

С С С Р - М П С  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

На правах рукописи

Инженер А.С. КАТЕН-ЯРЦЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ "ПУТЬ-ОБДЕЛКА"  
В ТОННЕЛЯХ

Специальность № 432 "Железнодорожный путь"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Днепропетровск

1971

НТБ  
ДНУЖТ

С С С Р - М П С  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

На правах рукописи

Инженер А.С. КАТЕН-ЯРЦЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ "ПУТЬ-ОБДЕЛКА"  
В ТОННЕЛЯХ

Специальность № 432 "Железнодорожный путь"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

г. Днепропетровск  
1971 г.

НТБ  
ДНУЖТ

Работа выполнена в Хабаровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент В.П. Новичков.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор М.А. Фришман  
кандидат технических наук, доцент Л.К. Громов.

Ведущее предприятие - служба пути Дальневосточной железной дороги.

Автореферат разослан " " 1971 г.

Защита диссертации состоится " 8 " апреля 1971 г. на заседании Совета факультетов мостов и тоннелей, строительного и эксплуатационного Днепрпетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: г. Днепрпетровск - Ю, Университетская, 2, ДИИТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

*Лебединец Л.Н.*

НТБ  
ДНУЖТ

Тоннели - один из наиболее ответственных видов сооружений железнодорожного транспорта. Повышение скоростей движения поездов, осевых нагрузок, грузонапряженности усиливает динамическое воздействие на них поездной нагрузки. Одним из важнейших и наименее изученный фактор этого воздействия - колебания тоннелей. Они обуславливают многократно повторяющиеся, зачастую большие динамические усилия в элементах тоннелей, чрезмерные деформации, развитие усталостных процессов. Все это ведет к нарушению устойчивости пути и тоннельных обделок.

Проблема гашения колебаний приобретает актуальность в связи с использованием в тоннелях безбалластных конструкций пути. Опыт эксплуатации такого пути на земляном полотне дает основания предполагать, что с заменой в тоннелях инбалластного основания монолитным резко повысится интенсивность колебаний верхнего строения пути и тоннельных обделок. Недостаточная изученность вопросов динамического воздействия поездов на тоннели - одно из главных обстоятельств, заставляющих осторожно относиться к широкому внедрению безбалластного пути в тоннелях.

Вибрации тоннелей при прохождении поездов неоднократно привлекали внимание исследователей. Но в одних случаях исследования ограничивались узким частотным диапазоном, колебательный процесс изучался обособленно от влияния конструкций тоннелей и особенностей воздействия поездной нагрузки (исследования Сейсмологического института АН СССР в тоннелях Московского метрополитена, в 1936-37 и 1947-48 г.г.).

В других же случаях зарубежные исследования в тоннелях метрополитенов Сан-Франциско, Милана, Гамбурга и на Японских

ДРУЖТ

национальных железных дорогах ( 50 - 60 годы ), охватывающие более широкий частотный диапазон, посвящены изучению шума и представляют интерес, главным образом, с позиций акустики. В целом же результаты известных исследований не дают достаточно полной информации о колебаниях тоннелей, необходимой для успешного решения проблем виброгашения.

Для разработки эффективных мероприятий по снижению интенсивности колебаний требуется, прежде всего, всестороннее изучение колебательного процесса.

Нами проведены исследования по двум направлениям:

1) изучение колебаний тоннелей со шпалобалластным подрельсовым основанием; 2) прогнозирование динамики системы "путь-обделка" с монолитным основанием пути.

По первому направлению выполнены следующие исследования:

а) натурными измерениями в тоннелях различных конструкций получены и интерпретированы параметры колебательного процесса при движении поездов;

б) изучены закономерности колебаний системы "путь-обделка" и роль подрельсового основания в формировании колебательного процесса;

в) разработана динамическая модель системы "путь-обделка" и на основе этой модели выполнены теоретические исследования колебаний тоннелей со шпалобалластным подрельсовым основанием.

В исследованиях по второму направлению решались следующие основные задачи: во-первых, оценка влияния на динамику системы "путь-обделка" замены шпалобалластного основания монолитным; во-вторых, определение путей снижения колебаний и усилий в ней, выявление оптимальных параметров подрельсового основания в целом и рельсовых опор.

