капіталу буде також соціальна користь, збільшення національного багатства країни.

Для ефективного управління людським капіталом необхідно мати на увазі наступні його особливості.

Особливі характеристики:

- людський капітал неможливо відокремити від людини, тому купити або продати можливо лише його послуги;

- у складі людського капіталу необхідно виділяти загальний та специфічний;

- важливішими елементами якості людського капіталу, які можливо виділити як самостійні об'єкти управління, є професійний рівень, кваліфікаційний рівень, якість інтелектуальних здібностей та рівень духовно-моральної культури особистості.

На які процеси та показники впливає:

- людський капітал є основною умовою економічного зростання;

- зростання людського капіталу впливає на зростання продуктивності праці, зниження витрат та підвищення доходів підприємства, повинно підвищувати якість продукції та обслуговування, а отже впливати на підвищення ефективності діяльності та забезпечення конкурентоспособності підприємства;

- вірне використання людського капіталу повинно впливати на зростання доходів робітника та ступеня його задоволеності працею.

Витрати та визначення віддачі:

- формування людського капіталу потребує значних витрат як від самої людини, так і від організації, суспільства у цілому;

- інвестиційний період триває 12...20 років – значно більше, ніж у фізичного капіталу [7, с. 34].

- інвестиції в людський капітал пов'язані з високим ризиком;

- інвестиції у людський капітал здійснюють довгостроковий вплив на виробничий процес і їх віддача розподіляється на той час, поки робітник зайнятий виконанням доцільної діяльності. Тому гостро стає проблема закріплення персоналу, який отримав навчання за рахунок організації;

- інвестиції у людський капітал здійснюються як у грошовій, так і не у грошовій формі: витрат часу, психологічних зусиль, соціальної підтримки. Виробничий досвід, професійні навички можуть бути отримані за допомогою навчання на практиці і за допомогою досвіду колег, але для цього необхідна відповідна організаційна культура;

- інвестиції у людський капітал дають значний за обсягом, довготривалий за часом та інтегральний за характером економічний та соціальний ефект;

- рівень накопичення людського капіталу за рахунок інвестицій, а також ефективність вкладень в нього принципово не може бути оцінено з тою точністю, як віддачу від основного капіталу.

Ступінь віддачі, на нашу думку, залежить від:

- суб'єктивних якостей особистості (інтереси, цінності, мотивація, світогляд, рівень культури, стан здоров'я та матеріальний стан);

- факторів, які створені на підприємстві (системи управління персоналом підприємства, у тому числі системи мотивації, стилю керівництва; організаційної культури, культури збереження та обміну інформацією, морально-психологічного стану колективу та відношенням з безпосереднім керівником);

- від соціально-економічного та морально-психологічного стану у країні.

У загальному вигляді процес відтворення людського капіталу включає наступні стадії: формування, розподіл, використання, поповнення та розвиток, інвестування [7, с. 31].

Формування людського капіталу відбувається шляхом виховання особистості в сім'ї, через механізм соціальної взаємодії і спілкування та через механізми соціалізації і професіоналізації у відповідному інституціональному середовищі (система освіти та культури, інформаційний простір, система виробництва). Мета формування людського капіталу підприємства полягає у забезпеченні достатнього для його ефективного функціонування рівня професійно-кваліфікаційних та морально-психологічних якостей працівників.

Розподіл людського капіталу відбувається через ринок праці, а використовується він в системі виробництва, яка включає підсистеми відбору та розстановки кадрів, організації, оплати, мотивації праці, умови для професійного та кар'єрного зростання.

Функціонування (використання) людського капіталу безпосередньо пов'язане з процесом праці та передбачає його утримання та підтримку через належну оплату праці, надання пільг або соціального пакету.

Поповнення та розвиток здійснюється в освітніх, інформаційних, рекреаційних, культурних системах, системі охорони здоров'я.

Усі стадії процесу відтворення потребують значних інвестицій, які повинні здійснюватись на усіх рівнях: особистість, сім'я, підприємство, держава. Крім цього, сам процес відтворення і окремі його стадії повинні регулюватись з боку держави. Вона повинна забезпечити умови для створення нових робочих місць, належної оплати праці, збереження та гармонійного розвитку людини через ефективне законодавство та механізми фінансування. Величезне значення має державна концепція освіти та політика держави у цій сфері.

Провідні фахівці, менеджери визнають, що цінність робітника полягає не тільки у його вузькій кваліфікації, а насамперед у загальних знаннях, ерудиції, спроможності оцінювати процеси, які відбуваються у суспільстві та в економіці. Ці знання та здібності дають можливість швидко адаптуватися до змін, приймати найбільш ефективні рішення. Більш того, окрім знань людина повинна мати високі моральні якості, духовну культуру. На жаль, ми майже кожного дня спостерігаємо залежність між низьким рівнем духовної культури та моральності і відповідними діями деяких державних діячів, які впливають на усе наше суспільство. Корупційність, економічні злочини, висока майнова диференціація у суспільстві, розкрадання державного майна – це наслідок саме морально-духовного стану певної частини суспільства. За роки ринкових перетворень, окрім нашої промисловості, ми майже втратили нашу освіту, а саме такий її важливіший елемент, як виховання моральності, духовної культури. Внаслідок складного становища у промисловості, на залізничному транспорті, у науці не завжди можливо забезпечити належний зв'язок між навчальними закладами, наукою та виробництвом.

Тому концепція сучасної вищої освіти повинна базуватись на сполученні таких важливіших елементів:

- підготовка повинна мати загальноосвітній характер, а на останніх курсах мати професійну спрямованість;

- у процесі підготовки важливіший елемент – це виховання культури, моральності (це стосується усієї системи освіти);

- професійна підготовка майбутнього спеціаліста повинна здійснюватись у тісному переплетінні з практикою на виробництві, дипломні роботи повинні мати насамперед практичне значення;

- держава повинна фінансувати освіту за пріоритетними та дефіцитними напрямками та спеціальностями, сприяти росту інтелектуального потенціалу нації;

- процес освіти, підвищення кваліфікації, самовиховання повинен бути безперервним і це повинні розуміти як освітяни, так і ті, хто навчається, це вимоги часу.

