

С С С Р — М И С

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
имени М. И. КАЛИНИНА

*На правах рукописи*

Инженер ГАЛУШКО Владимир Григорьевич

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ  
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ БАЛОЧНЫХ ВИАДУКОВ**

(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

1976

**НТБ  
ДНУЖТ**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1. Актуальность работ. Выполнение народнохозяйственных планов и использование богатейших сырьевых ресурсов нашей страны требует широкого развития железнодорожного транспорта. В "Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 годы" ставится задача дальнейшего развития и технического оснащения транспорта путем внедрения новейших транспортных средств, увеличения грузонапряженности и мощности подвижного состава, а также расширения транспортно-строительного строительства, в первую очередь во вновь осваиваемых районах Севера, Сибири и Дальнего Востока, намечается дальнейшее увеличение пропускной и провозной способности железных дорог за счет повышения скоростей движения грузовых и пассажирских поездов и увеличения среднего веса грузовых поездов.

На строящихся новых железных дорогах и вторых путях сооружается большое число мостов различных систем. Преимущественное место среди них займут балочные мосты и виадуки.

В настоящее время сооружается в восточных районах с сильно пересеченной местностью крупнейшая железнодорожная линия страны - Байкало-Амурская магистраль, где предполагается строительство большого числа искусственных сооружений, в том числе и виадуков.

Перекрытие пролетов виадуков осуществляется металлическими, сталежелезобетонными, а также железобетонными балочными пролетными строениями.

Опоры сооружаются, как правило, оборными либо оборно-монолитными ступенчатого типа и прямоугольного очертания в плане. Высота таких опор достигает 50-60 метров и выше.

Отличительной особенностью виадуков перед другими мостами является их значительная высота.

В связи с широким размахом железнодорожного строительства, введением на железнодорожном транспорте высоких скоростей движения и новых типов подвижного состава, вопрос исследования динамической работы высоких виадуков приобретает особую актуальность.

2. Цель работы. Настоящая работа посвящена изучению свободных и вынужденных горизонтальных колебаний высоких железнодорожных виадуков как единой системы. Исследования динамической работы проводилось в двух направлениях: теоретическом и экспериментальном.

3. Общая методика исследования. При определении частот и форм свободных горизонтальных колебаний виадуков, незатянутых и заг-

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА  
Дніпропетровського національного  
університету залізничного транспорту  
імені академіка В.Лазаряна

НТ  
ДНУЖТ

29889  
6486a

руженных нагрузкой подвижного состава, представленных шарнирной цепью с упругими звеньями на упругих опорах и дискретным расположением масс, дифференциальные уравнения колебаний системы составлены с использованием принципа Даламбера на основании метода сил. Частотное уравнение для данной расчетной схемы в случае отсутствия нагрузки на мосту получено на основании метода перемещений; для определения динамических реакций использован метод начальных параметров проф. Н. И. Безухова.

Этот метод был использован при выводе уравнения частот для виадуков, представленных неразрезной балкой на упругих опорах с дискретным расположением масс.

Определение частот свободных колебаний ступенчатых опор при небольшом числе ступеней проводилось методом спектральной функции проф. С. А. Бернштейна.

Дифференциальные уравнения колебаний виадуков, расположенных на кривой, получены с использованием уравнений равновесия Кирхгофа. Разделение переменных в уравнениях произведено с использованием метода Фурье.

Исследование вынужденных колебаний виадуков при движении по ним одиночных локомотивов и вагонной нагрузки приводит к дифференциальным уравнениям в частных производных. Для решения задачи использован метод обобщенных координат. Решение для прогиба отыскивается в виде ряда по фундаментальным функциям.

Определение обобщенных координат производится с помощью уравнений Лагранжа второго рода. Рассмотрение задачи о движении одиночного локомотива, обладающего массой, по весоному виадуку приводит к дифференциальным уравнениям с периодическими коэффициентами, решение которых проводилось численным методом Рунге-Кутты на ЭЦМ.

Для определения горизонтальных возмущающих сил при движении вагонной нагрузки по мосту использовалась методика вероятностного подхода, разработанная проф. Г. Н. Яковлевым.

Аналитические решения дифференциальных уравнений по определению амплитуд горизонтальных перемещений виадуков были реализованы на ЭЦМ "Наири-2".

Анализ экспериментальных данных показал, что зависимость полученных амплитуд горизонтальных перемещений носит не функциональный, а случайный характер, поэтому произведена статистическая обработка экспериментальных данных как олучайных величин.

НТБ  
ДНУЖТ

**Научная новизна.** Рассмотрены свободные горизонтальные колебания виадуков на прямой без нагрузки и с нагрузкой подвижного состава, представленных различными расчетными схемами /шарнирная цепь на упругих опорах с упругими звеньями, неравнорная балка на упругих опорах с дополнительными массами в местах упругих опор и балка на оплошном упругом основании/, и выбрана из них наиболее приемлемая с точки зрения простоты и точности вычислений. Для этих же расчетных схем произведен анализ влияния на частоты свободных горизонтальных колебаний различных характеристик системы /высоты опор, количества пролетов, длин пролетных строений, податливости основания опор, инерции вращения пролетных строений, скорости движения и рода нагрузки/.

Рассмотрены свободные горизонтальные колебания виадуков, расположенных на кривой, как без нагрузки, так и с нагрузкой подвижного состава и произведен анализ влияния на частоты величины радиуса кривой и других факторов.

Получено решение задачи о вынужденных колебаниях виадуков при нестационарном и стационарном режимах.

При исследовании свободных и вынужденных колебаниях виадук впервые рассматривалась не как балка на двух опорах, а в целом, как единая многопролетная система.

**Практическая ценность.** Разработана методика определения частот и форм свободных горизонтальных колебаний виадуков, расположенных на прямой и кривой. Получены выражения для определения частот свободных горизонтальных колебаний вышеуказанных систем, позволяющие просто и достаточно точно определить частоты горизонтальных колебаний и произвести анализ влияния на частоты различных факторов системы. Разработана методика определения амплитуд горизонтальных колебаний виадуков при движении одиночных локомотивов и вагонной нагрузки.

Разработаны алгоритмы реализации решений дифференциальных уравнений колебаний систем на ЭЦМ "Наири-2", позволяющие определить максимальные ожидаемые амплитуды вынужденных колебаний виадуков.

Предложены критерии для оценки периодов свободных горизонтальных колебаний и амплитуд вынужденных горизонтальных колебаний с точки зрения обеспечения безопасности движения поездов и прочности опор.

Разработанные методики, формулы для определения частот и амплитуд горизонтальных колебаний виадуков и предлагаемые критерии могут быть использованы различными проектными и научно-исследовательскими организациями при проектировании виадуков, а также организациями, эксплуатирующими подобные сооружения.