## I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПУТИ И ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК

Чтобы теоретически исследовать колебания тоннелей при воздействии поездной нагрузки — трудно разрешимая задача. В связи с этим намечено было получить, прежде всего, необходимую информацию о колебаниях системы "путь-обделка" натурными измерениями их в эвандуатируемых тоннелях. На основе результатов экспериментальных измерений предполагалось: во-первых, охарактеризовать качественно и количественно колебательный процесс, во-вторых, разработать динамическую модель системы "путь-обделка" для проведения на ее основе теоретических исследований.

Экспериментальные исследования проводились в тоннелях:

- а) кругового очертания с чугунной тубинговой обделкой, в скальных грунтах;
- б) тоже в обводненных песках;
- в) овального очертания с бетонной обделкой, в скальных грунтах;
- г) прямоугольного очертания с бетонной обделкой, в песках.

На всех участках путь звеньевой, на деревянных шпалах и щебне с толщиной слоя от 10 до 30 см. Тяга поездов тепловозная, скорость поездов составляла от 20 до 70 км/час.

Для регистрации колебаний были использованы различные комплекты измерительной аппаратуры, позволившие зафиксировать как низкочастотные составляющие процесса, так и гармоники высшего порядка (табл. I).

Колебания записывались осциллографами Н-700 и Н-105.

НТБ  
ДНУЖТ

Таблица I

Канал	Рабочий диапазон частот в герцах	Способ регистрации колебаний	Измеряемый параметр
1	2	3	4
Сейсмоприемники + гальванометр (НС-3 + МООI, 2-5)	3 + 300	Осциллографический	Скорость колебаний
К ООI	2 + 200	-"-	Смещения
ПКУ - III	50 - 10000	-"-	Ускорения
ЭДИВ	20 + 100	Шкальный	Смещения
"Дэйв"	2 + 250	-"-	Уровень шума
ИВПИ	40 + 10880	-"-	-"-

Регистрировались, главным образом, вертикальные составляющие и, в отдельных случаях, горизонтальные компоненты вдоль и поперек оси туннеля.

В процессе обработки осциллограмм выполнялся частотный анализ, определялся амплитудный уровень и спектральный состав колебаний. Интенсивность различных гармоник оценивалась смещениями, скоростями, ускорениями и долей энергии их в колебательном процессе. В результате обработки были получены комплекс спектров этих параметров для каждой записанной реализации.

Многообразие факторов, связанных с поездной нагрузкой, конструкцией и состоянием пути и обделок, предопределяет сложность форм последующих колебаний. Интерпретация колебательного процесса значительно облегчается, если известны собственные частоты элементов туннеля, изучены закономерности колебаний системы "путь-обделка" от простейших возмущений. В связи с этим предварительно изучались колебания пути и обделок от одиночных ударов при падении груза весом 50 кг с высоты 2 м.

ДНУКТ

При воздействии ударов были выявлены две группы собственных колебаний пути на шпалобалластном основании в тоннелях:

а) с частотами от 25 до 85 герц; б) с диапазоном частот 250 + 320 герц. Результаты анализа форм колебаний и сопоставления их с литературными данными ( Шахуняц Г.М., Шафрановский А.К., Карпова Н.В., Симиайер Э.В., Рейнхольд, Бирман, Сато Йошикино и др.) свидетельствуют о том, что группа " а " характеризует основной тон собственных колебаний рельсошпальной решетки, а группа " б " - отдельных ее элементов.

Собственные частоты тоннельных обделок находятся в пределах 240 - 400 герц, а из них наиболее характерные - 240 + 260 герц.

Полученные результаты согласуются с аналогичными данными Стэнфордского научно-исследовательского института ( США ) о собственных колебаниях тоннелей и результатами исследований Японского института национальных железных дорог.

Балластный слой в тоннеле подвергается одновременно воздействию колебаний обделки и рельсошпальной решетки. Собственные колебания его ( с частотой 110 - 120 герц ) незначительно влияют на колебания всей системы. Близость собственных частот пути и обделок предопределяет возможность резонанса. Балласт, демпфируя колебания, уменьшает опасный эффект от их взаимного наложения и препятствует возникновению резонансных форм.