Взагалі, ефективність процесу відтворення людського капіталу залежить від узгодженості між усіма його етапами (формування, розподіл, використання, поповнення та розвиток, інвестування), забезпечуючими системами (ринок праці, підприємства, система освіти та культури, охорони здоров'я, інформаційний простір), важелями (економічні, правові, ідеологічні), ланками (особистість, сім'я, підприємство, держава).

Невідповідність призведе до негативних трансформацій людського капіталу, які ми спостерігаємо в економіці України: це відтік за кордон найбільш кваліфікованих працівників, інтелектуального потенціалу країни; нестача кваліфікованих робітничих кадрів і надмірна кількість фахівців, які мають економічну чи юридичну освіту; використання отриманої освіти не за призначенням, тобто розбалансованість ринку праці; незадоволеність працею, і, як слідство, зниження її якості та ефективності, концентрація працівників на забезпеченні лише матеріальних благ без творчої реалізації. Ці негативні процеси, у тому числі, зв'язані з існуванням значного нелегального сектору в економіці України, високим ступенем соціальної та майнової диференціації у суспільстві, нерегульованістю між потребою ринку праці та підготовкою системою освіти відповідних фахівців, взагалі відсутністю у держави зваженої освітньої політики, політики розвитку виробництва та науки, без яких неможливий розвиток економіки і відповідно створення нових робочих місць.

Державна політика зайнятості повинна бути безпосередньо пов'язана з потребами ринку праці та бути динамічною. Держава повинна створювати нові робочі місця і стимулювати підприємств, які створюють ці місця у галузях, пріоритетних для розвитку держави і, насамперед, у сфері інтелектуального розвитку. Витрати держави на науку та освіту необхідно розглядати у якості довгострокових інвестицій, які у подальшому принесуть прибуток у вигляді наукових знань, навиків, досвіду народу, допоможуть здійснити духовно-інтелектуальний прорив. Приймаючи рішення сьогодні, не слід забувати, що їх результати будуть отримані через багато років, оскільки це необхідний діапазон спадкоємності поколінь.

Висновки. Сутність концепції людського капіталу полягає у значущості накопичення людиною знань, досвіду, кваліфікації, збереженні здоров'я, у необхідності здійснення від-

повідних інвестицій, і у тому, що цим процесом необхідно керувати на усіх рівнях: держава, галузь, підприємство, сім'я, особистість. Різниця у визначеннях цієї категорії полягає у тому, які якості людини включають в актив людського капіталу, та що саме чекають від вкладень у людину: доходів, соціального ефекту, зростання національного багатства. Підхід західних теоретиків робить акцент на людському капіталі як джерелі доходів. Тоді як підхід зазначених нами російських, українських, білоруських вчених розглядає людину як особистість з її психологічними та духовно-моральними якостями, а капітал розглядає як складну категорію: не тільки як гроші, але і як народний капітал, у складі якого є нематеріальні активи і який приносить користь усьому суспільству. Цей підхід ми вважаємо більш вірним, повним, ефективним для держави. Для ефективного управління людським капіталом необхідно мати на увазі його особливі характеристики, процеси та категорії, на які він впливає, особливості інвестування та віддачі від нього. Ефективність процесу відтворення людського капіталу залежить від узгодженості між усіма його етапами, забезпечуючими системами, важелями, ланками.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Becker G. Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis. – N.Y., 1964.
2. Долан Э. Дж. Рынок: микроэкономическая модель / Э. Дж. Долан, Д. Е. Линдсей. – СПб., 1992.
3. Фишер С. Экономика / С. Фишер, Р. Дорнбуш, К. Шмалензи. – М.: Дело, 1993.
4. Демин П. Человеческий капитал как фактор европейской экономической интеграции республики // Белорусский журнал международного права и международных отношений, 2003. – № 3.
5. Кротова Н. В. Методология управления человеческим капиталом в сфере культуры / Дисс. ... д.э.н. – М., 2000.
6. Быченко Ю. Г. Важнейший показатель человеческого капитала // Человеческие ресурсы, 2001. – № 3.
7. Кокарев И. А. Управление персоналом организации в свете теории человеческого капитала / Дисс. ... д.э.н. – М.: РГБ, 2003.
8. Никитина И. А. Методология и методы формирования трудового потенциала предприятия / Дисс. ... д.э.н. – СПб., 1999.
9. Іванілов О. С. Людський капітал у розвитку економіки та залізничного транспорту України / О. С. Іванілов, В. В. Компанієць, І. В. Іванкова // Вісник економіки транспорту і промисловості. – Вип. 15-16. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – С. 149-151.

Надійшла до редколегії 27.03.2008.

ВПЛИВ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ВИТРАТИ, ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗНОСОМ КОЛІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Розглядається вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати, пов'язані із зносом колійної інфраструктури.

Рассматривается влияние повышения скорости движения поездов на расходы, связанные с износом путевой инфраструктуры.

An influence of the increase of speed of train movement on the expenditures related to wear of rail infrastructure is considered.

1. Загальні положення

Впровадженню реформи на залізничному транспорті передують розробка нових науково-обґрунтованих тарифів на перевезення вантажів і пасажирів. Однією з основних складових тарифів є витрати на утримання, ремонт, реконструкцію та будівництво інфраструктури залізниць. Для правильного визначення цих витрат по окремих видах поїздів потрібно провести низку досліджень, які дозволять встановити залежність цих витрат від експлуатації конкретного рухомого складу. Об'єктивна оцінка витрат, пов'язаних з підвищенням швидкості руху, може бути виконана за умови дослідження зміни енергоресурсів та витрат на знос інфраструктури. У даній роботі акцент зроблено на знос колійної інфраструктури і контактної мережі.

