

На правах рукописи

Аспирант БОРЩОВ Владимир Ильич

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ
РАЗВОДНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ
С ВЕРТИКАЛЬНО-ПОДЪЕМНОЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТЬЮ

(Специальность № 05.22.05 «Искусственные сооружения
на железнодорожном и автомобильном транспорте»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1973

НТБ
ДНУЖТ

На правах рукописи

Аспирант Борцов Владимир Ильич

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ РАЗВОДНЫХ ПРОЛЕТНЫХ
СТРОЕНИЙ МОСТОВ С ВЕРТИКАЛЬНО-ПОДЪЕМНОЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТЬЮ

(Специальность № 05.22.05 «Искусственные сооружения
на железнодорожном и автомобильном транспорте »)

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

Днепропетровск
1973

НТБ
ДНУЖТ

При сооружении мостов в черте города через реки с низкими берегами или под современными автомобильную и железную дороги вблизи станций, т.е. тогда, когда поднять уровень моста на требуемую высоту из-за отсутствия места для развития подходов невозможно, целесообразно применение разводных мостов.

Основным видом разводных мостов на сети железных дорог нашей страны, благодаря возможности перекрытия больших пролетов, простоте конструкции и высоким эксплуатационным характеристикам, являются мосты с подъемом на башнях и мосты с пролетными строениями, имеющими вертикально-подъемную проезжую часть .

Пролетные строения с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью относятся к комбинированным системам, состоящим из жестких ферм основного пролетного строения и гибкого подвесного пролетного строения (фермы жесткости), связанных между собой упругими односторонними связями — подвесками .

Между тем, действующими техническими условиями проектирования мостов установлены нормы динамических коэффициентов и вертикальных прогибов пролетных строений железнодорожных металлических мостов независимо от системы. Кроме того, в настоящее время в мостостроении для изготовления пролетных строений более широкое применение получают низколегированные стали и алюминиевые сплавы, что приводит к уменьшению жесткости пролетных строений. В некоторых случаях, применение существующих норм жесткости металлических пролетных строений не позволяет в полной мере использовать преимущества новых прогрессивных материалов. Уточнение норм жесткости неразрыв-

НТБ
ДНУЖТ

но связано с выяснением характера взаимодействия подвижных железнодорожных нагрузок и пролетных строений .

Исследованию воздействия нагрузок на пролетные строения, поведению экипажей на мостах, а также взаимодействию подвижного состава и пролетных строений посвящено значительное число работ. Здесь прежде всего необходимо отметить работы В.В.Болотина, Н.Г.Бондаря, А.Б.Моргаевского, С.И.Конашенко, В.П.Орленко, И.И.Казея, Ю.Г.Козьмина, К.Е.Китаева, Ю.М.Майзеля, В.М.Мучникова, Г.Н.Яковлева, Б.Ф.Лесохина, В.В.Тимошенко, В.П.Тарасенко, Л.Фрибы, В.Колоушка и др. Теоретические и экспериментальные исследования динамического воздействия новых видов вагонов и локомотивов на балки проезжей части мостов и на малые металлические мосты выполнены НИИ мостов при ЛИИЖТе . Накоплен значительный опыт, который позволил предложить практические методы учета динамического воздействия на железнодорожные мосты .

Несмотря на то, что имеется много работ, посвященных экспериментально-теоретическим исследованиям динамической работы пролетных строений различных систем, динамика разводных мостов с вертикальным подъемом изучена недостаточно. Между тем, теоретические и экспериментальные исследования динамической работы вертикально-подъемных пролетных строений позволят получить обоснованные нормы динамических коэффициентов и вертикальных прогибов для указанных пролетных строений с целью улучшения их работы и обеспечения безопасности движения поездов при высоких скоростях .

Диссертационная работа посвящена исследованию свободных пространственных и вынужденных вертикальных колебаний пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью в линейной постановке .

Исследования динамической работы этих пролетных строений подразделялись на теоретические и экспериментальные. Теоретическим исследованиям предшествовало изучение особенностей конструкции и натурное обследование объектов. Для описания поведения пролетных строений были составлены математические модели. Дифференциальные уравнения, описывающие свободные пространственные и вынужденные вертикальные колебания, решались аналитически, а также на аналоговых и цифровых вычислительных машинах.

Полученные на основании теоретических исследований выводы проверялись на объектах путем постановки эксперимента. Поскольку на результаты эксперимента в каждом отдельном опыте оказывают влияние множество случайных факторов, к оценке результатов экспериментов применялся статистический подход.

С этой целью проводилось необходимое количество опытов, составлялась статистическая выборка и применялся аппарат математической статистики, включая дисперсионный и спектральный анализы. По полученным таким образом экспериментальным данным производилась корректировка теоретических выкладок и уточнялись расчетные схемы.

Работа объемом в 172 страницы машинописного текста с 63 иллюстрациями и 21 таблицей состоит из введения, четырех глав, выводов, приложений и списка литературы. Библиография содержит 136 названий.

В первой главе рассматриваются свободные вертикальные и пространственные колебания пролетных строений; исследуется влияние различных конструктивных элементов на частоты и формы вертикальных колебаний системы; приводятся приближенные формулы для определения частот пространственных колебаний про-

летных строений. Ввиду некоторого отличия рассматриваемых систем от балочных металлических пролетных строений со сквозной решеткой, для лучшего понимания расчетных схем приведено описание конструкций пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью.

Определение форм и частот собственных вертикальных колебаний производится с учетом балочной клетки и мостового полотна железнодорожной проезжей части. При этом рельсовые нити, продольные балки, ферма жесткости и основное пролетное строение представлены в виде эквивалентных балок постоянного по длине пролета сечения, связанных между собой упругими безынерционными слоями. Кроме того, вводятся следующие допущения эквивалентные балки, заменяющие рельсовые нити, продольные балки, ферму жесткости и основное пролетное строение, имеют на обоих концах шарнирное опирание; инерционные силы сдвига и вращения не учитываются; подвески фермы жесткости и поперечные балки приняты равномерно распределенными по длине пролета.

С учетом этих допущений, свободные вертикальные колебания пролетных строений описываются дифференциальными уравнениями в частных производных

$$E_i J_i y_i^{IV}(x, t) - K_{i-1,i} [y_{i-1}(x, t) - y_i(x, t)] + \\ + K_{i,i+1} [y_i(x, t) - y_{i+1}(x, t)] = -m_i \ddot{y}_i(x, t), \\ (i = 1, 2, 3, 4), \quad (I)$$

где $E_i J_i$ - изгибные жесткости несущих слоев; $y_i(x, t)$ - поперечные перемещения эквивалентных балок; m_i - погонные массы соответствующих эквивалентных балок; $K_{i,i+1}$ - погонные жесткости упругих слоев между балками i и $i+1$

$$K_{3,4} = K_{4,5} = 0.$$

Рассматриваемая система имеет четыре счетных множества частот и соответствующих им форм колебаний.