При движении поездов зарегистрированы и исследованы следующие группы колебаний пути: а) длиннопериодные - с частотами 4 + 16 герц; б) основной тон - 25 + 85 герц; в) высокочастотные - до 3200 герц. Частоты группы " а " вызваны колебаниями обрессоренных масс экипажей и перекачиванием отдельных колес по сечению пути. Они имеют наибольшие смещения, но невысокий

уровень скоростей и ускорений. В группе "б" преобладают собственные колебания пути. Эта группа колебаний характеризуется высокими скоростями и ускорениями, а группа "в" с гармониками высшего порядка - минимальными для всего диапазона смещениями и максимальными ускорениями. Доля энергии указанных групп колебаний достигала соответственно 42,50 и 35 процентов.

На основе количественного и качественного сопоставления спектров синхронных записей колебаний в различных пунктах тоннеля выявлены демпфирующие свойства элементов системы "путь - обделка". Сравнение амплитудных уровней малых и средних смещений, скоростей, ускорений и энергии показало, что шпалобалластное основание полностью гасит длиннопериодные колебания рельсопальцевой решетки (они не регистрировались на обделке) и высокочастотные с частотой более 600 герц. Интенсивно поглощаются им и колебания основного тона, но значительно меньше-высокочастотные с частотами до 600 герц.

Распространение колебаний в поперечном сечении тоннелей сопровождается рассеянием энергии вынужденных колебаний обделкой и выделением в спектрах их собственных частот. В тоннелях кругового очертания при движении поездов в активные колебания вовлекается нижняя треть кольца обделки, а в прямоугольных и овальных - часть обделки примерно до уровня головки рельса.

Частотный диапазон наиболее опасных колебаний тоннельных обделок с высоким уровнем всех параметров находится в пределах 200 - 400 герц и обусловлен их собственными частотами. Амплитуды вертикальных колебаний в 2 + 4 раза больше, чем горизонтальных. Наиболее интенсивные колебания обделок были зарегистрированы в тоннелях кругового очертания в обводненных песках.

**II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ  
"ПУТЬ-ОБДЕЛКА" СО ВПАЛОБАЛЛАСТНЫМ ПОДРЕЛЬСОВЫМ  
ОСНОВАНИЕМ**

Анализ различных вариантов динамической модели системы "путь-обделка" показал, что для изучения ее вертикальных колебаний наиболее приемлема система с сосредоточенными массами элементов тоннеля. Она обладает следующими основными достоинствами:

1) в структуру расчетной модели можно ввести многие параметры пути и обделок, возможны вариации в широких пределах этими параметрами;

2) обеспечивается стабильный порядок математического решения о колебаниях при вариациях исходных данных;

3) несложный переход от результатов математического решения к действительным колебаниям исследуемой системы.

Расчетная схема взаимодействия подвижного состава и тоннелей была представлена системой с 4-мя степенями свободы, а колебания ее описаны следующими дифференциальными уравнениями:

$$m_0 y_0'' = P_{cm}^I - \Delta_0 y_0' - K_0 y_0 - \Delta_0 (y_0' - y_2' - \varrho') - K_0 (y_0 - y_2 - \varrho);$$

$$m_2 y_2'' = P_{cm}^I + K_0 (y_0 - y_2 - \varrho) + \Delta_0 y_0' - (\Delta_0 + \Delta_2) y_2' + \Delta_0 y_2' - K_0 (y_2 - y_2) - \Delta_0 \varrho';$$

$$m_2 y_2'' = P_{cm}^II + K_0 (y_0 - y_2) + \Delta_0 y_0' - (\Delta_2 + \Delta_0) y_2' + \Delta_2 y_1' - K_0 (y_2 - y_1);$$

$$m_1 y_1'' = P_{cm}^II + K_0 (y_2 - y_1) + \Delta_2 y_2' - (\Delta_2 + \Delta_1) y_1';$$

$$m_{p.m.} y_{p.m.}'' = P_{cm}^I + K_0 (y_0 - y_2 - \varrho) + \Delta_0 (y_0' - y_2' - \varrho') - K_{p.m.} (y_{p.m.} - y_1) - \Delta_{p.m.} (y_{p.m.}' - y_1').$$