НТБ  
ДНУЖТ

Апробация и внедрение результатов работы. Диссертационная работа и отдельные ее разделы докладывались на заседании семинара кафедры мостов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта с 1972 по 1975 гг.; на юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, ноябрь 1972 г.; в полном объеме диссертационная работа была доложена на заседании кафедры мостов в НИЛ динамики мостов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, декабрь 1975 г.

Внедрение результатов исследований работы высоких виадуков на горизонтальные нагрузки на Львовской железной дороге позволило получить существенный экономический эффект.

Основные результаты диссертационной работы использованы в двух научно-технических отчетах НИЛ динамики мостов ДИИТа по исследованию динамической работы высоких железнодорожных виадуков, включены в план внедрения научно-исследовательских работ МПС. Внедрение осуществляется в ЦП МПС.

Объем работы. Диссертация включает введение, шесть глав, выводы, список использованной литературы из 153 наименований, четыре приложения, 85 рисунков и содержит 188 страниц машинописного текста.

#### Основные положения работы

В последнее время появилось большое число публикаций, исследующих динамическую работу балочных пролетных строений мостов. Сюда следует отнести работы В.В.Брлотина, Н.Г.Бондаря, А.Б.Моргаевского, А.П.Филиппова, Ю.Г.Козьмина, С.И.Конашенко, В.П.Орленко, К.Е.Китаева, И.И.Казея, Г.П.Бурчака, Ю.М.Майзеля и многих других авторов. Среди зарубежных исследователей следует отметить работы Л.Фрибы и В.Колушека.

Если вопросу исследования колебаний в вертикальной плоскости посвящено значительное количество работ, то подобных работ по горизонтальным колебаниям значительно меньше.

К наиболее ранним работам в области горизонтальных колебаний железнодорожных мостов следует отнести работы Е.О.Патона, С.А.Бернштейна, Е.Е.Гибшмана, В.А.Гастева.

К работам более позднего периода в области исследования железнодорожных мостов на горизонтальные нагрузки следует отнести работы А.Б.Моргаевского, С.С.Норейко, Б.Ф.Лесохина, С.М.Мулина, И.П.Толкачевой.

Большая работа по исследованию динамической работы мостов ведется в ДИИТе. Среди работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям горизонтальных колебаний мостов, нужно

ДНУЖТ

отметить работы Н.Г.Бондаря, Г.Н.Яковлева, В.П.Орленко, В.П.Тара-  
сенко, Э.Г.Ройтбурда, Д.К.Запорожца и др.

Большинство исследований, в основном, посвящено изучению ди-  
намических характеристик пролетных строений в предположении, что  
опоры являются абсолютно жесткими и не участвуют в колебаниях. Ана-  
лиз совместных колебаний опор и пролетных строений встречается зна-  
чительно реже. Здесь можно назвать работы Г.К.Гольста, А.Ф.Смирно-  
ва, К.К.Якобсона и В.С.Усольцева. Частично вопрос взаимодействия  
опор и пролетных строений освещен у В.Колоушека.

Среди теоретических работ, посвященных исследованию упругости  
опор, следует отметить работы В.Г.Чудновского, Ю.Г.Козьмина, А.Г.Бар-  
ченко, К.И.Солдатова, С.А.Добродеева и др.

Результаты экспериментальных исследований о влиянии промежуточ-  
ных гибких опор на работу сооружения приводятся в трудах Г.Н.Карци-  
вадзе и К.И.Солдатова. Проведенные экспериментальные исследования  
показывают, что игнорировать влияние упругих перемещений опор на  
работу сооружения в целом было бы неправомерно. Применение новых  
материалов позволяет значительно уменьшить поперечное сечение соору-  
жаемых опор.

Достаточно сказать, что жесткость опор виадуков, сооружаемых  
в последнее время, значительно меньше, чем жесткость опор виадуков,  
построенных ранее.

Жесткость таких опор оказывается одного порядка, либо ниже  
жесткости пролетных строений. В целом жесткость всего сооружения  
может быть ниже, чем жесткость отдельных его элементов.

Очевидно, что величина горизонтальной жесткости виадука может  
существенно влиять на условия безопасности движения поездов, особен-  
но с высокими скоростями.

Между тем, вопрос исследования динамической работы высоких виа-  
дуков изучен недостаточно. Здесь следует отметить только работы  
Г.К.Гольста, исследовавшего горизонтальные колебания временных мост-  
тов, а также работы К.К.Якобсона и В.С.Усольцева, рассматривавших  
при исследовании горизонтальных поперечных колебаний виадуков услов-  
ную однопролетную систему.

Первая глава посвящена исследованию свободных поперечных гори-  
зонтальных колебаний виадуков, расположенных на прямой, и выбору  
расчетной схемы.

Пролетные строения виадуков представляют сплошную систему в  
виде разрезных балок, имеющих на опорах упругие связи между собой

НЕ  
ДНУЖТ

за счет жесткости рельсовой решетки и балластного слоя, а также трения в опорных частях. При этом соединения пролетных строений с опорами не являются идеальными шарнирами. Предоставить такую конструкцию точной расчетной схемой не представляется возможным. В связи с этим в настоящем исследовании рассматриваем несколько условных схем в виде: шарнирной цепи с упругими звеньями на упругих опорах, неразрезной балки на упругих опорах и балки на сплошном упругом основании.

Такой подход к решению задачи дает возможность оценить различные расчетные схемы и выбрать из них наиболее целесообразную.

Во всех этих системах решение значительно упрощается, если рассматривать опоры, как системы с одной степенью свободы, с некоторой приведенной массой, расположенной в уровне оголовка.

Для оценки достаточной практической точности такой предпосылки в работе предварительно исследуются свободные колебания отдельных опор и определяется величина приведенной массы.

Приведенная масса опоры  $M_n$  определяется из условия равенства первой частоты поперечных колебаний  $\theta$ , действительной опоры частоте поперечных колебаний условной опоры той же длины и имеющей ту же жесткость

$$M_n = \frac{1}{\theta, \delta_n} \quad //$$

где  $\delta_n$  — перемещение верха опоры от единичной силы в этом сечении.

Для элементов матрицы единичных перемещений опор с любым числом ступеней предложены рекуррентные зависимости.

При определении первой частоты колебаний опор с числом ступеней от двух до пяти был использован метод спектральной функции проф. С.А.Бернштейна. При числе ступеней свыше пяти частоты определялись на ЭЦМ "Промінь-М".

В частном случае двухступенчатой опоры можно воспользоваться известным решением для системы с двумя степенями свободы.

Для оценки влияния приведенной массы опор на частоты свободных горизонтальных колебаний были рассмотрены частоты отдельно стоящей опоры с массой пролетного строения и частоты трехпролетного виадука при высоте опор 44,3 м, 33,3 м, 22,3 м и длинах пролетов 33,5 м, 26,9 м, 22,9 м, в двух постановках: 1/ опоры рассматриваются как системы с несколькими дискретными массами, расположенными по высоте опор и 2/ опоры рассматриваются как одномассовые системы с при-

НИИ  
ДНУЖТ

веденными массами, расположенными в уровне оголовков опор. Сравнение соответствующих частот в обоих случаях показало практически полное их совпадение, что позволило в дальнейшем рассматривать опоры как одномассовые системы.