Проведений аналіз показав, що ділянки залізниць відрізняються не тільки технічним оснащенням, але й умовами роботи [1]. Для вирішення поставленого в роботі завдання був застосований диференційований підхід, який враховував як структуру поїздопотоків, так і технічне оснащення залізниці, параметри плану й поздовжнього профілю. Методика проведення такого дослідження викладена в статті авторів [2]. Нижче наведена послідовність виконання розрахунків і результати для наведеного прикладу.

2. Опис програми ZnosInfra

Для виконання розрахунків на ділянках з різною інтенсивністю вантажного й пасажирського руху була розроблена програма ZnosInfra. У вікні програми наведені пояснення до всіх параметрів, які треба задати (рис. 1). При виконанні розрахунків можуть бути задані загальні витрати на утримання колії та контактної ме-

режі для відповідної ділянки за розрахунковий період. У якості розрахункового періоду краще приймати рік, але розрахунки можуть виконуватись і для інших періодів. Для відповідного періоду в таблиці задається розрахункова кількість поїздів кожної категорії.

Натиснувши на відповідну стрілку, необхідно вказати стан колії з трьох можливих («добрий», «середній», «поганий»). Характеристика плану лінії задається через загальну довжину всіх кривих (км), середній радіус кривих (м) та загальну характеристику плану («легкий», «середній», «важкий»). Профіль також задається через його складність («легкий», «середній», «важкий»). Детально характеристики стану колії, плану і поздовжнього профілю розглянуто в роботі авторів [2].

Програма дозволяє виконувати розрахунки не тільки на основі апроксимуючих залежностей [2], але й за допомогою інформації про роботу сил, яка отримана за допомогою більш точних, наприклад, тягових розрахунків. В останньому випадку необхідно поставити відмітку у відповідній силі (див. рис. 1).

При заповненні таблиці задається вид тяги, для чого у відповідних клітинках необхідно ввести літери «е» (електротяга, постійний струм), «з» (змінний струм) або «т» (тепловозна тяга). Для вибору типу поїзду слід натиснути мишею на відповідну клітинку і у меню, яке з'явиться, обрати потрібний тип (вантажний, приміський, пасажирський, експрес). Для кожної категорії слід задати значення маси поїзда у тонах, середню довжину перегону або довжину ділянки, на якій поїзд рухається без зупинки, а також середню швидкість руху і кількість поїздів за розрахунковий період.

Якщо буде використовуватись більш точна інформація про дію якихось сил (поздовжніх,

вертикальних, горизонтальних, гальмівних), відповідні значення вводяться в таблицю. При зміні якихось параметрів таблиця оновлюється автоматично, але доцільно в кінці введення даних натиснути клавішу «Поновити», після чого

підраховуються дії всіх сил на колію і вплив поїздів на контактну мережу. Ці показники розраховуються для кожного поїзда, а також для всіх поїздів відповідних категорій.

Розподілення витрат на утримання інфраструктури по категоріях поїздів

Читати дані по ділянці Назва ділянки

Витрати на утримання за розрахунковий період (тис. грн): колії - 10000 контактної мережі - 2000

Стан колії добрий Довжина ділянки, км 100 Довжина кривих на ділянці, км 10 Середній радіус кривих, м 1000

Кількість категорій поїздів в розрахунку Складність профілю середній Складність плану середній

Роботи яких сил будуть не за апроксимацією, а за результатами точних розрахунків поздовжніх поперечних вертикальних

Задайте кількість категорій поїздів та іншу інформацію по ділянці. В таблиці заповніть відповідні поля: Тяга - задайте т для тепловозної тяги, е - для електричної постійного струму, з - для змінного; Тип - кнопкою миші оберіть тип поїзда для категорії; Прим. - наберіть при необхідності якусь примітку. Після вводу інформації натисніть "Поновити".
 Q - маса поїзду, т; Lз - середня відстань між зупинками, км; V - середня швидкість, км/год; N - кількість поїздів за розрахунковий період.
 Наступні три значення роботи вводяться для одного поїзда в ткм, якщо вони будуть задаватися за результатами точних розрахунків:
 D1вт - поздовжніх сил; D1п - поперечних сил; D1в - вертикальних сил.
 D1 - загальна дія на колію одного поїзда; D - всіх поїздів цієї категорії, млн.ткм. E1 - загальна дія на контактну мережу одного поїзду (у.о.);
 E - всіх поїздів цієї категорії. Далі йде доля поїздів цієї категорії в загальних витратах. Для колії: а1, А1 - одного поїзда (1000%, тис.грн.); аз, Аз - всіх (%), млн. грн.). Для контактної мережі: к1,К1 - одного поїзда (1000%, тис.грн.); кз, Кз - всіх поїздів цієї категорії (%), млн.грн.)

Загальний вплив всіх поїздів на колію: 51,852 та на контактну мережу: 31,16

№	Тяга	Тип	Прим.	Q	Lз	V	N	D1вт	D1п	D1в	D1	D	E1	E	а1	А1	аз	Аз	к1	К1	кз	Кз
1	е	вантаж		3000	50	55	5000	2010,64,6	201,2277	11,383	1,106	5,53	4,39	0,439	22	2,195	3,55	0,071	17,7	0,355		
2	з	вантаж		3500	50	52	4500	2153	88,6	215,2457	11,056	0,84	3,779	4,74	0,474	21,3	2,132	2,69	0,054	12,1	0,243	
3	т	експрес		600	50	125	1500	722,576	36,1	835	1,252	0	0	1,61	0,161	2,4	0,241	0	0	0	0	
4	е	приміськ		400	7	75	4000	1099,3,5	55	1158	4,632	0,825	3,299	2,23	0,223	8,9	0,893	2,65	0,053	10,6	0,212	
5	е	пасажир		1100	40	85	20000	1091,30,6	54,6	1176	23,529	0,928	18,553	2,27	0,227	45,4	4,538	2,98	0,06	59,5	1,191	

RailBrain™ Корженевич І. П. kip@railbs.com

Поновити Показувати діаграми Зберегти дані Зберегти результати Закінчити роботу

Рис. 1. Вікно програми ZnosInfra

Кошти на утримання розподіляються поміж поїздами пропорційно їх впливу відповідно на колію і контактну мережу. В таблиці показуються кошти для кожного поїзда і всіх поїздів відповідних категорій. Над таблицею жирним шрифтом вказуються загальні значення впливу поїздів всіх категорій на колію та на контактну мережу.