НТБ  
ДУЖТ

Здесь  $m_{1,2,3,4}$  - соответственно приведенные массы об-  
делки, рельса, шпалы и колеса:  $K_{1,2,3,4,5}$  - жесткость услов-  
ной связи обделки: со средой, шпалы с обделкой, рельса со шпалой,  
контактной пружины, рессоры:  $\mathcal{L}_{1,2,3,4,5}$  - трение в указанных  
связях. Пятое уравнение в системе характеризует колебания рель-  
сошпальной решетки, как одного элемента пути на шпалобалласт-  
ном основании. В этом уравнении  $m_{р.ш.}$  - приведенная масса рель-  
сошпальной решетки,  $K_{р.ш.}$  - жесткость шпалобалластного основа-  
ния,  $\mathcal{L}_{р.ш.}$  - вязкое трение в нем.  $y_{1,4}, y'_{1,4}, y''_{1,4}$  - перемещения,  
скорости и ускорения колебаний масс;  $P_{ст}^{I-E}$  - нагрузка от  
кузова на колесо, принятая статической, и ее осевые составляющие;  
 $\epsilon$  - глубина неровности рельсовой пути.

Динамические характеристики нижнего отроения пути (обделки  
с вовлеченной в колебания массой среды) были получены на основе  
результатов экспериментальных измерений. Расчетным путем опре-  
делена взаимная зависимость между величинами  $m_1, K_1, \mathcal{L}_1$ , а  
также периодом колебаний обделки и показателем их затухания  
для различных конструкций тоннелей. В решениях эти параметры  
варьировались в следующих пределах:

$$m_1 = 5 + 30 \frac{\text{кг см}^2}{\text{см}}, \quad K_1 = (1,45 + 8,70) \cdot 10^7 \text{ кг/см},$$

$$\mathcal{L}_1 = (0,43 + 2,58) \cdot 10^8 \text{ кг см/см}.$$

Характеристики пути были определены натурными измерениями  
в тоннелях с привлечением литературных материалов (Новичков  
В.П., Попов С.Н., Яковлев В.Ф., Семенов И.И., Дюпюи К.И.,  
Фришман М.А., Орловский А.Н., Воробейчик Л.Я., Клименко В.Н.,  
Климов В.И.). Массы элементов пути принимались постоянными, а  
жесткости нелинейными, зависящими от приложенной нагрузки или

деформаций связей. Трение во всех связях системы было принято прямопропорциональным скорости колебаний. Уравнения решались на аналоговых вычислительных машинах: МПТ-9М и двух МН-7М, включенных в параллельную работу. Решения о вариациях скоростей, осевых нагрузок, характеристики пути и обделок позволили количественно оценить влияние этих факторов на колебания системы "путь-обделка" со шпалобалластным подрельсовым основанием и дополнить картинку, полученную натурными измерениями.

Моделирование о вариацией скоростей показало, что с увеличением их от эксплуатационных (60-70 км/час) до перспективных (100-120 км/час) амплитудный уровень колебаний обделок повышается на 60 - 70 %. Причем, еще отчетливее выделяются их опасные формы-собственные колебания. Вдвое увеличивается интенсивность высокочастотных колебаний рельса и на 70-80 % - амплитуды основного тона. Наряду с этим увеличивается и число ударов колеса о рельс за равные промежутки времени, что ведет, с одной стороны, к приближению их цикличности к основному тону, а с другой - к суммированию непогашенных колебаний от чередующихся ударов.

С увеличением давления от подвижного состава на рельсовые нити максимальный уровень колебаний обделок снижается. Этот вывод согласуется с экспериментальными данными. Результаты решений о вариациях динамических характеристики тоннежа ( $M_1, M_2, \epsilon_1$ ) дали возможность оценить влияние конструкций обделок и плотности среды на колебания. Общее увеличение амплитудного уровня колебаний обделок в рыхлых средах обусловлено повышением амплитуд основного тона верхнего строения пути. Следовательно, в рыхлых средах состояние пути в большей степени влияет на колебания обделок.

Амплитуды колебаний пути и обделок прямопропорциональным глубине изолированных неровностей рельсовых нитей. Наиболее интенсивны колебания при взаимодействии пути и подвижного состава в зоне стыков. Замена стыков звеньевом пути сварными ведет к снижению максимальных вибраций обделок в 3 - 5 раз. При этом возможно увеличение скорости до 120 км/час без повышения уровня вибраций по сравнению с наблюдаемым при существующих скоростях и звеньевом пути. Аналогично влияние сварки стыков и на колебания рельсоопальной решетки.