Полученные соотношения жесткостей и приведенных масс при учете и без учета податливости основания опор, сооружаемых в скальных грунтах, показывают их незначительное расхождение. Поэтому при определении частот свободных колебаний опор податливость основания не учитывается.

Для случая шарнирной системы с дискретными массами дифференциальные уравнения свободных поперечных горизонтальных колебаний виадука без учета крутильных колебаний имеют вид

$$Y_i = - \sum_{k=1}^{2n-1} M_k \bar{d}_{ik} \ddot{y}_k, \quad (i=1, 2, \dots, 2n-1), \quad /2/$$

где  $Y_i$  - горизонтальное перемещение  $i$  - той массы;  $\bar{d}_{ik}$  - коэффициенты влияния системы;  $n$  - число пролетов виадука,  $M_k$  - узловые массы, расположенные в середине пролетов и в местах упругих опор.

Определение частот произведено классическим методом.

Частоты и формы свободных горизонтальных колебаний виадуков как системы с дискретными массами определялись на ЭВМ "Промінь-М".

Рассмотренная выше методика расчета позволяет определить значения частот и форм собственных колебаний виадуков с различными жесткостями пролетных строений и опор.

С целью выявления влияния жесткости пролетных строений на частоты горизонтальных колебаний рассмотрены шарнирные системы с распределенными параметрами пролетных строений. Жесткости промежуточных опор приняты одинаковыми, пролетные строения - равной длины.

Используя исследования А.Г. Барченкова<sup>X/</sup> для случая податливых пролетных строений, после небольших преобразований получаем transcendентное уравнение относительно частотного параметра  $\lambda_k$

$$\frac{ch \lambda_k - \cos \frac{\pi \lambda_k}{2l}}{ch \lambda_k} - \frac{\cos \lambda_k - \cos \frac{\pi \lambda_k}{2l}}{\sin \lambda_k} = \frac{2C' - \alpha \lambda_k^2}{\lambda_k^3}, \quad /3/$$

где  $k$  - порядковый номер частоты;  $m$  - число упругих опор;  $\alpha$  - отношение приведенной массы опоры  $M_n$  к массе пролетного строения  $M_i$ ;  $C'$  - относительная жесткость опор, обозначенная через

$$C' = \frac{C_0 l^3}{2EJ}; \quad /4/$$

X/ А.Г. Барченков. К определению частот свободных колебаний регулярных шарнирных цепей на упругих инертных опорах. Сборник "Исследования по теории сооружений", вып. XI. Госстройиздат, М., 1962.

$C_0$  - жесткость опоры или величина, обратная единичному перемещению опоры  $d_n$ ;  $l$  - длина одного пролета виадука;  $EJ$  - жесткость пролетного строения относительно вертикальной оси.

Для случая абсолютно жестких пролетных строений, по аналогии с формулой А.А. Уманского<sup>х/</sup> для наплавных мостов, применительно к нашему случаю получено частотное уравнение

$$\theta_k = \sqrt{\frac{3C_0}{M_1(2 + \cos \frac{k\pi}{m+1}) + 3M_n}}, \quad /5/$$

где обозначения имеют прежние значения.

Сравнения частот, вычисленных по формулам /3/ и /5/ для виадуков при высоте опор 44,3 м, 33,8 м, 22,3 м и пролетных строений расчетным пролетом 33,5, 26,9 м и 22,9 м, показали расхождение до 10%, причем, расхождение с увеличением жесткости опор возрастает. При высоте опор 11,3 м это расхождение становится существенным. Таким образом, оказывается, что при жесткости опор  $C_0 > 1000$  т/м податливостью пролетных строений пренебрегать нельзя.

Большинство виадуков в силу конструктивных особенностей дают основание рассматривать расчетную схему как регулярную, т.е. с одинаковой жесткостью промежуточных опор и пролетными строениями одинаковой длины.

Определение частот по формуле /3/ затруднительно в связи с решением трансцендентного уравнения, а по формуле /5/ не всегда приемлемо в виду ограниченности ее применения, поэтому для шарнирной цепи с упругими звеньями с дискретным расположением масс, используя метод перемещений и метод начальных параметров, получено выражение для определения /2 m + 1/ частот системы

$$\theta_k^2 = -\frac{1}{2} (\theta_c^2 - \theta_o^2 + \theta_{oc}^2 \cos \frac{k\pi}{2(m+1)}) \pm \sqrt{\frac{1}{4} (\theta_c^2 - \theta_o^2 + \theta_{oc}^2 \cos \frac{k\pi}{2(m+1)})^2 + \theta_o^4 \theta_c^2}, \quad /6/$$

где  $\theta_o^2 = \frac{C_o}{M_o}$ ;  $\theta_c^2 = \frac{C_c}{M_c}$ ;  $\theta_{oc}^2 = \frac{C_c}{M_o}$ ;  $C_o, C_c$  - жесткости опор и пролетных строений;

$M_o, M_c$  - массы, расположенные в местах упругих опор и серединах пролетов.

Выражение /6/ значительно упрощает определение частот и является удобным для инженерных расчетов.

х/ А.А. Уманский. Наплавные мосты. Трансжелдориздат, М., 1939.

НТБ  
ДНУЖТ

Рассматривая виадуки, представленные неразрезной балкой с распределенными параметрами и одинаковыми пролетами на равноупругих промежуточных опорах, изгибные колебания можно выразить известным дифференциальным уравнением в частных производных

$$EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad /7/$$

где  $m$ , — погонная масса балки,  $EJ$  — ее жесткость.

Разделяя переменные по методу Фурье, приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение уравнения, определяющего главные формы колебаний, выражаем через функции А.Н.Крылова. Воспользовавшись составлением уравнений в конечных разностях с учетом условий сопряжения на промежуточных опорах, для определения частот свободных горизонтальных колебаний получаем трансцендентное уравнение

$$\frac{\operatorname{sh} \lambda_i l}{\operatorname{ch} \lambda_i - \cos \frac{l\pi}{n}} - \frac{\sin \lambda_i l}{\cos \lambda_i - \cos \frac{l\pi}{n}} = \frac{2 \lambda_i^3}{c' - \frac{c}{2} \lambda_i}, \quad /8/$$

где  $n$  — число пролетов;  $i$  — порядковый номер частоты. Остальные обозначения имеют прежние значения согласно формуле /3/.

Формы колебаний определены на основании исследований К.И.Солдатова<sup>х/</sup>. Определение частот и форм свободных горизонтальных колебаний выполнено на ЭИМ "Проминь-И".