Применяя метод Фурье, из уравнений (1) получена система пяти дифференциальных уравнений в обыкновенных производных. Одно из уравнений этой системы определяет частоту колебаний в каждой форме, а остальные четыре – формы колебаний соответствующих несущих слоев.

При обычном способе решения системы дифференциальных уравнений приходится иметь дело с характеристическим уравнением 16-го порядка. Учитывая то обстоятельство, что граничные условия для всех балок, входящих в пакет одинаковы, между формами колебаний балок вводятся соотношения

$$X_i(x) = c_i X_4(x), \quad (i=1,2,3,4) \quad (2)$$

Это позволяет систему дифференциальных уравнений для форм колебаний привести к системе алгебраических нелинейных неоднородных уравнений 4-го порядка относительно коэффициентов распределения амплитуд c_i и квадрата круговой частоты θ_k^2

$$A\bar{c} = 0, \quad (3)$$

где $A = \{a_{ij}\}$ – матрица коэффициентов при неизвестных;
 \bar{c} – вектор-столбец коэффициентов распределения амплитуд.

Частоты колебаний и коэффициенты распределения амплитуд, полученные в результате численного решения системы алгебраических уравнений (3) на ЭЦМ «Наири-2» методом перебора, для двух пролетных строений приведены в таблице I.

Таблица I

Мост	Форма колебаний	Частоты колебаний (гц)		Коэффициенты распределения амплитуд		
		теоретические	эксперимент	C_1	C_2	C_3
А	I	2,26	2,28	1,0367	1,0366	1,0303
		12,93	13,65	-10,543	-10,518	-8,416
		43,91	42,8-46,1	87,157	84,792	-111,217
		237,21	-	-	-	-
В	I	2,71	2,74	1,0342	1,0341	1,022
		17,42	-	-4,871	-4,850	-2,487
		46,34	-	10,219	9,910	-24,341
		237,21	-	-	-	-

Для определения влияния каждого из несущих слоев рассматривались совместные колебания продольной балки, фермы жесткости и основного пролетного строения; совместные колебания фермы жесткости и основного пролетного строения; колебания основного пролетного строения.

Колебания этих расчетных систем описываются уравнением (I) соответственно при $i = 2, 3, 4$; $i = 3, 4$; $i = 4$.

При совместных колебаниях фермы жесткости и основного пролетного строения коэффициенты распределения амплитуд определяются путем решения квадратного уравнения

$$C_3^2 + (A\lambda_n^4 + B)C_3 - D = 0 \quad (4)$$

где

$$A = \frac{m_4 E_3 J_3^* - m_3^* E_4 J_4}{m_3^* K_{3,4}} ;$$

$$B = \frac{m_4}{m_3^*} - 1 \quad D = \frac{m_4}{m_3^*}$$

НТБ
ДНУЖТ

Частотное уравнение имеет вид :

$$\Theta_k^4 - (N\lambda_k^4 + F)\Theta_k^2 + (P\lambda_k^4 + R)\lambda_k^4 = 0, \quad (5)$$

где

$$N = \frac{E_3 J_3^*}{m_3^*} + \frac{E_4 J_4}{m_4}; \quad F = \frac{K_{34}(m_3^* + m_4)}{m_3^* m_4}; \quad P = \frac{E_3 J_3^* E_4 J_4}{m_3^* m_4}; \quad R = \frac{K_{34}(E_3 J_3^* + E_4 J_4)}{m_3^* m_4},$$

$E_3 J_3^*$ - изгибная жесткость подвесного пролетного строения (фермы жесткости) с учетом жесткости рельсовых нитей и продольных балок; m_3^* - погонная масса фермы жесткости с учетом масс рельсовых нитей и продольных балок.

Частоты и коэффициенты распределения амплитуд, полученные в результате решения уравнений (4) и (5) для системы "основное пролетное строение - ферма жесткости", приведены в табл.2.

Таблица 2.

Формы колебаний	Пролетное строение моста А			Пролетное строение моста В		
	Частоты колебаний (Гц)		C_3	Частоты колебаний (Гц)		C_3
	теоретические	эксперимент		теоретические	эксперимент	
I	2,26	2,28	1,0303	2,72	2,74	1,022
	13,65	13,65	-9,543	20,61	-	-3,925

Для выяснения влияния колебаний основного пролетного строения на частоты и формы колебаний фермы жесткости исследовались связь и связанность фермы жесткости и основного пролетного строения для первой формы.

В результате исследования свободных вертикальных колебаний пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью как слоистых систем сделаны следующие

выводы незначительное отличие коэффициентов распределения амплитуд C_1 от единицы, а также близость частот полной и упрощенных систем в низшей синфазной форме колебаний являются свидетельством того, что рельсовая нить, продольная балка и ферма жесткости незначительно влияют на колебания основного пролетного строения; в антифазной форме колебаний близость частот полной и упрощенной систем свидетельствуют о том, что рельсовая нить незначительно влияет на колебания системы; значительные расхождения между частотами полной (табл. I) и упрощенной (табл. 2) систем, а также значения коэффициентов распределения амплитуд C_1 для пролетного строения моста В свидетельствуют о влиянии основного пролетного строения и являются результатом большой связанности в системе «основное пролетное строение - ферма жесткости».

Следует также отметить, что теоретические частоты свободных вертикальных колебаний пролетных строений удовлетворительно совпадают с экспериментальными.

Проведенные исследования позволяют при решении задач взаимодействия подвижной нагрузки с основными пролетными строениями заменять подъемные пролетные строения эквивалентными по жесткости и массе балками.

При исследовании взаимодействия подвижной нагрузки с фермой жесткости в случае слабого взаимодействия фермы жесткости с основным пролетным строением колебания основного пролетного строения можно не учитывать. В этом случае рассматриваются колебания фермы жесткости относительно неподвижного основного пролетного строения.

Взаимодействие подвижной нагрузки с фермой жесткости в случае сильного взаимодействия в системе «ферма жесткости -

основное пролетное строение" должно рассматриваться с учетом колебаний основного пролетного строения.