Неравномерность пути, действуя как возмущающий фактор непрерывно, способствует возбуждению интенсивных колебаний при ударном взаимодействии пути и подвижного состава.

Таким образом, мероприятия по уменьшению колебаний тоннелей со шпалобалластным подрельсовым основанием должны базироваться, прежде всего, на улучшении состояния пути: ликвидации изолированных неровностей на рельсовых нитях, замене звеньевом пути бесстыковым с высоким качеством сварки стыков, обеспечении равномерности пути вдоль рельсовых нитей.

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ АВМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ "ПУТЬ-ОБДЕЛКА" С МОНОЛИТНЫМ ПОДРЕЛЬСОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

В ходе исследований изучены закономерности колебаний тоннелей с монолитным подрельсовым основанием и влияние на них факторов, связанных с конструкцией пути и тоннелей, а также с поездной нагрузкой. Наряду с этим, определены характер и величины динамических нагрузок на тоннели. На основе этих исследований оценено влияние звеньев шпалобалластного основания монолитным на характер взаимодействия тоннелей с подвижным составом. Резуль-

таты исследований использованы для определения оптимальных параметров подрельсового основания, рекомендаций по допустимым скоростям движения поездов, динамическим нагрузкам на тоннели и другим расчетным характеристикам тоннельных сооружений. Наряду с прогнозированием интенсивности, изучение закономерностей колебаний позволило наметить наиболее эффективные способы гашения их.

Проведение натуральных измерений в эксплуатируемых тоннелях с монолитным основанием пути или устройством специальных экспериментальных участков в тоннелях со шпалобалластным основанием не представлялось возможным. Наряду с этим, опираясь только на результаты экспериментов на опытных участках с постоянными характеристиками пути и обделок, эксплуатационными скоростями и осевыми нагрузками, невозможно учесть все многообразие факторов, определяющих закономерности исследуемого процесса. Необходимы искусственные вариации этих факторов, несуществующие в природе. В этой связи наиболее рациональной была принята постановка исследований с помощью математического моделирования, аналогично выполняемым исследованиями для тоннелей со шпалобалластным основанием.

Моделированные колебания тоннелей со шпалобалластным основанием удовлетворительно сходится с действительными. Это обстоятельство позволило использовать модель с дискретными массами для исследования вертикальной динамики системы "путь-обделка" для тоннелей с монолитным основанием пути.

Динамические характеристики обделок (приведенная масса, жесткость и неупругие сопротивления связей со средой, частоты и декременты затухания собственных колебаний) не зависят от изменения конструкции пути. Они в равной степени характеризуют

исследуемую систему с монолитным основанием. Но расчетная схема принципиально меняется в части моделирования верхнего строения пути. Параметры этой части схемы назначались на основе литературных данных о работе пути с бетонным основанием на земляном полотне и искусственных сооружениях (Шахунянец Г.М., Лаварян В.А., Фришман М.А., Волошно Ю.Д., Липовский Р.С., Воробейчки Д.Я., Климов В.И., Гасанов А.И., Хвостик Г.С.) При определении жесткости связи между рельсом и обделкой реальные рельсовые опоры заменялись на участке, равном длине линии влияния, одной эквивалентной связью. Неупругие сопротивления в ней складывались из сил трения, прямопропорциональных перемещениям рельса и независимых от них (по данным ДИИТа).

С помощью моделирования определялись те же характеристики динамических процессов, что и для тоннелей со шпалобалластным основанием, но вместе с колебаниями регистрировались и динамические усилия в связях системы.

Особое внимание уделялось влиянию подрельсового основания. Анализ результатов моделирования показал, что жесткость пути в значительной степени определяет особенности колебаний системы "путь-обделка". Амплитуды колебаний обделки возрастают прямопропорционально жесткости рельсовых опор ( $J_p$ ) с увеличением ее значений до 100 т/см, соответствующих модулю упругости пути около 2000 кг/см<sup>2</sup>. Ватем влияние жесткости несколько ослабевает. Повышение жесткости пути особенно ощутимо оказывается на колебаниях обделки в рыхлых средах.

Интенсивность основного тона колебаний рельса (30-80 герц) изменяется обратнопропорционально жесткости пути, а высокочастот-

ные гармоники ( до 600 герц) при  $M_0 = 15 - 250$  т/см изменяются мало.