Чтобы найти наиболее простое решение для определения частот колебаний рассмотрены колебания неразрезной балки на равноупругих промежуточных опорах с дискретными массами, расположенными в серединах пролетов и местах упругих опор. Используя метод начальных параметров для изогнутой оси балки, получим следующее выражение для определения частот:

$$\theta_i^2 = \frac{c_0}{M_0 + M_c} + \frac{4c (\cos \frac{l\pi}{3+1} - 1)^2}{(M_0 + M_c)(2 + \cos \frac{l\pi}{3+1})}, \quad /9/$$

где  $M_0, M_c$  — массы, расположенные в местах упругих опор и серединах пролетных стругов;  $S$  — число сосредоточенных масс. Остальные обозначения имеют прежние значения.

Анализ / $n-1$ / частот / $n$  — число пролетов/, полученных по уравнениям /8/ и /9/ показывает: расхождение не превышающее 5% для

х/ К.И.Солдатова. Свободные колебания регулярных балок и некоторых мостовых конструкций на упругих опорах. Диссертация, Днепропетровск, 1971.

НТБ  
ДНУЖТ

систем с относительной жесткостью опор  $c' \leq 70$ , что вполне удовлетворяет жесткостным характеристикам высоких виадуков.

При определении частот и форм собственных колебаний виадуков как балок на оплошном упругом основании предварительно энергетическим путем определялась эквивалентная масса и жесткость промежуточных опор.

Изгибные колебания применительно к нашей задаче описываются дифференциальным уравнением в частных производных

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_i' \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} + c_i' y + 2^4 m_i' \frac{\partial^2 y}{\partial x^2 \partial t^2} = 0, \quad /10/$$

где  $m_i'$  - суммарная масса эквивалентной приведенной массы опоры и погонной массы балки;  $c_i'$  - эквивалентная жесткость упругого основания;  $2$  - радиус инерции сечения балки относительно вертикальной оси.

Используя соответствующие подстановки, получим выражение для определения частот, которое для удобства анализа представлено в виде:

$$\theta_{si} = \theta_i \frac{1}{1 + \frac{l^2 x^4}{l^2 z^2}}, \quad /11/$$

$$\theta_i = \frac{l^2 x^4}{l^2 z^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_i'}} \sqrt{1 + \frac{2c_i' l^4}{x^4 l^2}} \sqrt{\frac{l}{1+\alpha}} \quad /12/$$

$l, l$  - длины одного пролета и всего виадука.

Инерция вращения пролетных строений не оказывает существенного влияния на частоты /не превышает 1%/ и поэтому в дальнейших расчетах не учитывается.

Численный анализ частот для балки на оплошном упругом основании и балки на упругих опорах для первой зоны сгущения спектра частот в зависимости от соотношения жесткостей и масс опор и балок при числе пролетов от 2 до 5 показывает расхождение частот не более 1,5%.

С целью сближения частот и для анализа влияния различных характеристик системы на частоты в работе произведено определение частот для нескольких виадуков с различным количеством пролетов и их величин при различной высоте промежуточных опор. Проведенные исследования позволили сравнить принятые расчетные схемы.

Расчетная схема, представленная шарнирной системой, позволяет определить частоты и формы свободных горизонтальных колебаний виа-

дуков, имеющих различную высоту опор и длину пролетных строений. Область применения определяется относительной жесткостью опор  $C' \leq 135$ , что практически приемлемо для всех виадуков. Однако, применение этой расчетной схемы затруднительно при исследовании вынужденных колебаний.

Использование расчетной схемы, представленной неразрезной балкой на упругих опорах с дополнительными массами в местах упругих опор, несколько затруднительно при анализе свободных колебаний, но позволяет построить более простую математическую модель при исследовании вынужденных колебаний.

Расчетная схема, представленная балкой на сплошном упругом основании, является менее точной по сравнению с шарнирной схемой при определении высших частот, однако, значительная простота и достаточная практическая точность вычислений первых частот определяют ее практическую ценность. При этом следует учитывать неизбежную приближенность целого ряда исходных параметров. Эта схема, наряду с расчетной схемой, представленной балкой на упругих опорах, используется при исследовании вынужденных колебаний виадуков с относительной жесткостью опор  $C' \leq 35$ .

В первой главе даются также некоторые соображения о применении разработанной методики к определению частот свободных колебаний железнодорожных виадуков с подъемными арками.

Во второй главе рассматриваются свободные горизонтальные колебания нагруженных виадуков, расположенных на прямой.

При исследовании свободных колебаний запруженных виадуков учитывается упругая связь между подрессоренными и недрессоренными частями подвижного состава. В настоящей главе, как и в предыдущей, рассматриваются три расчетные схемы: шарнирная система, неразрезная балка на упругих опорах и балка на сплошном упругом основании.

Дифференциальные уравнения горизонтальных колебаний виадуков, представленных шарнирной системой с дискретными массами, имеет вид аналогично /2/ с соответствующими изменениями значений масс и единичных перемещений.

При определении частот рассматриваются два случая: 1/ массы и жесткости вагонов сосредотачиваются на опорах и в середине пролетов и 2/ массы и жесткости вагонов сосредотачиваются только в середине пролетов. Анализ показал приемлемость применения второго случая, что несколько упрощает расчетную схему.

НТБ  
ДНУЖТ

Частоты и формы колебаний определялись на ЭЦМ "Промінь-М" и "Наври-2".

Колебания нагруженных виадуков, представленных неразрезной балкой на упругих опорах, описываются дифференциальными уравнениями вида

$$\begin{aligned} EJy'''' + m_2 \ddot{y}_2 + (m_1' + m_2) \ddot{y} &= 0 & /13/ \\ -J_0 \ddot{\varphi} - m_2 \dot{y}_2 h - k_\varphi \varphi + q h \varphi &= 0, & /14/ \end{aligned}$$

где  $m_1, m_2$  - подрессоренная и непрорессоренная погонные массы подвижного состава;  $y, y_2$  - горизонтальные перемещения пролетного строения и центра тяжести подрессоренных частей подвижного состава;  $\varphi$  - угол поворота подвижного состава;  $h$  - высота расположения центра тяжести подрессоренной массы над плоскостью осей колесных пар;  $J_0$  - погонный момент инерции подрессоренной массы относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести этой массы;  $k_\varphi$  - величина момента, вызывающая единичное угловое перемещение рессор подвижного состава;  $q$  - подрессоренный погонный вес вагона.

Используя метод Фурье для разделения переменных, а также рассмотренную выше методику получения трансцендентного уравнения, после преобразований приходим к биквадратному уравнению относительно частот осевых пространственных колебаний нагруженных виадуков.