При рассмотрении свободных пространственных колебаний пролетного строения контур его поперечного сечения принимается деформируемым, а порталы неподвижными ("теория ДИИТа"). Пролетное строение рассматривается как система с распределенными по длине пролета массами, состоящая из упруго связанных между собой балок, роль которых выполняют: в вертикальной плоскости - две фермы основного и две фермы подвесного пролетных строений; в горизонтальной плоскости - верхняя и нижняя ветровые фермы основного пролетного строения и ферма жесткости. Роль упругих слоев выполняют поперечные связи основного пролетного строения и подвески фермы жесткости. Приняты также следующие допущения: основное и подвесное пролетные строения имеют постоянные по длине пролета поперечные сечения; подвески фермы жесткости и поперечные связи основного пролетного строения приняты распределенными по длине пролета; верхняя и нижняя ветровые фермы основного пролетного строения моделируются в виде балок на упругих опорах; главные и ветровые фермы пролетного строения работают только на нагрузку в плоскости фермы и не сопротивляются изгибу из плоскости фермы; изгибная жесткость подвесок не учитывается.

Учитывая, что на каждую балку, кроме равномерно распределенных инерционных сил, действуют силы, вызванные перемещением остальных балок, дифференциальные уравнения движения имеют вид:

$$EJ_i \ddot{x}_i^{\bar{n}} = p_i - m_i \ddot{x}_i \quad (i=1,2,\dots,7), \quad (6)$$

где x_i - прогибы ферм по соответствующим направлениям;
 EJ_i, m_i - изгибные жесткости и погонные массы ферм, располо-

женных в плоскостях, соответствующих направлениям ; P_i - погонные нагрузки со стороны остальных ферм .

Для применения подхода, использованного при определении частот и соответствующих им форм свободных вертикальных колебаний пролетного строения, граничные условия для всех балок системы должны быть одинаковыми. С этой целью верхняя и нижняя ветровые фермы основного пролетного строения с упругими опорами на концах заменены динамически эквивалентными балками с жесткими шарнирными опорами . Для этого требуется, чтобы прогибы середины и частоты колебаний ветровых ферм и эквивалентных балок были одинаковы . Условия выполняются в том случае, когда жесткости и массы эквивалентных балок соответственно равны

$$EJ_i^* = \frac{L^3}{48(z_i + 0,5z_{0,i})} , \quad (i=1,2)$$

$$m_i^* = m_i \frac{K_i}{K_0} , \quad (i=1,2)$$

где z_i - соответственно податливости верхней и нижней ветровых ферм основного пролетного строения ; $z_{0,i}$ - податливости портала соответственно в уровне верхних и нижних поясов главных ферм основного пролетного строения ; K_i - коэффициент приведения масс соответственно для верхней и нижней ветровых ферм ; K_0 - коэффициент приведения масс для эквивалентной балки ; L - расчетный пролет пролетного строения.

В связи с пренебрежением изгибной жесткостью подвесок, уравнение описывающее горизонтальные колебания подвесного пролетного строения не связано с остальными .

Используя метод нормальных колебаний, приходим к системе алгебраических нелинейных неоднородных уравнений 6-го порядка

относительно коэффициентов распределения амплитуд C_i и квадрата круговой частоты θ_k^2

Полученные в результате численного решения системы алгебраических уравнений на ЭЦМ "Найри-2" частоты пространственных колебаний и коэффициенты распределения амплитуд приведены в табл.3 .

Таблица 3

Мост	Формы колебаний	Частоты колебаний (Гц)		Коэффициенты распределения амплитуд				
		теоретические	эксперимент	C_1	C_2	C_5	C_6	C_7
А	I	0,984	0,90	5,675	10,580	-I	1,005	-1,005
	II	1,670	1,76	-	-	-	-	-
	III	1,714	1,80	-4,112	0,189	-I	1,017	-1,017
	IV	2,260	2,28	0	0	I	1,030	1,030
	V	4,652	-	1,361	-0,145	-I	1,146	-1,146
	VI	13,649	13,65	0	0	I	-9,546	-9,546
	VII	13,701	-	0,105	-0,012	-I	-8,840	8,840
В	I	1,188	1,14	-6,580	-2,580	-I	1,004	-1,004
	II	1,480	1,44	-	-	-	-	-
	III	1,917	2,40	-0,670	3,202	-I	1,011	-1,011
	IV	2,715	2,74	0	0	I	1,022	1,022
	V	9,253	-	0,483	-0,660	-I	1,339	-1,339
	VI	20,595	-	0	0	I	-3,919	-3,919
	VII	21,108	-	0,090	-0,087	-I	-2,140	3,140

Как и для обычных балочных металлических пролетных строений со сквозной решеткой, первой формой свободных пространственных колебаний пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью являются горизонтальные синфазные колебания основного пролетного строения. При колебаниях по этой форме верхняя и нижняя фермы основного пролетно-

го строения перемещаются в одну и ту же сторону .

Второй формой пространственных колебаний системы являются горизонтальные колебания подвешенного пролетного строения.

Третья форма представляет собой антифазные горизонтальные колебания основного пролетного строения. В данном случае верхняя и нижняя верховые фермы перемещаются в разные стороны.

Колебания по четвертой и шестой формам являются, соответственно, синфазными и антифазными колебаниями системы "основное пролетное строение - ферма жесткости" . При колебаниях по этим формам горизонтальные перемещения ветровых ферм отсутствуют.

При колебаниях по пятой форме основное пролетное строение и ферма жесткости перемещаются синфазно, но при этом происходит значительное закручивание поперечного сечения основного пролетного строения.

Колебания по седьмой форме относятся к антифазным колебаниям основного пролетного строения и фермы жесткости, сопровождающиеся значительным закручиванием контура поперечного сечения основного пролетного строения .

Для определения частот и форм свободных пространственных колебаний пролетных строений с вертикально-подъемной проезжей частью использовался и другой подход . Пролетное строение заменено эквивалентной системой с ограниченным числом степеней свободы путем приведения масс к среднему сечению пролетного строения . В данном случае уравнения движения имеют вид :

$$x_i(t) = - \sum_{j=1}^7 M_j \delta_{ij} \ddot{x}_j(t), \quad (i, j = 1, 2, \dots, 7), \quad (7)$$

где M_j - приведенные массы ; δ_{ij} - коэффициенты влияния,

Принимая решения в виде

$$x_i(t) = C_i \cos(\theta_i t + \varphi_i), \quad (i=1,2,\dots,7), \quad (8)$$

после подстановки (8) в (7) и деления обеих частей каждого уравнения системы на θ_i^2 получено "вековое уравнение".

Основная трудность решения задач динамики многомассовых систем заключается в определении коэффициентов влияния, входящих в "вековое уравнение". Для этой цели рассмотрена пространственная работа пролетных строений от вертикальных и горизонтальных сил, действующих в плоскости одной из главных или ветровых ферм. В дополнение к изложенным выше допущениям принято, что поперечные связи расположены в шести промежуточных сечениях симметрично относительно середины пролетного строения. Подвески фермы жесткости заменены эквивалентной связью, приведенной к среднему сечению пролетного строения.