Влияние жесткости пути на динамические усилия неоднозначно в разных связях системы при эксплуатационных скоростях. Но при повышенных скоростях отчетливо выражена тенденция к непрерывному росту динамических нагрузок на тоннели с увеличением жесткости.

С увеличением жесткости усиливается отрицательное влияние высоких скоростей поездов на динамику тоннелей. Так, амплитуды колебаний обделок почти не зависели от скорости при  $M_0 = 15$  т/см, но при  $M_0 = 100$  т/см они возрастали в 2,5 раза с увеличением ее от 120 до 160 км/час.

Зависимость амплитуд колебаний рельса от скорости при всех значениях  $M_0$  близка к линейной. Но на "мягком" основании повышение их обусловлено как низкочастотной, так и высокочастотной составляющими, а на жестком увеличиваются, главным образом, низкочастотные амплитуды.

Влияние скорости на динамическую реакцию среды, действующую на обделку, обнаруживается при  $M_0$  более 100 т/см. Рост усилий обусловлен вынужденными колебаниями обделки.

В связях рельса и обделки динамические нагрузки увеличиваются на 30 и 80 процентов соответственно  $M_0 = 15$  и 250 т/см при повышении скорости от 20 до 200 км/час.

Повышение осевых нагрузок снижает уровень колебаний системы "путь-обделка", но одновременно увеличиваются высокочастотные силы в основании обделки и низкочастотные - в связях рельса и обделки, а также на контакте колеса и рельса. Получены функциональные зависимости сил в связях от осевых нагрузок.

Выводы о влиянии состояния пути, полученные для тоннелей

со шпалобалластным основанием, в равной степени относятся и к тоннелю с монолитным основанием пути. Вместе с амплитудами колебаний прямопропорционально глубине неровностей пути растут и динамические нагрузки на элементы тоннеля.

Анализ результатов исследований показал, что, назначая оптимальную жесткость рельсовых опор, можно существенно уменьшить динамические нагрузки и снизить интенсивность колебаний тоннелей.

Трение в основании незначительно изменяет максимальный уровень сил и вибраций, но резко сокращает число их циклов, особенно при высоких скоростях и в стадии безударного взаимодействия пути и подвижного состава.

Сравнение колебаний обделок в тоннелях со шпалобалластным и монолитным основанием показывает, что с реконструкцией пути интенсивность колебаний не повышается, если модуль упругости пути при этом не превышает 1000-1100 кг/см<sup>2</sup>. Такой модуль обеспечивает рельсовые опоры с жесткостью 50-60 т/см и расстоянием между ними 55 см.

Если в тоннелях укладывать бесстыковый путь с тщательно обработанной поверхностью рельсовых нитей, то при скорости до 80 - 100 км/час жесткость рельсовых опор может быть увеличена до 100 - 150 т/см.

Обеспечение равномерности пути, ликвидация изолированных неровностей с уклоном более полутора-двух тысячных при модуле упругости 1000 кг/см<sup>2</sup> позволяет повысить скорости до 150-160 км/час. Уровень колебаний обделок при этом не превышает наблюдаемый в тоннелях со шпалобалластным основанием и звеньевым путем при скоростях поездов 60 - 80 км/час.

#### IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАБОТЫ РЕЛЬСОВЫХ ОПОР ПУТИ НА МОНОЛИТНОМ ОСНОВАНИИ В ТОННЕЛЯХ

Устойчивость пути на монолитном основании в целом обеспечивается, прежде всего, стабильностью конкретных рельсовых опор-узлов промежуточных креплений. Изучение их динамической устойчивости - обязательный этап в комплексе исследований работы пути.

Упругие свойства пути на монолитном основании в тоннелях формируются незначительно за счет упругости элементов узлов промежуточных креплений. Жесткость основания на два порядка выше жесткости упругих элементов. Такое соотношение определяет специфику работы рельсовых опор.

Нами изучалась динамическая работа узлов промежуточного крепления типа КБ-65, предусмотренных проектом реконструкции пути в тоннеле "А" для использования в качестве рельсовых опор. В этом узле упругость создается прокладками под рельсом и подкладкой, также прикрепителями.

С помощью моделирования на АВМ решались следующие задачи:

- 1) определение вибрационных характеристик и динамических нагрузок на узел крепления;
- 2) оценка влияния упругих элементов на динамику рельсовой опоры, выявление оптимальных характеристик упругих элементов ;
- 3) определение влияния скоростей подвижного состава, давления на рельсовую нить, условий монтажа узла крепления на его динамику;
- 4) разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости рельсовых опор в тоннелях.