Дія всіх сил на колію, які впливають на вартість утримання колії, підраховується за наведеною методикою [2].

Вплив поїздів на контактну мережу, який призводить до витрат на її утримання, прийнято пропорційним поздовжній дії поїзда на колію та середній швидкості руху. Поздовжня дія складається з механічної роботи, яка пропорційна витратам електроенергії, та гальмівних сил. Оскільки при гальмуванні може використовуватися рекуперація і змінюється взаємодія пантографу та контактної мережі, врахування цих сил можна вважати доцільним. Зменшення

впливу для змінного струму враховується за допомогою розрахункового коефіцієнту 0,75.

При стані колії, який відрізняється від «добраго», вводиться коригуючий коефіцієнт, який збільшує вплив поїздів на контактну мережу на 10 % для середнього стану і на 25 % – для поганого.

Результати розрахунку можна подивитись на діаграмах, включивши відповідний прапорець біля кнопки «Поновити». В цьому випадку з'являються вікна з діаграмами, на яких показане розподілення витрат у відсотках поміж категоріями поїздів (рис. 2-5). Інформація на діаграмах оновлюється разом з оновленням даних у таблиці.

Результати розрахунку можуть бути збережені в текстовому файлі, в якому записується вся інформація, що знаходиться на вікні програми. Інформація в таблиці записана через символ табуляції, що дозволяє легко перетворити її в таблицю Microsoft Word, а потім обробляти в Microsoft Excel.