Частоты и формы свободных пространственных колебаний пролетного строения как системы с дискретными массами определены на ЭВМ "Проминь - М" и аналогичны приведенным выше.

Также произведен анализ коэффициентов частотного определителя, который позволил выделить основные формы колебаний при учете порядков коэффициентов симметризованной матрицы.

С достаточной для практических целей точностью частоты синфазных и антифазных горизонтальных колебаний основного пролетного строения могут быть определены по формулам:

$$\nu_{12} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{(\psi_{11} + \psi_{22}) \pm \sqrt{(\psi_{11} - \psi_{22})^2 + 4\psi_{12}^2}}} \quad (9)$$

Частоты горизонтальных колебаний подвешенного пролетного строения определяются выражением:

$$\nu_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\Psi_{33}}} \quad (10)$$

Частоты синфазных и антифазных колебаний пролетного строения по четвертой и пятой формам могут быть определены по формулам :

$$\nu_4 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\Psi_{44} + \Psi_{45}}} \quad \nu_5 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\Psi_{44} - \Psi_{45}}} \quad (11)$$

В формулах (9)-(11) - Ψ_{ij} - коэффициенты симметризованной матрицы .

Методика определения частот и форм свободных пространственных колебаний пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью как системы с дискретными массами по сравнению с методикой, примененной для определения частот и форм колебаний пролетного строения как системы с распределенными параметрами, требует значительно большего объема вычислений. Применение ее целесообразно в том случае, когда расчет производится на ЭВМ с малым объемом оперативной памяти .

Во второй главе рассматриваются нестационарные совместные вертикальные колебания нагрузки и пролетного строения.

В основу расчетной схемы для исследования вертикальных колебаний системы «основное пролетное строение - одиночный локомотив» положена схема, предложенная Л.Фрибой. Пролетное строение заменено динамически эквивалентной балкой постоянно-го по длине поперечного сечения. Проезжая часть рассматривается в виде упругого слоя переменной жесткости, т.е. учитывается «балочный эффект». Предполагается, что нагрузка движется с

постоянной скоростью по упруго-вязкому безинерционному пути, имеющему симметричные неровности в виде косинусоиды на обеих рельсовых нитях. Одноточный локомотив моделируется двухмассовой системой, состоящей из подрессоренной (кузов) и неподрессоренной (тележки) масс. Трение в рессорном подвешивании локомотива принято вязким.

Совместные колебания нагрузки и пролетного строения описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных при $0 \leq \varepsilon = v t \leq l$

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{y}_1(t) + F(u, \dot{u}) &= M_1 g \\ M_0 \ddot{y}_0(t) - F(u, \dot{u}) + S(v, \dot{v}) &= M_0 g; \\ L_z &= S(v, \dot{v}) \delta(x - \varepsilon) \end{aligned} \quad (12)$$

Квазиупругие члены имеют вид:

$$\begin{aligned} F(u, \dot{u}) &= \beta_1 [\dot{y}_1(t) - \dot{y}_0(t)] + c_1 [y_1(t) - y_0(t)]; \\ S(v, \dot{v}) &= (C_1 + C_2 \cos \omega_1 t) [y_0(t) - z(\varepsilon, t) - 0.5 a_0 (1 - \cos \omega_1 t)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Дифференциальный оператор L_z для пролетного строения

$$L_z = E J \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \mu E J \frac{\partial^5 z}{\partial t \partial x^4} + m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad (14)$$

В (12)-(14) приняты следующие обозначения: EJ - изгибная жесткость основного пролетного строения; M_1 - подрессоренная масса локомотива; M_0 - неподрессоренная масса локомотива; m - погонная масса пролетного строения;

C_1 - эквивалентная жесткость рессорного подвешивания локомотива; β_1 - эквивалентный коэффициент трения в рессорном подвешивании локомотива; μ - коэффициент трения для материала пролетного строения; ω_1 - частота расположения поперечных балок; ω_n - частота неровностей пути;

C_1 - средняя жесткость проезжей части; C_2 - амплитуда

изменения жесткости проезжей части ; $\delta(x-\xi)$ - импульсная функция первого порядка .

Для вывода системы дифференциальных уравнений движения в обыкновенных производных использован метод Бубнова-Галеркина в первом приближении .

Решения уравнений движения получены путем моделирования процессов на трех АРМ типа МН-7, соединенных последовательно. Процесс был замедлен в 20 раз .

Исследовалось влияние следующих факторов на вертикальные колебания системы «пролетное строение - локомотив» длины (частоты) и высоты неровностей рельсового пути; скорости движения нагрузки ; жесткости проезжей части ; «балочного эффекта»; начальных условий для нагрузки; взаимодействия нагрузки и пролетного строения .

Установлено, что по мере приближения частоты неровностей пути к одной из собственных частот вертикальных колебаний системы «основное пролетное строение - локомотив», динамический коэффициент для прогибов основного пролетного строения значительно возрастает .

При незначительной скорости движения нагрузки (до 20 м/сек) высота неровностей пути незначительно влияет на динамический коэффициент для прогиба основного пролетного строения. При дальнейшем увеличении скорости движения нагрузки динамический коэффициент возрастает с увеличением неровностей пути тем значительно, чем больше скорость движения .

Изменение жесткости проезжей части в довольно широком диапазоне приводит к незначительному изменению динамического коэффициента для прогиба пролетного строения в связи с тем, что вклад жесткости пути в общую жесткость системы невелик .

Учет „балочного эффекта" приводит к значительному увеличению (до 12 %) динамического коэффициента лишь в зоне низшего резонанса, соответствующего частоте изменения жесткости подраельсового основания, вызываемого „балочным эффектом"

Начальные условия тележки экипажа незначительно влияют на максимальные динамические прогибы основного пролетного строения.

При реальных амплитудах колебаний кузова локомотива в пределах 20 мм от положения статического равновесия даже при скорости движения нагрузки в 100 м/сек разность в начальных перемещениях кузова в 40 и 60 мм не превышает 10 % . Тот факт, что начальные условия поддрессированной нагрузки незначительно влияют на максимальные перемещения середины пролетного строения, особенно при небольших скоростях движения нагрузки, объясняется высокой демпфирующей способностью системы. При высоких скоростях движения нагрузки колебания не успевают затухнуть и роль начальных условий становится более заметной.