В описанную выше расчетную схему системы "путь-обделка" с

монолитным основанием группа рельсовых опор вводилась в виде условной связи между рельсом и обделкой. Для детального анализа работы узла крепления под поездной нагрузкой расчетная схема была представлена системой с четырьмя степенями свободы, с введенной в нее в виде отдельной массы рельсовой подкладкой. Последняя соединялась с рельсом и обделкой связями, эквивалентными подрельсовой и подподкладочной прокладкам, закладным и клеммным прирепительям. Характеристики этих связей назначались на основе соответствующих данных ДИИТа, результатов испытаний упругих элементов промежуточных соединений, материалов исследований статической работы рельсовых опор (Фришман М.А., Волошко П.Г., Коробейчик Л.Я., Климов В.И., Титуревич А.П., Лысов В.С., Евдокимов Б.А., Барабанин В.Ф., Беляков Л.Б., Шагунянд Г.М., Новичков В.П.).

Решения системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику узла, проводилось с учетом воздействия одиночного колеса, а также тележек и экипажей. На осциллограммах решений записывались смещения, скорости и ускорения колебаний рельса и подкладки, а также динамические усилия в прокладках и болтах.

В спектре колебаний элементов узла выявлены две группы частот: а) 70-100 герц, б) около 700 герц. Колебания группы "а" имеют импульсный характер и отличаются большими динамическими перемещениями. Высокочастотные вибрации с незначительными перемещениями характеризуются высоким уровнем ускорения - до 200 - 300 g. Большие ускорения обусловлены колебаниями входящей в комплект узла подкладки и передаются другим его элементам.

Оптимальные параметры прокладок и прирепителей узла позволяют снизить амплитуды колебаний, сократить их длительность,

ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО АРХИВА

уменьшить динамические нагрузки на узел. Интенсивность вибрации минимальная при значениях жесткости прокладок от 60 до 120 т/см. Этими же пределами ограничивается и оптимальная жесткость прирепителей.

Силы сухого трения снижают амплитудный и энергетический уровень высокочастотных колебаний, эффективно сокращают длительность и предотвращают взаимное наложение их от чередующихся возмущений. Силы трения в узле скрепления, равные 0,4 - 0,6 т, позволяют снизить в 4 - 6 раз максимальные амплитуды резонансных высокочастотных колебаний и в 1,3 - 1,6 раза - низкочастотных. Повышенное сухое трение может являться дополнительным возмущающим фактором.

Динамические нагрузки на элементы узла крепления в большой степени зависят от свойств болтовых соединений и прокладок. Оптимальный с этой точки зрения диапазон жесткости прокладок лежит в пределах 50 - 120 т/см.

Минимальные растягивающие усилия в болтах имеют место при жесткости прирепителей 20 - 60 т/см. В наибольшей степени снижают динамические нагрузки силы трения 0,3 - 0,7 тонн.

Различные сочетания оптимальных с точки зрения динамики узла скрепления жесткостей его прокладок и прирепителей обеспечивают примерно одинаковую общую жесткость рельсовой опоры - 50 - 60 т/см. Таким образом, жесткость рельсовой опоры  $M_0 = 50 - 60$  т/см пути на монолитном основании наиболее благоприятна с точки зрения как динамики системы "путь-обделка", так и динамической устойчивости самой опоры.

Полное освобождение прирепителей узла от контактных деформаций является дополнительным возмущающим фактором. Уровень кон-

ДНЕПР

симальных вибраций может быть снижен в 3 - 5 раз, если избежать полного разгрузки болтов от монтажных нагрузок при прохождении поездов.

Увеличение скорости экипажей с 20 до 100 км/час незначительно повышает амплитуды вибраций и усилий в узле крепления. Обнаружено более эффективное гашение высокочастотных колебаний неупругими силами с увеличением скорости в указанных пределах. Но при скорости более 100 - 120 км/час резко возрастает уровень вибраций и динамических нагрузок на рельсовую опору.

В диапазоне давления от экипажа на одну рельсовую опору 2,5 - 4 тонны динамические нагрузки в ней минимальные. За пределами этого диапазона нагрузки возрастают, полностью динамически разгружаются прирепители. Последнее приводит к резкому увеличению вибраций и усилий в узле.