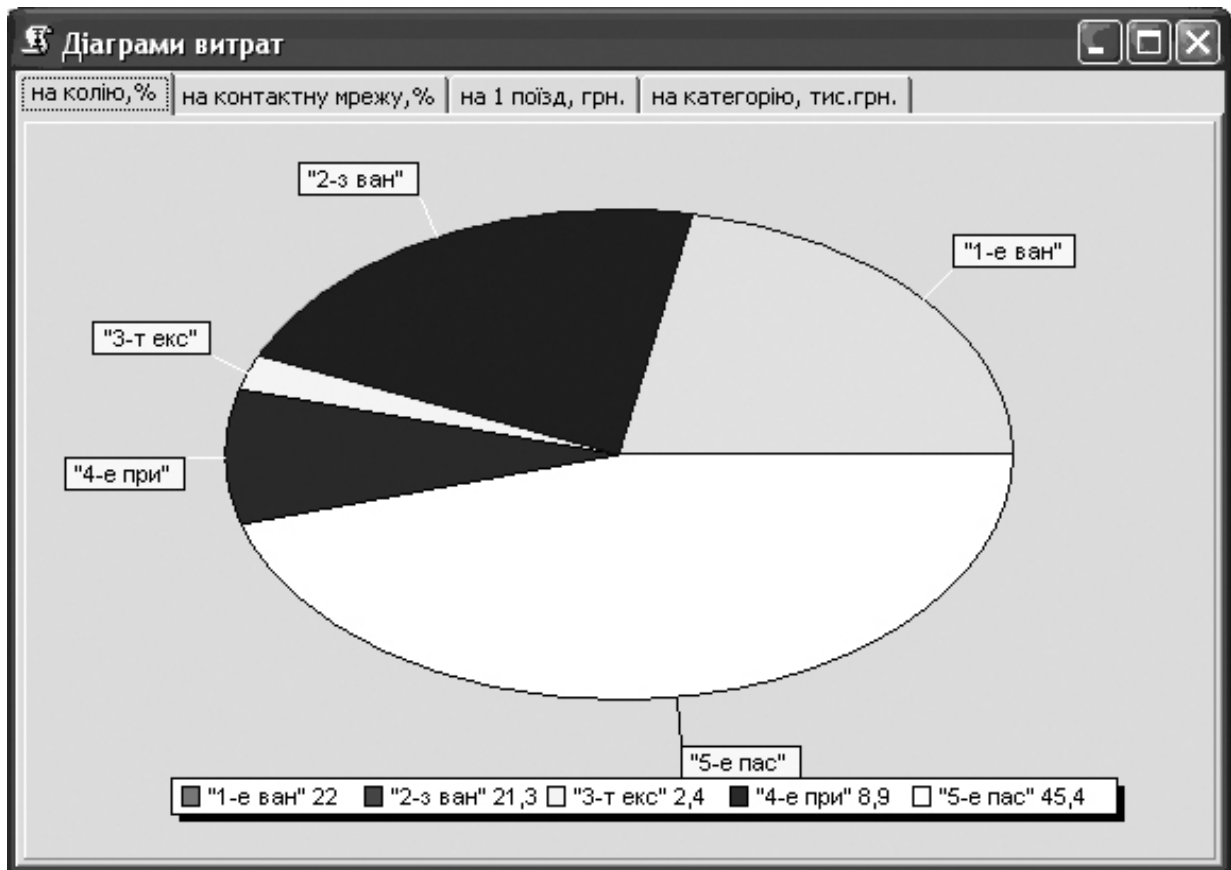


Рис. 2. Діаграма витрат на колійну інфраструктуру

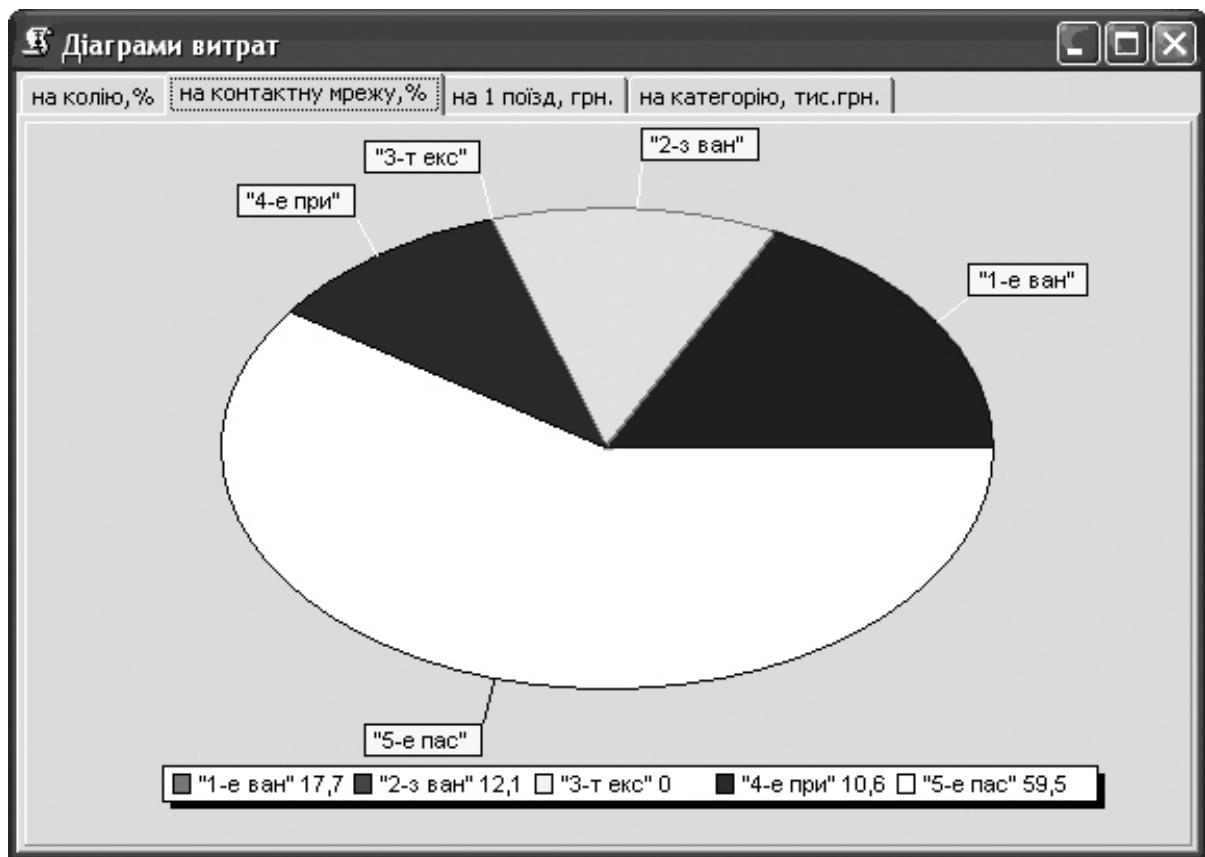


Рис. 3. Діаграма витрат на контактну мережу

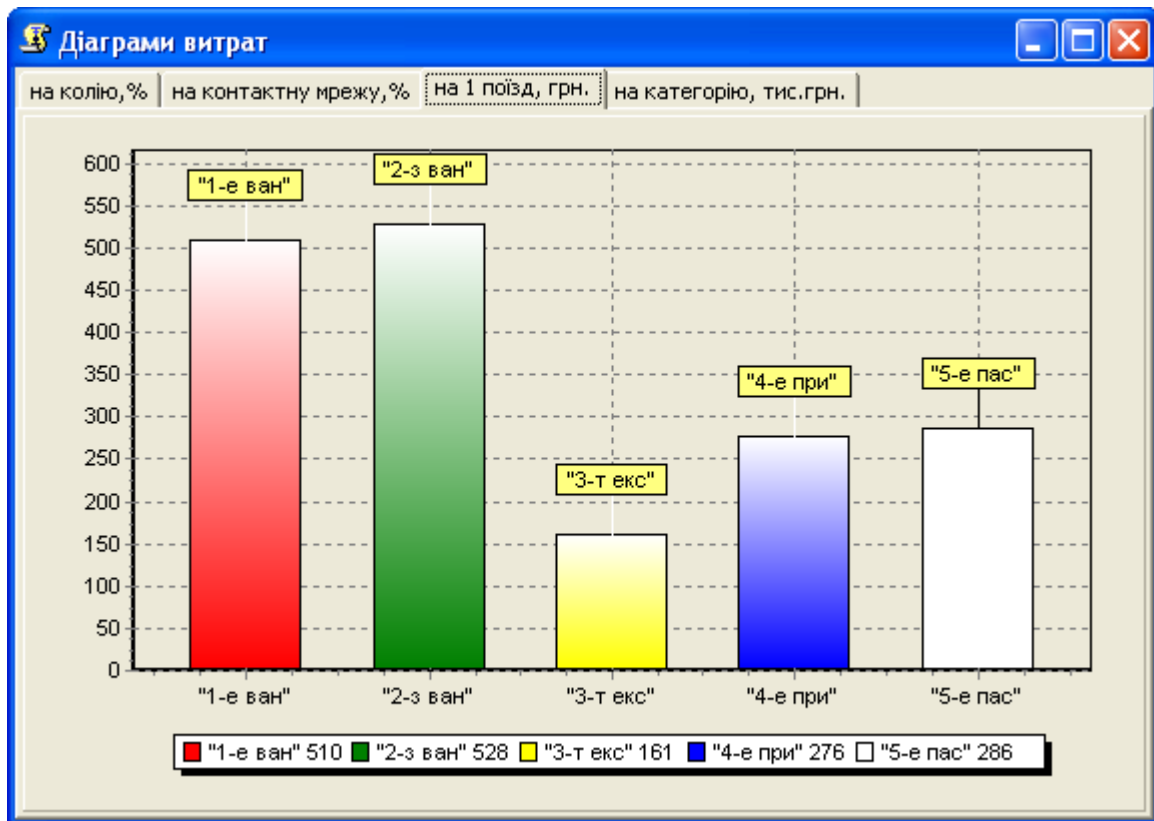


Рис. 4. Діаграма витрат на один поїзд

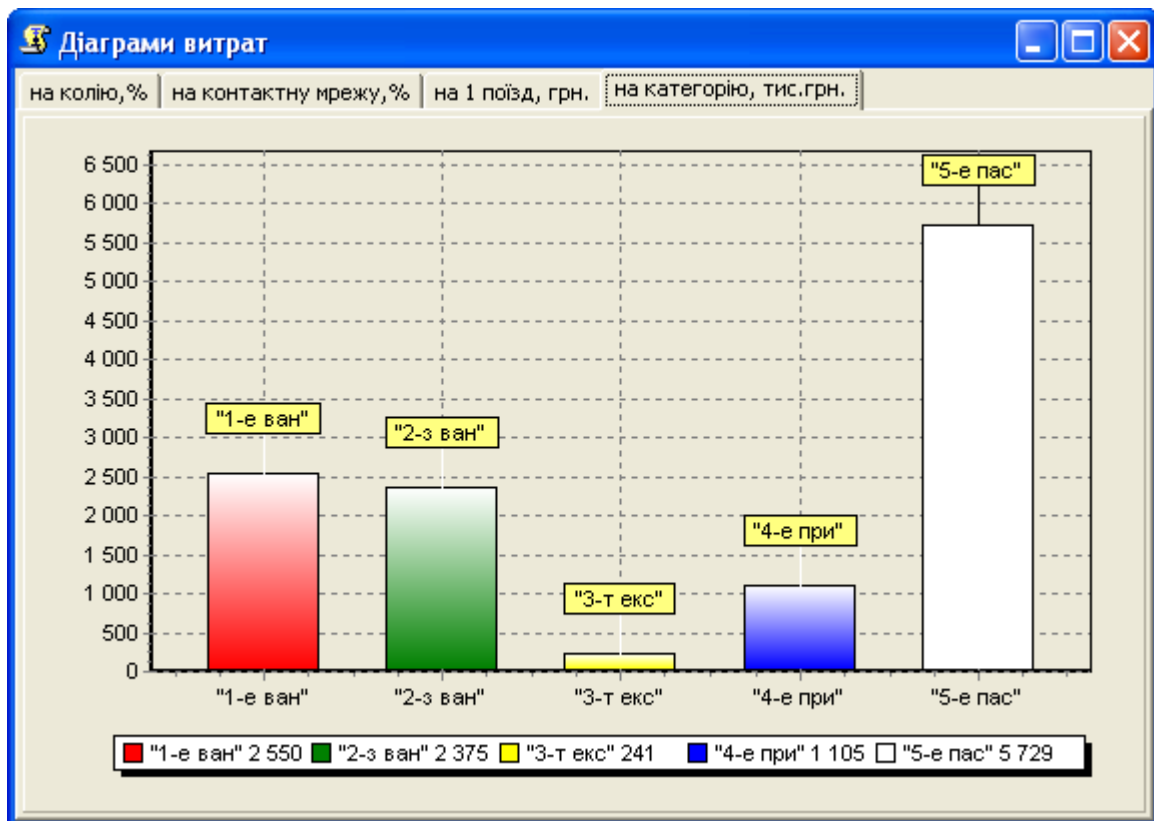


Рис. 5. Діаграма витрат на поїзди відповідних категорій

Інформація, що записана в файлах, поєднується потім за цілими напрямками або залізницями.

Такий підхід дозволяє на основі річних звітних даних зворотнім шляхом встановити

частку кожної ділянки в загальних витратах і визначити показники для всіх типів поїздів, що обертаються.

3. Виконання розрахунків з використанням програми ZnosInfra

В якості прикладу такого розрахунку розглянемо умовний напрямок залізниці, що скла-

дається з 4 ділянок, дві з яких електрифіковані на постійному струмі. Загальна характеристика цих ділянок наведена в табл. 1, а характеристика категорій поїздів – в табл. 2-5. Розмірності всіх величин відповідають розмірності їх у програмі. Значення витрат по всіх ділянках на першому етапі розрахунків приймаємо однаково.

Таблиця 1

Характеристика ділянок

Показник	Значення для ділянок			
	1	2	3	4
Стан колії	добрий	поганий	середній	добрий
Довжина	253	148	194	230
Довжина кривих	120	32	74	97
Середній радіус кривих	753	1020	970	910
Складність профілю	середній	легкий	важкий	легкий
Складність плану	важкий	легкий	середній	середній