Для системы „основное пролетное строение - локомотив" решение задачи производилось как с учетом взаимодействия нагрузки и пролетного строения, так и без учета его. Динамический коэффициент для прогибов основного пролетного строения при учете воздействия подвижной нагрузки всегда выше, чем при учете взаимодействия подвижной нагрузки и пролетного строения. Объясняется это тем, что источник возмущения имеет конечную мощность и при взаимодействии локомотива с основным пролетным строением наблюдается, повидимому, явление, сходное с эффектом Зоммерфельда. С ростом скорости движения нагрузки прогибы пролетного строения как с учетом воздействия нагруз-

ки, так и при учете взаимодействия нагрузки и пролетного строения приближаются друг к другу. Это обстоятельство позволяет в зонах, удаленных от резонансных, не учитывать взаимодействия нагрузки и пролетного строения, что приводит к значительным упрощениям системы уравнений. Необходимо также отметить, что динамические прогибы пролетного строения при воздействии являются верхней границей для уточненного решения (с учетом взаимодействия подвижной нагрузки и пролетного строения).

При исследовании взаимодействия движущегося поезда с основным пролетным строением в вертикальной плоскости для пролетного строения вводятся те же допущения, что и при рассмотрении колебаний системы «основное пролетное строение — локомотив». Поезд моделируется системой подвижных единиц с четырьмя степенями свободы каждая. Такая модель учитывает вертикальные колебания подрессоренных и непрессоренных масс (подпрыгивание и галопирование). Также предполагается, что на колебания экипажа не влияют колебания смежных экипажей.

Для вывода дифференциальных уравнений движения использован метод Бубнова-Галеркина. Решения уравнений получены путем численного интегрирования на ЭЦМ «Наири-2».

В качестве подвижной нагрузки выбраны сплочки из I2 секций электровоза ВЛ-8 в связи с тем, что такая нагрузка более близка к нагрузкам, предусмотренным действующими нормативными документами.

При рассмотрении колебаний системы «пролетное строение — поезд» исследовалось влияние следующих факторов скорости движения нагрузки: жесткости проезжей части; «балочного эффекта», начальных условий для кузова экипажа.

Влияние скорости движения нагрузки, жесткости проезжей

части и «балочного эффекта» на колебания системы «основное пролетное строение - поезд» аналогично их влиянию на колебания системы «основное пролетное строение - локомотив».

Несмотря на то, что задача о влиянии начальных перемещений подрессоренных масс (кузовов) подвижных единиц при входе их на пролетное строение носит статистический характер, возможно численно оценить влияние начальных условий кузова. Предполагается, что в начальный момент времени t_0 , соответствующий входу первой оси на пролетное строение, перемещения кузовов всех подвижных единиц одинаковы. Таким образом перемещение различных кузовов экипажей при входе на пролетное строение различное. Установлено, что начальные условия подрессоренных масс оказывают меньшее влияние на максимальные динамические прогибы системы «пролетное строение - поезд», чем на максимальные динамические прогибы системы «пролетное строение - локомотив». Это обстоятельство объясняется тем, что в системе «пролетное строение - поезд» благодаря наличию сдвигов фаз, динамическое воздействие, вызванное начальными перемещениями и скоростями отдельных экипажей, осредняется.

При исследовании взаимодействия движущегося поезда с фермой жесткости для нагрузки принята та же модель, что и для системы «основное пролетное строение - поезд». Ферма жесткости заменена динамически эквивалентной неразрезной балкой с упругими промежуточными опорами в местах постановки подвесок. Предполагается также, что нагрузка движется с постоянной скоростью по упруго-вязкому безэнергичному пути; масса фермы жесткости и железнодорожной проезжей части равномерно распределена по длине пролета; изгибная жесткость фермы жесткости - постоянная по длине пролета; трение в системе - вязкое.

После замены промежуточных опор их реакциями и представления перемещений оси фермы жесткости в виде тригонометрического ряда для вывода дифференциальных уравнений движения использовали метод Бубнова-Галеркина .

Решения системы уравнений получены путем численного интегрирования на ЭЦММ „Напри-2” .

Предварительно рассматривались колебания упрощенной системы „ферма жесткости - локомотив” с учетом 48, 24, I4 и I2 членов ряда в разложении перемещений оси фермы жесткости . Оказалось, что для получения решения в зоне наибольших прогибов фермы жесткости с погрешностью до 5 % можно учитывать (для системы, рассматриваемой в качестве примера) I4 членов ряда, резко сокращая, тем самым, время счета на ЭЦММ .

В дальнейших исследованиях вертикальных колебаний системы „ферма жесткости - поезд” учитывалось I4 членов ряда в разложении перемещений оси фермы жесткости .

Рассмотрено влияние жесткости пути, начальных условий для кузовов экипажей и скорости движения нагрузки на колебания системы .

При изменении жесткости пути прогиб фермы жесткости изменяется незначительно .

Для рассматриваемой системы также принято, что в начальный момент времени t_0 , соответствующий моменту входа первой оси на ферму жесткости, перемещения кузовов всех экипажей одинаковы . Естественно, что каждый экипаж входит на ферму жесткости со своими перемещениями, отличными от перемещений других экипажей .

Установлено, что максимальный прогиб фермы жесткости изменяется в зависимости от начальных перемещений кузовов

нагрузки (6 % при скорости 90-100 м/сек для системы, рассматриваемой в качестве примера). С уменьшением скорости движения роль начальных условий подвижной нагрузки уменьшается, поскольку колебания, вызванные начальными возмущениями системы, успевают затухнуть. При скорости движения нагрузки 80 м/сек максимальный прогиб фермы жесткости изменяется лишь на 2,5 % по отношению к прогибу, получаемому при перемещении кузова, равному статическому прогибу рессор. Это обстоятельство позволяет для системы «ферма жесткости - поезд» не учитывать начальные условия нагрузки при скорости движения ее до 80 м/сек. График зависимости максимального прогиба фермы жесткости от скорости движущейся нагрузки аналогичен хорошо известным из литературы графикам зависимости прогибов однопролетной балки с шарнирным опиранием концов от скорости движения нагрузки.

Рассматривались также совместные нестационарные колебания основного пролетного строения и обладающей массой поддрессоренной полуполосы. Полуполоса имеет не только поддрессоренные, но и неподдрессоренные массы. Кроме того, учитывается трение в рессорном подвешивании. Предполагается, что полуполоса абсолютно гибкая, а поддрессирование - равномерное. Поддрессоренные массы полуполосы моделируют массы кузовов, а неподдрессоренные - массы тележек подвижных единиц. Трение в рессорном подвешивании принято вязким. Пролетное строение заменено динамически эквивалентной балкой.