Обнаружено действие возмущающего фактора, связанного с изменением давления на рельсовую опору от максимального под тележками экипажа до минимального между ними. При этом растягивающие усилия в прирепителях увеличивались в 1,5 - 1,7 раза.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования, проведенные в тоннелях со шпалобалластным основанием и различными конструкциями тоннельных обделок в разнообразных геологических условиях, позволили определить действительный амплитудный уровень, частотный диапазон колебаний пути и обделок при прохождении поездов и выявить их основные частоты.

По специально разработанной методике проводился спектральный анализ колебаний пути и обделок. В результате статистической обработки получены неразрывные спектры колебаний рельсошпальной

решетки в диапазоне 3 - 3200 герц и тоннельных обделок - до 600 герц. Интенсивность составляющих оценивалась смещениями, скоростями, ускорениями и энергией колебаний, с получением комплекса соответствующих спектров.

2. На основе экспериментальных данных изучены закономерности распространения колебаний в тоннелях со шпалобалластным основанием. Путем количественного и качественного сопоставления спектров в различных пунктах тоннелей определены виброгасящие свойства его элементов. Подробно исследовано влияние подрельсового основания на колебания системы "путь-обделка".

Выявлен диапазон наиболее опасных колебаний тоннелей, активные зоны поперечного сечения, вовлеченные в колебания.

3. В результате экспериментальных исследований получены необходимые данные для разработки динамической модели тоннеля, использовавшейся в последующих теоретических исследованиях.

4. С помощью моделирования на аналоговых вычислительных машинах проведены теоретические исследования вертикальных колебаний тоннелей со шпалобалластным основанием. Полученные результаты позволили оценить количественно влияние факторов, связанных с тоннелями и поездной нагрузкой, и дополнить картину, полученную натурными измерениями.

5. Выполнены теоретические исследования вертикальной динамики системы "путь-обделка" с монолитным подрельсовым основанием. Прогнозируется влияние замены шпалобалластного основания монолитным на характер взаимодействия подвижного состава и тоннелей. Результаты исследований могут быть использованы для определения оптимальных параметров монолитного подрельсового основания, рекомендаций по допустимым скоростям движения поездов, динамическим нагрузкам на тоннель и другим расчетным характеристикам тоннельных

сооружений.

6. Теоретическим путем о использовании А Б М исследовалась динамическая устойчивость рельсовых опор пути на монолитном основании в тоннелях. Изучалась динамика узла крепления КБ-65, предусмотренного проектом реконструкции пути в тоннеле "А" для использования в качестве рельсовых опор. Определены вибрационные характеристики узла, динамические усилия в нем, зависимости их от упругих элементов, сил трения, условий монтажа и других факторов. Даны рекомендации по оптимальным характеристикам рельсовых опор.

НТБ  
ДНУЖТ

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. КАТЕН-ЯРЦЕВ А.С. Колебания системы "путь-обделка" при движении поездов. Материалы 26-й научно-технической конференции ХАБИИИТа, вып. II (путь и строительство), Хабаровск, 1969.
2. КАТЕН-ЯРЦЕВ А.С. Экспериментальные исследования колебаний пути в туннелях и тоннельных обделках от одиночных ударов. Там же.
3. КАТЕН-ЯРЦЕВ А.С. О расчетной схеме взаимодействия пути и подвижного состава в туннелях. Труды ХАБИИИТа, вып. 41, Хабаровск, 1970.
4. КАТЕН-ЯРЦЕВ А.С. Моделирование взаимодействия пути и подвижного состава с переменным давлением на рельзную нить. Труды ХАБИИИТа, вып. 41, Хабаровск, 1970г.
5. КАТЕН-ЯРЦЕВ А.С. Динамическое воздействие поездов на туннели с монолитным подрельсовым основанием. Материалы второй конференции молодых ученых Хабаровского края. Секция физико-техническая. Хабаровск, 1970.
6. КАТЕН-ЯРЦЕВ А.С. Динамическая работа рельсовых опор пути на монолитном основании в туннелях. Там же.

НТБ  
ДНУЖТ

ВЛО6021 Тираж 200.

Ротапринт ДЦНТИ ДВ кд.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ  
ДНУЖТ