Кількість категорій поїздів	6	5	4	5

Таблиця 2

Характеристика поїздів 1-ї ділянки

Показник	Значення для категорій					
	1	2	3	4	5	6
Тип тяги	е	е	е	е	е	е
Тип поїздів	вантаж.	вантаж.	вантаж.	пасаж.	приміськ.	експрес
Маса	3800	3400	1200	1150	400	600
Відстань між зупинками	43	43	50	38	6	50
Середня швидкість	54	57	62	87	76	115
Кількість поїздів	4500	5200	1500	10000	2600	730

Таблиця 3

Характеристика поїздів 2-ї ділянки

Показник	Значення для категорій				
	1	2	3	4	5
Тип тяги	т	т	т	т	т
Тип поїздів	вантаж.	вантаж.	вантаж.	пасаж.	приміськ.
Маса	3000	2800	1100	1000	400
Відстань між зупинками	16	16	24	34	7
Середня швидкість	43	45	53	85	65
Кількість поїздів	5000	6000	2000	9500	1500

Характеристика поїздів 3-ї ділянки

Показник	Значення для категорій			
	1	2	3	4
Тип тяги	т	т	т	т
Тип поїздів	вантаж.	вантаж.	вантаж.	вантаж.
Маса	4500	4300	3200	2600
Відстань між зупинками	14	16	14	16
Середня швидкість	33	33	44	51
Кількість поїздів	2000	1800	3500	2300

Таблиця 5

Характеристика поїздів 4-ї ділянки

Показник	Значення для категорій				
	1	2	3	4	5
Тип тяги	е	е	е	е	е
Тип поїздів	вантаж.	вантаж.	вантаж.	пасаж.	приміськ.
Маса	4000	3800	1000	1200	400
Відстань між зупинками	50	50	50	50	7
Середня швидкість	57	59	65	85	80
Кількість поїздів	5000	6000	4000	9500	3200

Для прикладу, отримані результати наведені тільки для першої ділянки, рис. 6. Узагальнені результати щодо впливу всіх поїздів на колію і контактну мережу представлені в табл. 6.