Взаимодействие нагрузки в виде полуполосы с основным пролетным строением рассматривалось для следующих случаев надвига полуполосы («первый период»); полное загрузе-
ние пролетного строения и сход полуполосы.

Совместные колебания пролетного строения и нагрузки для всех рассмотренных случаев описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + c_1 (y - z) + \beta_1 \left(\frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} \right) &= 0 \\ E J \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \mu E J \frac{\partial^5 z}{\partial t \partial x^4} &= f(x, t) \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение для $f(x, t)$ изменяется в зависимости от рассматриваемого случая загрузки.

В (15) приняты следующие обозначения: m_1 - погонная масса подрессоренной нагрузки; m - погонная масса пролетного строения; c_1 - погонная жесткость рессорного подвешивания; β_1 - коэффициент трения в рессорном подвешивании; EJ - изгибная жесткость пролетного строения; μ - коэффициент трения для материала пролетного строения.

Ограничиваясь одним членом ряда, перемещение от пролетного строения принимается в зависимости от обобщенной координаты $q(t)$ в виде

$$z(x, t) = q(t) \sin \frac{\pi x}{l}$$

а изогнутая ось подрессоренной нагрузки - в виде

$$y(x, t) = a \sin \frac{\omega x}{v} + b \cos \frac{\omega x}{v} + p(t) \sin \frac{\pi x}{l}$$

где a, b - постоянные, учитывающие начальные возмущения нагрузки при входе ее на пролетное строение; v - скорость движения нагрузки; l - расчетный пролет пролетного строения; $\omega = \frac{c_1}{m_1}$

Для вывода дифференциальных уравнений движения в обобщенных производных использовали метод Бубнова-Галеркина в первом приближении .

Решения уравнений получены путем численного интегрирования на ЭПМ "Напри-2" при скорости движения нагрузки от 5 м/сек до 150 м/сек . Кроме того, с целью выяснения начальных условий для нагрузки решения получены для трех состояний элементов полосы при входе ее на пролетное строение : невозмущенная полуполоса ($\alpha = 0$, $\beta = 0$) ; элементы полуполосы имеют сжатые рессоры ($\alpha = 2,5$ см, $\beta = 0$) ; элементы полуполосы имеют растянутые рессоры ($\alpha = -2,5$ см, $\beta = 0$) .

Из анализа динамических процессов, возникающих при загрузке пролетного строения движущейся нагрузкой («первый период») установлено, что графики прогибов пролетного строения представляют собой гладкие кривые и аналогичны графикам, полученным ранее А.Б.Моргаевским для системы «пролетное строение - неподрессоренная полуполоса» .

Максимальные динамические прогибы пролетного строения при скорости движения полуполосы до 100 м/сек получены, как правило, в «первом периоде» .

После достижения нагрузкой правой опоры начинается «второй период» . Под «вторым периодом» следует понимать отрезок времени, соответствующий последующему полному загрузке пролетного строения . Естественно, что рассмотрение колебаний системы «пролетное строение - нагрузка» при полном загрузке пролетного строения должно производиться с учетом скорости и перемещения, которые система получила в конце «первого периода» .

При скорости движения полуполосы от 100 м/сек до 150 м/сек максимальные динамические прогибы пролетного строения получены как в "первом", так и во "втором" периодах. Во "втором периоде" колебания устанавливаются не вокруг положения равновесия, определяемого статическим прогибом пролетного строения при загрузении его равномерно распределенной нагрузкой, а вокруг нового положения, определяемого весом нагрузки и центробежной силой. Следует также отметить, что после полного загрузения пролетного строения колебания происходят с частотой собственных колебаний системы. По истечении некоторого времени устанавливается квазистатический режим.

Представляет также интерес выяснения роли начальных условий для нагрузки. При этом предполагается, что все элементы полуполосы в момент входа их на пролетное строение имеют одинаковые начальные условия.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что роль начальных условий для нагрузки в системе "пролетное строение - полуполоса" невелика. Такой же результат был получен ранее для близкой системы В.П. Орленко.

В третьей главе рассматриваются стационарные колебания системы "балочное пролетное строение - подвижная нагрузка" и делается попытка на основе экспериментальных данных о поведении подвижных нагрузок на участках пути предсказать динамические прогибы пролетных строений при проходе по ним нагрузки.

При обработке осциллограмм, полученных в 1971 году отраслевой научно-исследовательской лабораторией динамики мостов совместно с лабораторией динамики и прочности подвижного состава ДИИТа при экспериментальных исследованиях взаимно -

действия пролетных строений и грузового подвижного состава замечено, что поведение подвижного состава при движении его по пролетным строениям с расчетными пролетами 23, 55 и 127 x 2 м несущественно отличается от движения его по пути.

Колебательные процессы, зарегистрированные при движении экипажа по различным участкам перегона, представляют собой наложение друг на друга колебаний с различными частотами и помех в виде шума. Они возникают в результате кинематического возмущения экипажа неровностями пути. При теоретических исследованиях взаимодействия пути и экипажей, а также пролетных строений и железнодорожной нагрузки в целях упрощения задачи неровности пути аппроксимируют аналитической функцией. Обычно эти неровности принимают симметричными для обеих рельсовых нитей. Для реального железнодорожного полотна неровности его являются не детерминированными, а случайными. В связи с этим реализация колебательных процессов при движении экипажей по различным участкам перегона рассматривались как случайные процессы, имеющие гармонические составляющие со случайными амплитудами и фазами. Предполагается, что рассматриваемые динамические процессы стационарны в смысле А.Я.Хинчина.

Проведенный спектральный анализ подтвердил, что частотные спектры динамических процессов при движении полувагона по различным участкам перегона одинаковы.

Сравнение реализации ускорений кузова полувагона в вертикальной плоскости и определение спектральных плотностей динамических процессов, возникающих при движении экипажа по пути, проводилось в интервале скоростей от 53,5 до 101 км/час.

Также произведено сравнение жесткостей различных частей пути. Установлено, что жесткости рельсового пути на дере-

янных шпалах и жесткости металлических пролетных строений с учетом мостового полотна отличаются несущественно. Жесткость пути, оказывая влияние на колебания тележек экипажей, несущественно влияет на колебания кузовов. Между тем, колебания тележек экипажей оказывают весьма незначительное влияние на колебания пролетных строений.

Тот факт, что реализации вертикальных ускорений кузова полувагона при движении поезда по пути и по мостам качественно подобны, частотные спектры процессов одинаковы и жесткости пути и пролетных строений практически совпадают, позволяет предположить, что амплитуда вертикальных колебаний кузовов экипажей при движении их по пути и по пролетным строениям в среднем одинаковы. В таком случае, зная вероятностные реализации деформаций рессор при движении экипажа по рельсовому пути, нетрудно теоретически получить вероятностную реализацию динамических прогибов пролетных строений при движении по ним этих нагрузок.