Его решение имеет вид:

$$\theta_l^4 = \frac{1}{2f} \left[ (\theta_{\alpha l}^2 + \theta_s^2) \pm \sqrt{(\theta_{\alpha l}^2 + \theta_s^2)^2 - 4f \theta_{\alpha l} \theta_s^2} \right] \quad (l=1, 2, \dots, n), \quad /15/$$

где  $\theta_{\alpha l}$  - парциальная частота системы, равная частоте колебаний неразрезной балки на упругих опорах для  $l$ -той формы, когда жесткость рессор подвижного состава равна бесконечности;  $\theta_s$  - частота боковых колебаний вагона на жестком основании. Парциальные частоты соответственно определяются выражениями:

$$\theta_{\alpha l} = \lambda_l^4 \frac{EJ}{(m_1' + m_2 + m_2) l^4}; \quad \theta_s = \frac{k_\varphi - q h}{J_0}, \quad /16/$$

где  $J_0$  - погонный момент инерции подрессоренной массы относительно продольной оси, проходящий на уровне осей колесных пар.

Частотный параметр  $\lambda_l$  определяется из уравнения /8/, полагая в нем  $\alpha = 0$ .

В случае рассмотрения нагруженных виадуков как балки на сплошном упругом основании, колебания виадуков описываются также диффе-

НТ  
ДНУЖТ

рещиональными уравнениями /13,14/, только к уравнению /13/ добавляется член  $c_i y$ , учитывающий реакцию упругого основания. Частоты оовместных пространственных колебаний системы будут определяться уравнением /15/, парциальная частота  $\theta_{oi}$  имеет значение:

$$\theta_{oi}^2 = \frac{i^2 \pi^2}{(m_i' + m_o + m_s) l^2} + \frac{c_i}{m_i' + m_o + m_s}, \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad /17/$$

Выражение /15/ имеет две группы частот пространственных колебаний системы: оинфазные и антифазные.

Формы колебаний, определяющие характер деформаций пролетных строений и перемещений подвижного ооастава, находятся по приводимым в работе выражениям.

Получено также выражение для определения частот с учетом влияния скорости подвижного ооастава. Анализ влияния скорости на частоты колебаний показал, что при  $v = 120$  км/час ее можно не учитывать.

В работе дана оценка влияния на частоты горизонтальных колебаний виадуков высоты опор, длин пролетных строений и количества пролетов, нагруженных шестикоосными и четырехкоосными вагонами.

Проведенные исследования показали, что при определении частот ооводных горизонтальных колебаний нагруженных виадуков можно пользоваться расчетной схемой, представленной балкой на оопломном упругом основании, что значительно уменьшает объем вычислительной работы. При этом, рассматривая многопролетные виадуки, можно ограничиться рассмотрением пятипролетной схемой виадука.

В третьей главе приводятся исследования ооводных горизонтальных колебаний нагруженных и неагруженных виадуков, расположенных на кривой.

Расчетная схема представлена балкой на оопломном упругом основании, имеющей кривизану постоянного радиуса. При рассмотрении колебаний учитываются только радиальные ооставляющие перемещений точек оси балки, обуславливающие деформации изгиба в плоскости кривизаны.

Дифференциальные уравнения движения на основании уравнений равновесия Кирхгофа имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \theta} + N \frac{R_2}{R} - R_o M F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - R_o c_i y &= 0 ; \\ \frac{\partial M}{\partial \theta} + R_o Q &= 0 , \end{aligned} \right\} \quad /18/$$

где  $Q, N, M$  - поперечная, продольная оилы и изгибающий момент, оотноенные к единице длины;  $\mu$  - масса единицы объема балки;  $F$  - площадь

поперечного сечения балки;  $R_0$  - радиус кривизны в любой точке недеформированной оси балки;  $\theta$  - переменный центральный угол;  $C_0'$  - эквивалентная погонная жесткость основания.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений получена на основании метода Фурье.

Используя граничные условия для решения, определяющего главные формы колебаний, получим выражение для определения частот свободных колебаний  $\theta_i$ :

$$\theta_i = \frac{i^2 \pi^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_i}} \sqrt{1 + \frac{C_0' \ell^4}{\pi^4 i^4 EJ} + \frac{F \ell^4}{\pi^4 i^4 R_0^2}} \quad /19/$$

где  $\ell = 2\alpha R_0$  - полная длина виадука;  $m_i$  - масса единицы длины балки;  $2\alpha$  - центральный угол.

Существенным предельным переходом при  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $R_0 \rightarrow \infty$ , третий член под вторым радикалом исчезает, и мы приходим к уравнению частот прямолинейной балки на упругом основании. Отсюда видно, что частоты виадуков на кривой выше частот свободных колебаний прямолинейных виадуков.

Формы колебаний определяются выражением

$$\chi(\theta) = C \sin\left(\frac{i^2 \alpha}{2} \theta + \frac{i^2 \pi}{2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad /20/$$

Колебания нагруженных виадуков на кривой описываются системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + N \frac{1}{R} - M F \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} - C_0' \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} - m_i \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} &= 0; \\ \frac{\partial M}{\partial t} + Q &= 0; \\ -J_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - m_i \frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} h - K \varphi + q h \varphi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad /21/$$

Частоты совместных пространственных колебаний нагруженных виадуков на кривой определяются из выражения /15/, где парциальная частота  $\theta_{\alpha}$  имеет значение

$$\theta_{\alpha} = \frac{EF}{R_0^2 (m_1' + m_2 + m_i)} \sqrt{1 + \frac{R_0^2 C_0'}{EF} + \frac{\pi^4 i^4 \tau^2}{16 \alpha^4 R_0^2}} \quad /22/$$

где  $\tau$  - радиус инерции сечения балки.

Формы колебаний определяются из /20/ и по приводимым в работе выражениям.

В работе дан анализ влияния на частоты свободных колебаний высоты опор, длина пролетных строений, количества пролетов и рода наг-

НТ  
ДНУЖТ

ружки в зависимости от радиуса кривой. Установлено, что при  $R_0 \leq 1000$  м, кривизну при определении частот следует учитывать.

Четвертая глава посвящена исследованию вынужденных горизонтальных колебаний виадуков при движении одиночного локомотива /нестационарный режим/.

При решении поставленной задачи расчетная схема представлена неразрезной балкой на упругих промежуточных опорах с дополнительными массами в местах упругих опор и движущегося по ней с постоянной скоростью пульсирующего груза. Крайние опоры шарнирные, поперечно неподвижные. В качестве возмущающего воздействия принято влияние подвижного состава.

Масса локомотива приводится к месту взаимодействия колеса и рельсов по методике, разработанной Г.К.Гольцом.

Дифференциальные уравнения вынужденных горизонтальных колебаний запишутся в виде

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial y}{\partial t} + m_l \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = P_k(x, t) \delta(x-vt) + \sum_{s=1}^j P_p(x_s, t) \delta(x-x_s), \quad /23/$$

где  $EJ, m_l, \mu$  - изгибная жесткость, погонная масса и коэффициент сопротивления материала балки;  $\delta^a$  - дельта-функция;  $v$  - скорость движения локомотива;  $P_k, P_p$  - сила давления движущегося груза и реакции промежуточных опор;  $x_s$  - расстояние от начала балки до  $S$ -й промежуточной опоры;  $j$  - число промежуточных опор.