Розподілення витрат на утримання інфраструктури по категоріях поїздів

Читати дані по ділянці Назва ділянки 1 ділянка

Витрати на утримання за розрахунковий період (тис. грн): колії - 10000 контактної мережі - 2000

Стан колії добрий Довжина ділянки, км 253 Довжина кривих на ділянці, км 120 Середній радіус кривих, м 753

Кількість категорій поїздів в розрахунку 6 Складність профілю середній Складність плану важкий

Роботи яких сил будуть не за апроксимацією, а за результатами точних розрахунків поздовжніх поперечних вертикальних

Задайте кількість категорій поїздів та іншу інформацію по ділянці. В таблиці заповніть відповідні поля: Тяга - задайте т для тепловозної тяги, е - для електричної постійного струму, з - для змінного; Тип - кнопкою миші оберіть тип поїзда для категорії; Прим. - наберіть при необхідності якусь примітку. Після вводу інформації натисніть "Поновити".

Q - маса поїзду, т; Lz - середня відстань між зупинками, км; V - середня швидкість, км/год; N - кількість поїздів за розрахунковий період.

Наступні три значення роботи вводяться для одного поїзда в ткм, якщо вони будуть задаватися за результатами точних розрахунків: D1пт - поздовжніх сил; D1п - поперечних сил; D1в - вертикальних сил.

D1 - загальна дія на колію одного поїзда; D - всіх поїздів цієї категорії, млн.ткм. E1 - загальна дія на контактну мережу одного поїзду (у.о.); E - всіх поїздів цієї категорії. Далі йде доля поїздів цієї категорії в загальних витратах. Для колії: a1, A1 - одного поїзда (1000%, тис.грн.); аз, Aз - всіх (%), млн. грн.). Для контактної мережі: k1, K1 - одного поїзда (1000%, тис.грн.); kз, Kз - всіх поїздів цієї категорії (%), млн.грн.)

Загальний вплив всіх поїздів на колію: 130,889 та на контактну мережу: 69,998

№	Тяга	Тип	Прим.	Q	Lz	V	N	D1пт	D1п	D1в	D1	D	E1	E	a1	A1	аз	Aз	k1	K1	kз	Kз
1	е	вантаж.		3800	43	54	4500	6406	1381	640	18429	37,93	3,46	15,569	6,44	0,644	29	2,898	4,94	0,099	22,2	0,445
2	е	вантаж.		3400	43	57	5200	6112	1023	611	17746	40,28	3,484	18,116	5,92	0,592	30,8	3,077	4,98	0,1	25,9	0,518
3	е	вантаж.		1200	50	62	1500	2637	226	263	13128	4,692	1,635	2,453	2,39	0,239	3,6	0,358	2,34	0,047	3,5	0,07
4	е	пасажир.		1150	38	87	10000	3036	583	151	13772	37,72	2,642	26,421	2,88	0,288	28,8	2,882	3,77	0,075	37,7	0,755
5	е	приміськ.		400	6	76	2600	2819	67,9	141	3028	7,873	2,142	5,57	2,31	0,231	6	0,601	3,06	0,061	8	0,159
6	е	експрес		600	50	115	730	2226	940	111	13279	2,394	2,561	1,869	2,51	0,251	1,8	0,183	3,66	0,073	2,7	0,053

RailBrain™ Корженевич І. П. Поновити Показувати діаграми Зберегти дані Зберегти результати Закінчити роботу
kpr@railbs.com

Рис. 6. Розподіл витрат на утримання інфраструктури по категоріях поїздів (ділянка 1)

Загальний вплив всіх поїздів

Номера ділянок	На колію	На контактну мережу
1	130,889	69,998
2	74,282	0
3	69,542	0
4	100,217	52,692
Загалом	374,930	122,690

Подальший розподіл витрат виконується таким чином. Наприклад, загальні витрати на утримання колії за розрахунковий період по всіх ділянках за звітними даними становлять 25,6 млн грн, а на утримання контактної мережі – 1,7 млн грн. Тоді на першу ділянку на утримання колії припадає

$$\frac{25,6 \cdot 130,889}{374,930} = 8,937 \text{ млн грн,}$$

а на утримання контактної мережі

$$\frac{1,7 \cdot 69,998}{122,690} = 0,970 \text{ млн грн.}$$

Задамо ці значення для повторного розрахунку для кожної ділянки. Нижче, на рис. 7 наведені дані для першої ділянки.

Розподілення витрат на утримання інфраструктури по категоріях поїздів

Читати дані по ділянці Назва ділянки 1 ділянка

Витрати на утримання за розрахунковий період (тис. грн): колії - 8937 контактної мережі - 970

Стан колії добрий Довжина ділянки, км 253 Довжина кривих на ділянці, км 120 Середній радіус кривих, м 753

Кількість категорій поїздів в розрахунку 6 Складність профілю середній Складність плану важкий

Роботи яких сил будуть не за апроксимацією, а за результатами точних розрахунків поздовжніх поперечних вертикальних