Для проверки этого положения исследовались стационарные колебания системы «балочное пролетное строение - нагрузка». Железнодорожная нагрузка представлена в виде движущейся с постоянной скоростью абсолютно гибкой равномерно распределенной и равномерно подрессоренной полосы.

Пролетное строение заменено динамически эквивалентной балкой постоянного поперечного сечения.

Колебания нагрузки и пролетного строения описываются следующей системой дифференциальных уравнений при

$$0 \leq x \leq l$$

НТБ
ДНУЖТ

$$\begin{aligned}
 m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + K (y_1 - y_2) + \beta \left(\frac{\partial y_1}{\partial t} - \frac{\partial y_2}{\partial t} \right) &= F_1(t); \\
 E \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} - K (y_1 - y_2) - \beta \left(\frac{\partial y_1}{\partial t} - \frac{\partial y_2}{\partial t} \right) + & \quad (16) \\
 + \mu \frac{\partial y_2}{\partial t} + m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} &= F_2(t)
 \end{aligned}$$

где m_1 - погонная масса подрессоренной нагрузки ; m_2 - погонная масса пролетного строения с учетом массы неподрессоренной нагрузки ; K - погонная жесткость рессорного подвешивания ; β - коэффициент трения в рессорном подвешивании ; μ - интенсивность сил вязкого трения на единицу длины пролетного строения ; $F_1(t)$ - периодическая сила, действующая на подрессоренную нагрузку и пролетное строение в результате кинематического возмущения неровностями пути ;

$$F_2(t) = -F_1(t).$$

В связи с тем, что неровности пути при движении нагрузки оказывают незначительное влияние на колебания пролетного строения, принято $F_2(t) = 0$

Представляя перемещения оси пролетного строения в виде тригонометрического ряда и применяя метод Бубнова-Галеркина в первом приближении получим систему дифференциальных уравнений движения в обыкновенных производных .

Полученная система уравнений решена методом комплексных амплитуд .

Представляя колебания кузова экипажа как сумму гармонических колебаний с кратными частотами ω_n и соответствующими им амплитудами M_n и фазами φ_n , решение для середины пролетного строения записывается в виде

НТБ
ДНУЖТ

$$q = \sum_n \frac{\sqrt{\sigma_{1n}^2 + \sigma_{2n}^2}}{\sigma_{3n}} M_n \cos(\omega_n t - \varphi_n - \psi_n), \quad (17)$$

где

$$\psi_n = \operatorname{arctg} \frac{\sigma_{2n}}{\sigma_{1n}}$$

$$\sigma_{1n} = -\frac{\pi}{4} \left\{ K [K + m_2 (\theta^2 - \omega_n^2)] + \beta \omega_n^2 (\beta + \mu) \right\};$$

$$\sigma_{2n} = \frac{\pi}{4} \omega_n [\mu K - \beta m_2 (\theta^2 - \omega_n^2)]; \quad \theta^2 = \frac{\pi^4 E}{\rho^4 m};$$

$$\sigma_{3n} = \frac{\pi^2}{16} \left\{ [K + m_2 (\theta^2 - \omega_n^2)]^2 + \omega_n^2 (\beta + \mu)^2 \right\}$$

Вычисленные по формуле (17) теоретические реализации поведения середины испытанного пролётного строения при движении по нему нагрузки с различной скоростью сравнивались с экспериментальными. При этих расчетах реализации деформаций рессорного подвешивания кузова экипажа и динамических прогибов пролётного строения были взяты для одних и тех же заездов испытательного поезда.

Сравнение теоретических и экспериментальных реализаций показало, что они удовлетворительно совпадают на значительном участке полного загрузки пролётного строения подвижной нагрузкой.

Изложенный подход позволяет в упрощенной постановке оценивать динамическое воздействие любых подвижных нагрузок на пролётные строения балочных мостов по известным реализациям деформаций рессорного подвешивания этих нагрузок на участках пути.

Применение этого подхода для оценки динамического воз-

действия четырехосных полувагонов на пролетные строения с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью показало, что при увеличении скорости движения расчетной нагрузки до 100 км/час следует ожидать увеличения динамического коэффициента для прогиба пролетного строения до значения, близкого к нормативному .

В четвертой главе рассмотрены методика и результаты экспериментальных исследований динамических характеристик пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью .

Натурные испытания двух пролетных строений проведены в период 1967-1972 г отраслевой научно-исследовательской лабораторией динамики мостов ДИИТа с участием автора .

Программой испытаний предусматривалось определение частот, форм и декрементов свободных пространственных колебаний ; определение частот и форм пространственных колебаний пролетных строений ; проверка наличия неупругих связей в конструкции .

В качестве испытательной нагрузки использовались различные проходящие поезда и одиночные локомотивы .

При испытаниях измерялись прогибы ферм пролетного строения в середине и в четвертях, напряжения в поясах главных ферм основного пролетного строения и ферм жесткости, горизонтальные и вертикальные перемещения основного пролетного строения в уровнях нижних и верхних поясов, горизонтальные и вертикальные ускорения основного и подвесного (фермы жесткости) пролетных строений в середине и в четвертях и некоторые другие величины .

Прогибы пролетного строения измерялись с помощью электри-

ческих прогибомеров с динамометром и проволоочной связью. Для измерения напряжений в элементах пролетного строения применены тензорезисторы, из которых собирались измерительные полумосты. Амплитуды горизонтальных и вертикальных колебаний пролетного строения измерялись вибродатчиками.

Испытания проведены с применением современной тензометрической аппаратуры с записью процессов на ленту шлейфового осциллографа. Для каждого пролетного строения было проведено свыше 200 опытов при скорости движения нагрузки до 70 км/час.

Установлено, что полученные на основании статистической обработки экспериментальных данных динамические коэффициенты при различных вероятностях для напряжений в поясах главных ферм основных пролетных строений и ферм жесткости от проходящих поездов при скорости движения в пределах 15-45 км/час значительно ниже, чем предусмотренные действующими нормативными документами.

Для определения частот и форм колебаний пролетных строений применен гармонический и спектральный анализы.

Гармонический анализ позволил представить реализацию многочастотного процесса пространственных колебаний пролетных строений в виде суммы гармонических колебаний с кратными частотами и соответствующими им амплитудами и фазами. Для построения форм пространственных колебаний пролетных строений рассмотрены колебания с гармониками ω_n , выделяющимися на графиках линейчатых спектров.