Для решения поставленной задачи используется метод обобщенных координат. Решение для прогиба отыскивается в виде ряда по фундаментальным функциям простой балки. Обыкновенное дифференциальное уравнение для определения  $i$ -той обобщенной координаты получено с помощью уравнений Лагранжа второго рода, которое, с учетом переносной, кориолисовой и относительной силы инерции движущейся массы  $M$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i + 2\varepsilon_i \dot{q}_i + \theta_i^2 q_i = \frac{2\beta}{m_l l} \sin i\pi \xi \sin \omega t - 2\beta \sum_{k=1}^{\infty} \dot{q}_k \sin k\pi \xi \sin i\pi \xi - \\ - 4\beta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi v}{l} \dot{q}_k \cos k\pi \xi \sin i\pi \xi + 2\beta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2 \pi^2 v^2}{l^2} q_k \sin k\pi \xi \sin i\pi \xi - \quad /24/ \\ - 2\gamma_s \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} q_k \sin k\pi \xi_s \sin i\pi \xi_s - 2\alpha_s \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \dot{q}_k \sin k\pi \xi_s \sin i\pi \xi_s, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_i$  - коэффициент затухания;  $\theta_i$  - частота свободных колебаний простой балки на двух опорах,  $P_0 = M\alpha_s \omega^2$  - модуль движущейся силы;

НТБ  
ДНУЖТ

$a_0, \omega$  - амплитуда и частота влияния локомотива;  $\beta, \alpha, \gamma_i$  - коэффициенты, равные

$$\beta = \frac{M}{m, l}; \quad \alpha = \frac{M_n}{m, l}; \quad \gamma_i = \frac{C_i}{m, l}$$

В работе дается оценка влияния массы локомотива на амплитуды горизонтальных колебаний виадуков, при этом, учитывая сложность уравнения /24/, принятая расчетная схема заменяется ей эквивалентной, что приводит к упрощениям при вычислении на ЭЦМ. Если учитывать несколько членов ряда в разложении, то возникает необходимость решения системы дифференциальных уравнений о динамической связи. В.В.Болотин и А.Б.Моргаевский в своих исследованиях отмечают, что взаимодействием обобщенных координат можно пренебречь в случае близости частот возмущающей силы к одной из частот собственных колебаний системы. Уравнения при этом разделяются. Поэтому при оценке влияния массы локомотива, пренебрегая взаимодействием гармоник, система для каждой обобщенной координаты вводится в резонанс. После приведения уравнений к нормальному виду, вычисления производились для скоростей движения локомотивов 60, 120 и 160 км/час численным методом Рунге-Кутты на ЭЦМ.

Влияние массы локомотива оказалось незначительным, так как величина массы локомотива мала по сравнению с массой участвующего в колебаниях виадука  $\beta = 0,01 + 0,02$ . Это позволило отказаться от учета массы локомотива и значительно упростить решение уравнения /24/.

Следует Ю.Г.Козьмину, отметившему в своих исследованиях необходимость учета для таких систем первой зоны сгущения, было получено решение для определения амплитуд горизонтальных поперечных колебаний виадука. Перемещение оси виадука выразится в виде

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n [e^{-\eta t} (A_i \cos \eta_i t + B_i \sin \eta_i t) + a_i' \cos(\lambda_i' t - \varphi_i') - a_i'' \cos(\lambda_i'' t - \varphi_i'')] \sin \frac{i\pi x}{l} \quad /25/$$

Входящие в /25/ обозначения определяются зависимостями, приводимыми в работе.

Используя решение /25/, был оставлен алгоритм и программа многовариантных расчетов на ЭЦМ "Наири-2" для определения перемещений в любой точке виадука.

Анализ результатов расчета показал, что, ввиду близости частот свободных колебаний системы, изменение скорости может вызвать резонанс по любой из частот первой зоны сгущения. Частоты второй зоны

НТБ  
ДНУЖТ

огущения достаточно высокие, и их влияние на амплитуды оказывается незначительно. Если при движении нагрузки с постоянной скоростью частота ее влияния приближается к одной из частот собственных колебаний системы, то она оказывает доминирующее влияние на величину горизонтальных перемещений. Горизонтальные перемещения в середине и в четверти виадукта оказались близкими по величине.

В пятой главе рассматриваются вынужденные колебания виадукта при движении вагонной нагрузки /стационарный режим/ и определяются предельные амплитуды с точки зрения обеспечения безопасности движения поездов и прочности промежуточных опор.

Расчетная схема представлена балкой на упругих промежуточных опорах с движущейся по ней с постоянной скоростью вагонной нагрузкой. Крайние опоры приняты шарнирными, поперечно неподвижными. Возмущающим фактором являются инерционные силы от влияния подвижного состава.

Учитывая, что влияние отдельных тележек в целом носит случайный характер, для определения приведенных горизонтальных сил используется вероятностный подход<sup>х/</sup>.

Дифференциальные уравнения вынужденных горизонтальных колебаний балки выражаются уравнением

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial y}{\partial t} + m_i \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \sum_{h=1}^m \rho_h(x_h, t) \delta(x-x_h) + \sum_{s=1}^k \rho_s(x_s, t) \delta(x-x_s), \quad /26/$$

где, кроме принятых в /24/ обозначений,  $\rho_h$  - давление  $h$ -ой тележки на балку;  $x_h$  - расстояние от начала балки до  $h$ -ой тележки;  $m$  - число ударных тележек.

К решению /26/ применен тот же подход, что и в предыдущей главе.

Обобщенные координаты  $q_i$ , учитывая число членов ряда  $n$ , определяются уравнением

$$\ddot{q}_i + \frac{2\epsilon_i}{1+\alpha} \dot{q}_i + \frac{\theta_i + \gamma}{1+\alpha} q_i = \frac{\rho}{m_i l} \sin \omega t, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad /27/$$

$$\alpha = \frac{M_n}{m_i l}, \quad \gamma = \frac{c_i}{m_i l}; \quad \rho_i = \frac{2M_i a_i \gamma m_i \omega_i}{1+\alpha};$$

$M_i, a_i$  - приведенная масса и амплитуда влияния тележки;  $\gamma_m$  - коэффициент вероятности одновременного появления амплитуд ударных тележек;

х/ Яковлев Г.Н. К вопросу определения горизонтальной нагрузки от подвижного состава на железнодорожные мосты. Труды ДИИТ; вып. 116, Днепропетровск, 1971.

$\gamma_{mi}$  - коэффициент количества ударов для  $i$ -ой обобщенной координаты.