Задайте кількість категорій поїздів та іншу інформацію по ділянці. В таблиці заповніть відповідні поля: Тяга - задайте т для тепловозної тяги, е - для електричної постійного струму, з - для змінного; Тип - кнопкою миші оберіть тип поїзда для категорії; Прим. - наберіть при необхідності якусь примітку. Після вводу інформації натисніть "Поновити".
 Q - маса поїзду, т; Lз - середня відстань між зупинками, км; V - середня швидкість, км/год; N - кількість поїздів за розрахунковий період.
 Наступні три значення роботи вводяться для одного поїзда в ткм, якщо вони будуть задаватися за результатами точних розрахунків:
 D1мт - поздовжніх сил; D1п - поперечних сил; D1в - вертикальних сил.
 D - загальна дія на колію одного поїзда; D - всіх поїздів цієї категорії, млн.ткм. E1 - загальна дія на контактну мережу одного поїзду (у.о.);
 E - всіх поїздів цієї категорії. Далі йде доля поїздів цієї категорії в загальних витратах. Для колії: а1, А1 - одного поїзда (1000%, тис.грн.); аз, Аз - всіх (%), млн. грн.). Для контактної мережі: к1,К1 - одного поїзда (1000%, тис.грн.); кз, Кз - всіх поїздів цієї категорії (%), млн.грн.)

Загальний вплив всіх поїздів на колію: 130,889 та на контактну мережу: 69,998

№	Тяга	Тип	Прим.	Q	Lз	V	N	D1мт	D1п	D1в	D1	D	E1	E	а1	А1	аз	Аз	к1	К1	кз	Кз
1	е	вантаж		3800	43	54	4500	6406,1381	640,18429	37,93	3,46	15,569	6,44	0,576	29	2,59	4,94	0,048	22,2	0,216		
2	е	вантаж		3400	43	57	5200	6112,1023	611,27746	40,28	3,484	18,116	5,92	0,529	30,8	2,75	4,98	0,048	25,9	0,251		
3	е	вантаж		1200	50	62	1500	2637,226,263	3128	4,692	1,635	2,453	2,39	0,214	3,6	0,32	2,34	0,023	3,5	0,034		
4	е	пасажир		1150	38	87	10000	3036,583,151,1	3772	37,72	2,642	26,421	2,88	0,258	28,8	2,576	3,77	0,037	37,7	0,366		
5	е	приміськ		400	6	76	2600	2819,67,9	141	3028	7,873	2,142	5,57	2,31	0,207	6	0,538	3,06	0,03	8	0,077	
6	е	експрес		600	50	115	730	2226,940,111,1	3279	2,394	2,561	1,869	2,51	0,224	1,8	0,163	3,66	0,035	2,7	0,026		

RailBrain™ Корженевич І. П. kip@railbs.com Поновити Показувати діаграми Зберегти дані Зберегти результати Закінчити роботу

Рис. 7. Розподіл витрат на утримання інфраструктури по категоріях поїздів (ділянка 1)

Розподілення витрат на утримання колії та контактної мережі має аналогічний вигляд (див. рис. 2, 3). Витрати за категоріями поїздів для

першої ділянки наведені в табл. 7. Аналогічно виконуються розрахунки для інших ділянок.

Витрати на утримання інфраструктури першої ділянки, віднесені до відповідних категорій поїздів

Категорія	Утримання колії		Утримання контактної мережі		Утримання інфраструктури	
	на 1, грн	на всі, тис. грн	на 1, грн	на всі, тис. грн	на 1, грн	на всі, тис. грн
1	576	2590	48	216	623	2806
2	529	2750	48	251	577	3001
3	214	320	23	34	236	354
4	258	2576	37	366	294	2942
5	207	538	30	77	235	615
6	251	163	35	26	259	189
Всі		8937		970		9907

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розрахунки показали, що врахування впливу поїздів на інфраструктуру через приведений вантажообіг є недостатньо точним, бо не враховує багатьох технічних і експлуатаційних факторів.

2. Отримані авторами аналітичні залежності достатньо точно характеризують вплив основних факторів (довжини ділянки, типу рухомого складу, швидкості руху, стану залізничної колії тощо) на знос залізничної колії та контактної мережі, визначають зв'язок між кількісними показниками впливу та якісним станом інфраструктури.

3. Запропонований новий методологічний підхід дає можливість давати попередню оцінку впливу різних факторів на знос інфраструктури, не виконуючи багатоваріантні тягові розрахунки та тривалі статистичні спостереження. Оскільки в розрахунках важливими є не абсолютні значення тих чи інших показників, а їх співвідношення, то апроксимуючі залежності можуть використовуватися при визначенні частки кожного поїзду та груп поїздів в загальних витратах на утримання інфраструктури.

4. Ураховуючи громіздкість розрахунків, методика економічної оцінки впливу інтенсивності вантажного й пасажирського руху на знос

колійної інфраструктури реалізована у вигляді програмного продукту ZnosInfra. Використання програми ZnosInfra для розрахунків по базі даних залізниць дозволить достатньо точно визначити розподілення витрат на утримання колії та контактної мережі поміж всіма поїздами та підрозділами, що, в свою чергу, дасть можливість більш обґрунтовано розподіляти кошти поміж підрозділами та визначати частку в тарифах, яка пов'язана з утриманням колії та контактної мережі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Курган М. Б. Аналіз роботи залізниць України з позиції впливу інтенсивності перевезень на знос інфраструктури / М. Б. Курган, І. П. Корженевич, Ю. С. Бараш, Н. І. Верхоглядова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – Вип. 19. – С. 265-270.
2. Корженевич І. П. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – Вип. 20. – С. 233-239.

Надійшла до редколегії 26.02.2008.

Наукове видання

В І С Н И К

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Випуск 21

Українською, російською та англійською мовами

Відповідальний за випуск *І. П. Корженевич*
Комп'ютерна верстка *В. В. Кузьменко*

Статті в збірнику друкуються в авторській редакції

Здано до набору 31.03.2008. Підписано до друку 31.03.2008. Формат 60×84 1/8.
Папір офсетний. Друк офсетний. Умов. друк. арк. 29,44.
Обл.-вид. арк. 30,52. Тираж 100 прим. Зам. № 725. Вид. № 73.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна. ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, www.diitrvv.dp.ua, admin@diitrvv.dp.ua