Для пролетных строений получено по три формы свободных пространственных колебаний с низшими частотами, т.е. соответствующих горизонтальным синфазным, антифазным и вертикальным синфазным колебаниям. Эти формы подобны теоретическим.

Поскольку при гармоническом анализе получены лишь зоны частот собственных колебаний, с целью уточнения их производился спектральный анализ. Кроме того, спектральный анализ применялся и для исследования реализаций ускорений пролетных строений с целью определения более высоких частот колебаний как самих пролетных строений, так и отдельных его элементов.

В процессе экспериментальных исследований также установлено, что при свободных колебаниях пролетных строений неупругие связи в конструкции (отрыв подвесок от площадок опираний) отсутствуют.

Анализ результатов, проведенных в таблице 3, свидетельствует об удовлетворительном совпадении частот собственных колебаний пролетных строений.

Результаты экспериментальных исследований указывают на то, что предложенные расчетные схемы и примененные подходы для определения частот и форм пространственных колебаний пролетных строений с вертикально-подъемной проезжей частью удовлетворительно отражают действительную работу конструкций.

В ы в о д ы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования свободных пространственных колебаний пролетных строений разводных мостов с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью и взаимодействия подвижной нагрузки с пролетными строениями в вертикальной плоскости позволяют сделать следующие выводы

I. Для определения частот и форм свободных пространственных колебаний пролетных строений рассмотрены колебания систем с распределенными параметрами (метод перемещений) и с

дискретными массами (метод сил) .Результаты,полученные обоими способами,близки и удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными,Однако,процесс определения частот и форм колебаний пролетного строения как системы с распределенными параметрами значительно проще.Между тем,при использовании для определения частот и форм колебаний ЭВМ с малым объемом оперативной памяти целесообразно пролетное строение моделировать системой с дискретными массами .

Анализ характеристического определителя для такой модели позволил выявить возможные упрощения,в результате чего получены приближенные формулы для определения частот горизонтальных и вертикальных колебаний .

2.При исследовании динамических процессов,возникающих в системе „пролетное строение – нагрузка“,схемы поездов представлялись в виде схемы подвижных единиц с двумя и четырьмя степенями свободы.Кроме того,железнодорожная нагрузка моделировалась также подрессоренной полуполосой .

Было исследовано влияние некоторых факторов на колебания системы „пролетное строение – нагрузка“ .Установлено,что на колебания системы основное влияние оказывает скорость движения нагрузки, длина неровностей пути (в случае приближения частоты неровностей пути к одной из собственных частот системы) и „балочный эффект" (лишь в зоне низшего резонанса,соответствующего частоте изменения жесткости подрельсового основания).

Благодаря высокой демпфирующей способности системы „пролетное строение – нагрузка“ начальные условия подрессоренных и неподдресоренных нагрузок оказывают незначительное влияние на максимальные перемещения основных пролетных строений

и ферм жесткости при любой модели железнодорожной нагрузки. На колебания пролетных строений оказывает незначительное влияние и жесткость подрельсового основания .

Динамические прогибы пролетных строений при учете воздействия являются верхней границей для решений, полученных с учетом взаимодействия нагрузки и пролетного строения. Это обстоятельство позволяет в зонах, удаленных от резонансных, не учитывать взаимодействия нагрузки и пролетных строений, что приводит к значительным упрощениям исходных систем уравнений движения.

Наиболее близкие к экспериментальным результаты получены для схемы поезда, моделируемого системой подвижных единиц с четырьмя степенями свободы каждая. При моделировании железнодорожной нагрузки подрессоренной полуполосой получены удовлетворительные результаты для процессов, возникающих в системе после заполнения нагрузкой всего пролета (эта стадия загрузки представляет наибольший интерес для практических приложений).

3. Наиболее важными для практики являются стационарные колебания системы «пролетные строения - нагрузка» . Сравнение поведения железнодорожных экипажей на участках пути и на мостах показало, что оно в среднем одинаково. Объясняется это тем, что жесткости пути и металлических пролетных строений близки по величинам .

Базирующийся на этом подход для рассмотрения стационарных колебаний системы «пролетное строение - нагрузка» дает возможность в упрощенной постановке оценивать динамическое воздействие любых подвижных железнодорожных нагрузок на пролетные строения по известным реализациям поведения этих на-

рузок на участках пути. Для осваиваемых видов нагрузок эти реализации могут быть получены при проведении ходовых испытаний экипажей .

4.Вероятностные значения динамических коэффициентов для поясов главных ферм основных пролетных строений и для элементов ферм жесткости исследованных пролетных строений при скорости движения поездов до 45 км/час, значительно ниже, чем предусмотренные СН 200-62 .

5.Использованные в настоящих исследованиях подходы и расчетные схемы пригодны и при рассмотрении динамической работы пролетных строений других систем и видов .

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях

- 1.Борщов В.И.,Черевацкий Б.П. Свободные пространственные колебания совмещенных пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью. Материалы юбилейной научно-технической конференции института.Днепропетровск, ДИИТ, 1970 .
- 2.Борщов В.И.,Черевацкий Б.П.Свободные колебания пролетного строения, несущего башню подъемного пролета.Материалы юбилейной научно-технической конференции института.Днепропетровск, ДИИТ, 1970 .
- 3.Черевацкий Б.П.,Борщов В.И. Исследование свободных колебаний совмещенных пролетных строений.Труды ДИИТа, вып. 127. Днепропетровск, 1972 ,
- 4.Черевацкий Б.П.,Борщов В.И. Исследование взаимодействия движущегося локомотива с основным пролетным строением разводных мостов с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью.Труды ДИИТа, вып. 144.Днепропетровск, 1972 .

5. Черевачкий Б.П., Борцов В.И. Вертикальные свободные колебания пролетных строений с вертикально-подъемной железнодорожной проезжей частью. Труды ДИИТа, вып. 144. Днепропетровск, 1972 .

Кроме того, результаты исследований докладывались на заседании кафедры "Мосты" и НИЛ динамики мостов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта в период 1969-1973 г.г., а также на юбилейной конференции ДИИТа, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Ленина в 1970 г. и на научно-технической конференции института, посвященной 50-летию образования СССР в 1972 г.

В полном объеме диссертация доложена на заседании кафедры "Мосты" в мае 1973 года .

НТБ
ДНУЖТ

Областная книжная типография Днепропетровского областного управления
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Днепропетровск, ул. Серова, 7.

БТ 23559 Зак. № 363—200 экз. Об. 2 п. л. Подписано к печати 25.VII.73 г

Сканировала Юнаковская В. В.