Для определения коэффициентов  $\gamma_{mi}$  составлена программа, реализованная на ЭЦМ "Наири-2".

Используя аналитическое решение уравнения /27/, горизонтальное перемещение в любой точке оси виадука определяем из выражения

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n [e^{-\gamma_i t} (A_i \cos \eta_i t + B_i \sin \eta_i t) + a_i \cos(\omega t - \varphi_i)] \sin \frac{i\pi x}{L}. \quad /28/$$

Входящие в уравнение /28/ обозначения определяются по приводимым в работе выражениям.

Для определения ожидаемых амплитуд горизонтальных колебаний в инженерных расчетах оставлен алгоритм и программа решения задачи на ЭЦМ "Наири-2".

Чтобы установить условия, позволяющие гарантировать безопасность движения поезда с точки зрения отсутствия значительного обсагруживания колес одной стороны вагона, было рассмотрено движение вагона с постоянной скоростью по колеблющемуся виадуку. Влияние удерживающих связей соседних вагонов не учитывалось. Уравнение боковых колебаний подрессоренной массы  $M$  вагона имеет вид

$$J_0 \ddot{\varphi}_i + k \frac{S^2}{2} \dot{\varphi}_i + \Delta \frac{S^2}{2} \varphi_i = M h \ddot{y}_x, \quad /29/$$

где  $J_0, \varphi_i, h$  - обозначения аналогично /14/;  $k$  - коэффициент сопротивления рессоор, считая на одну сторону вагона;  $\Delta$  - жесткость рессоор одной стороны вагона;  $S$  - расстояние между центрами рессоорного подвешивания в поперечном направлении;  $y$  - поперечное перемещение центра подрессоренной массы.

Значения максимальных углов поворота определяются аналитически мы выражениями, полученными решением дифференциального уравнения боковых колебаний вагона /29/ при резонансных условиях.

Принятые резонансные условия дают возможность установить критерии, при которых исключается резонанс по колебаниям боковой качки:

$$\begin{aligned} \theta_i > \theta_0 + \frac{i\pi V_{max}}{\zeta} \quad \text{или} \quad \theta_i < \theta_0 + \frac{i\pi V_{min}}{\zeta}; \\ \theta_i > \theta_0 - \frac{i\pi V_{min}}{\zeta} \quad \text{или} \quad \theta_i < \theta_0 - \frac{i\pi V_{max}}{\zeta}, \end{aligned} \quad /30/$$

где  $\theta_i$  - частота свободных колебаний загруженного виадука;  
 $\theta_0$  - частота боковых колебаний вагона.

НТБ  
ДНУЖТ

О целью определения числовых значений частот, исключавших резонансные условия по боковой качке вагонов, рассмотрен широкий диапазон виадуков, встречающихся в практике строительства. На основании вычислений установлено, что критерием исключения резонанса по боковой качке является условие

$$T < 0,4 \text{ сек} \quad \text{или} \quad T > 2,5 \text{ сек}, \quad /81/$$

где  $T$  – период свободных горизонтальных колебаний нагруженных виадуков.

Если условия /81/ не выполняются, то следует сделать проверку степени обезгруживания колес вагона.

Обезгруживание колес вагона будет иметь место, если угол поворота кузова  $\varphi$  достигнет величины, при которой удлинение пружин ресорного подвешивания с одной стороны вагона превзойдет величину статической просадки ресор.

Решение уравнения колебаний вагона /29/ позволит получить зависимость углов поворота вагона  $\varphi$  от амплитуды горизонтальных колебаний пролетных строений виадука.

Очевидно, что наибольшие значения углов боковой качки будут иметь место при резонансных условиях. Анализ максимальных углов, полученных для виадуков при различной высоте опор, длине пролетных строений и количестве пролетных строений, позволит получить зависимость для определения предельных амплитуд  $Y_{пр}$  /см/. С учетом величины обезгруживания, рекомендованной ЦНИИ МПС и ЯИБ Главвагона, получим:

$$Y_{max} \leq Y_{пр} = \frac{0,4 \varphi_0 v}{0,00587 v + 0,00122 l}, \quad /82/$$

где  $\varphi_0$  – предельный угол поворота /  $\varphi_0 = 0,0412$  – для шестиосных и  $\varphi_0 = 0,0180$  – для четырехосных вагонов /;  $v$  – скорость движения в м/сек, определяемая по приведенным в работе выражениям, отвечающая условию  $7 \leq v \leq 85$ ;  $l$  – длина виадука в м, отвечающая условию  $45 \leq l \leq 175$ .

Так как жесткость опор одного порядка с жесткостью пролетных строений, а в некоторых случаях и ниже, условия работы опор могут отклоняться менее благоприятными, чем пролетных строений.

Поэтому для обеспечения нормальной работы опор с точки зрения их прочности предложена зависимость для определения предельных амплитуд:

$$Y_{max} \leq Y_{пр} = \frac{0,25 \text{ адж} N}{H}, \quad /83/$$

НТБ  
ДНУЖТ

где  $a$  - размер опоры поперек моста;  $\delta_n$  - единичное перемещение верха опоры;  $H$  - высота опоры до рассматриваемого сечения;  $N$  - нормальная сила, действующая на сечение.

Используя формулы /32/ и /33/, были вычислены значения предельных допускаемых амплитуд горизонтальных колебаний для некоторых реальных виадуков. Сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными данными приведено в табл. 1.

Таблица 1

Виадуки	А	Б	С	Д	Е	Примечание
У пред., мм	7,00	5,60	6,30	4,20	8,00	Ф-ла /33/
У пред., мм	4,30	2,80	2,86	3,59	8,15	Ф-ла /32/
У макс., мм	1,32	1,10	1,56	3,40	6,62	Эксперимент

Необходимо заметить, что жесткость виадуков А, В и С в поперечном горизонтальном направлении находится в пределах  $C_0=10650-12550$  т/м, а виадуков Д и Е -  $C_0 = 1840-4650$  т/м.

В качестве испытательной нагрузки для виадуков А, В, С и Д использовались четырехосные вагоны/ а для виадука Е - постоянные вагоны.

Таблица 1 наглядно показывает рост амплитуд горизонтальных колебаний виадуков с уменьшением их поперечной жесткости и с увеличением нагрузки.

Шестая глава посвящена изложению методики и результатам экспериментальных исследований природных объектов. Были исследованы три виадука с бетонными ступенчатыми опорами и сталежелезобетонными с предварительно напряженными железобетонными балочными пролетными строениями, причем, один из исследуемых виадуков располагался на кривой.

Природные испытания проводились в период 1974-1975 гг. отраслевой научно-исследовательской лабораторией динамики мостов ДИИТа с участием автора.

Программой испытаний ставились задачи определения частот, форм и декрементов свободных горизонтальных колебаний виадуков с нагрузкой и без нагрузки подвижного состава, частот и форм пространственных колебаний системы "виадук-поезд" при движении нагрузки, динамических горизонтальных перемещений пролетных строений и опор.

Для определения амплитуд поперечных горизонтальных колебаний оголовков опор и середины пролетных строений были применены сейсмо-

НЕ  
ДНУЖТ

метры ВВП-Ш и индуктивные маятники ДИИТа.

В качестве испытательной нагрузки использовались проходящие грузовые поезда, одиночные локомотивы и специально сформированный испытательный поезд из четырехосных полувагонов, загруженных до полной грузоподъемности, и двух локомотивов /в голове и хвосте поезда/.

Частоты, формы и декременты свободных колебаний определялись по концам осциллограмм, заплюсованных после охода нагрузки с моста. Для определения частот свободных колебаний загруженных виадуков испытательный поезд развивал скорость до 30 км/час и, когда головной локомотив доходил до конца моста, включалось экстренное торможение и производилась запись.

Полученные экспериментальные данные для определения амплитуд горизонтальных колебаний обрабатывались методами математической статистики с использованием ЭЦМ. При этом для виадуков А, В и С учитывалось соответственно 174, 165 и 272 опыта, включенных в обработку.

Результаты проведенных испытаний показали, что значения частот горизонтальных колебаний существенно зависят от жесткости промежуточных опор. Жесткости пролетных строений имеют меньшее значение.

Осциллограммы показывают, что пролетные строения и опоры перемещаются в одном направлении, причем, эти перемещения мало отличаются друг от друга по величине.

Сравнение экспериментальных значений первых частот колебаний виадуков с их теоретическими значениями приводится в табл. 2, где, кроме виадуков А, В и С, использованы результаты испытаний многопролетного арочного виадука /виадук Е/, проведенных научно-исследовательской лабораторией динамики мостов ДИИТа в 1969 году и результаты испытаний многопролетного балочного виадука /виадук Д/, выполненных лабораторией мостовых конструкций НИИИТа в 1966 году.

Таблица 2.

Виадуки	Незагруженные					Загруженные
	А	Б	С	Д	Е	А
Частоты, теоретич.	2,89	2,48	2,20	0,91	0,88-4,00	1,65
гц экперим.	2,20	2,56	2,20	0,91	1,18	1,54

Сравнение теоретических и экспериментальных значений максимальных амплитуд горизонтальных колебаний для середины виадуков дано в табл.8. При теоретическом определении амплитуд горизонталь-

НТБ  
ДНУЖТ

ных колебаний виадуков амплитуды влияния тележек вагонов и локомотивов, на основании исследований ДИИТа, принимались равными  $Q = 14$  мм

Таблица 9

Нагрузка	Вагоны						Локомотивы		
	4 оси				6 осей		ВЛ10	ТЭ 9	
Виадуки	А	Б	С	Д	Е	А	С		
$V$ , м/сек	13,9	16,6	18,9	16,6	18,0	10,5	21,2	18,0	17,5
$U_{\text{max теор}}$ , мм	1,10	1,20	0,95	1,28	1,59	3,50	6,80	1,80	1,15
$U_{\text{max эксп}}$ , мм	1,20	1,82	0,50	1,04	1,56	3,40	6,62	0,7-1,2	1,0-1,8

### ВЫВОДЫ:

1. Разработана методика исследования горизонтальных колебаний железнодорожных виадуков как многопролетных систем на упругих опорах.

2. На основе исследований нескольких расчетных схем выбрана наиболее целесообразная для решения поставленной задачи.

3. Разработана методика определения частот свободных горизонтальных колебаний незагруженных и нагруженных виадуков, расположенных на прямых и кривых участках пути.

4. Разработана методика определения наибольших амплитуд горизонтальных вынужденных колебаний при движении одиночных локомотивов и поездов нагрузки.

5. Предложены критерии для оценки амплитуд горизонтальных колебаний из условия допустимой степени обезгруживания колес подвижного состава и прочности опор.

6. Установлено, что основное влияние на частоты свободных колебаний имеет жесткость промежуточных опор. Влияние кривизны пути следует учитывать при радиусе  $R \leq 1000$  м.

7. Показано, что при исследовании горизонтальных колебаний виадуков со ступенчатыми опорами допустимо представлять опору системой с одной степенью свободы с приведенной массой в уровне оголовка опоры.

8. Показано, что в условиях опор, сооружаемых на скальном основании, влиянием податливости скальных грунтов можно пренебречь.

НТБ  
ДНУЖТ

9. Исследования вынужденных колебаний показали, что максимальные перемещения наблюдаются в средней части виадука, причем, величина перемещений существенно зависит от амплитуды влияния подвижного состава, поэтому важным фактором при эксплуатации виадуков является исправное содержание пути в плане.

10. При нестационарном режиме влияния массы локомотива на амплитуды незначительно, и этим влиянием можно пренебречь.

11. Горизонтальные перемещения, полученные для нестационарного и стационарного режима, мало отличаются друг от друга и являются величинами одного порядка.

12. Сравнение теоретических расчетов с данными проведенных исследований на реальных объектах показывает удовлетворительную сходимость результатов.

13. Для облегчения вычислительной работы при практическом использовании предложенной методики составлены алгоритмы и программы, реализуемые на ЭЦМ "Напри-2". *определения*

14. Разработанная методика частот и амплитуд горизонтальных колебаний может быть использована при проектировании и обследовании существующих виадуков.

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Яковлев Г.Н., Галушко В.Г., Свободные колебания виадуков с разрезными балками. Труды ДИИТа, вып.157, Днепропетровск, 1975.

2. Яковлев Г.Н., Солдатов К.И., Галушко В.Г. К вопросу о свободных пространственных колебаниях виадуков. Труды ДИИТа, вып.157, Днепропетровск, 1975.

3. Галушко В.Г. Свободные горизонтальные колебания виадуков, расположенных на кривых. ДИИТ, Днепропетровск, 1974. Депонировано в ЦНИИТЭИ. МПС, рукопись № I75/74.

4. Яковлев Г.Н., Галушко В.Г. Свободные горизонтальные колебания нагруженных виадуков как балок на сплошном упругом основании. Труды ДИИТа, вып.165/19. Днепропетровск, 1975.

5. Галушко В.Г. Горизонтальные колебания виадуков, расположенных на кривой. Труды ДИИТа, вып.165/19. Днепропетровск, 1975.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОЛЕНАНИЙ  
КИНЕМАТОГРАФНЫХ ВАЛОЧНЫХ ВРАЩУКОВ**

**ВГ 10101. К печати 11.01.1977 г. Сдано в производство 12.01.1977 г.  
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,2. Тираж 120, Заказ № 314. Воспитание.  
Городская типография № 3 Днепропетровского областного управления  
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 290002,  
Днепропетровск, ул. Брунзе, 6.**

Сканировала Камянская Н.А.

**НТБ  
ДНУЖТ**