

Труду Савику О.В.

Н 91

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
им. М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

КУРАВЛЕВ ВИКТОР АРКАДЬЕВИЧ

УДК 624.072.45.016

РАСЧЕТ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ  
ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ СДВИГА  
И ИНЕРЦИИ ВРАЩЕНИЯ НА ПОДВИЖНУЮ НАГРУЗКУ

Специальность 01.02.03 - строительная механика

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

ДНЕПРОПЕТРОВСК - 1986

НТБ  
ДНУЖТ



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года, утвержденными XXIII съездом КПСС, предусмотрено увеличение грузооборота автомобильного транспорта, ускорение строительства и реконструкции автомобильных дорог и искусственных транспортных сооружений, внедрение новых прогрессивных строительных конструкций.

В связи с этим требуется повысить пропускную способность автомагистралей в стесненных условиях, что вызывает необходимость возведения мостов криволинейного очертания в плане. В настоящее время пока не создана научно обоснованная методика расчета таких мостов на динамическое действие подвижной нагрузки.

Цель работы является разработка методики динамического расчета неразрезных криволинейных тонкостенных стержней открытого профиля с учетом деформаций одвига и инерции вращения под действием подвижной нагрузки (применительно к автодорожным мостам).

Методы исследования. На основе интегро-интерполяционного метода А.А.Самарского выполнена дискретизация по пространственной переменной уравнений статики, свободных и вынужденных колебаний тонкостенного стержня произвольной кривизны в плане. Дифференциальные уравнения движения системы "стержень+нагрузка" решены методом прямого пошагового интегрирования по временной переменной с использованием трехслойных разностных схем. Экспериментально исследовано действие статической нагрузки на неразрезные криволинейные тонкостенные стержни. При

6800 a

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

ДНУЖТ

изучения случайных вынужденных колебаний пролетных строений используя метод статистических испытаний.

Научную новизну работы составляют:

1. Методика статического расчета криволинейных тонкостенных стержней с учетом сдвиговых деформаций срединной поверхности.

2. Алгоритм расчета свободных колебаний неразрезных криволинейных стержней с учетом сдвигов и инерции вращения сечений.

3. Расчет динамического воздействия модели грузового автомобиля на путь при криволинейном движении и движении через одиночные неровности импульсного типа.

4. Методика расчета совместных вынужденных колебаний системы "стержень + нагрузка" при действии непрерывного и импульсного кинематических возмущений неровного пути.

5. Алгоритм расчета случайных колебаний пролетных строений открытого профиля при движении колонны подрассоренных грузов.

6. Количественная оценка влияния кривизны и сдвига при статическом и динамическом расчетах несущих конструкций.

7. Экспериментальное исследование статического деформированного состояния неразрезного криволинейного тонкостенного стержня.

Практическая ценность. Разработанная методика позволяет рассчитывать неразрезные пролетные строения с криволинейной в плане осью на статическое и динамическое действие подвижной нагрузки. Она может быть рекомендована для использования проектными и научно-исследовательскими организациями при проектировании мостов.

НТБ  
ДНУЖТ

Внедрение результатов работы. Методика статического и динамического расчетов использована для оценки напряженно-деформированного состояния неразрезной эстакады радиусом 600 м по схеме 33 + 5х42 + 33 м на правобережном подходе Кинного мостового перехода через р.Днепр в г.Киеве, разработанного Киевским филиалом института Союздорпроект.

Доклады и публикации. Основное содержание диссертации отражено в 3 публикациях. Результаты работы доложены:

1. На XXXV-XXXVII научных конференциях Воронежского инженерно-строительного института в 1982-1986 годах.
2. На Республиканской межвузовской конференции по проблемам строительства и архитектуры в г.Бресте в 1984 году.
3. На 43 научной конференции Ленинградского инженерно-строительного института в 1986 году.
4. На VI Всесоюзной конференции по экспериментальным исследованиям инженерных сооружений в г.Новополоцке в 1986 году.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 129 страниц машинописного текста, 69 рисунков, 18 таблиц и список использованной литературы из 129 наименований.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Дается исторический обзор исследований по криволинейным стержням. Первые работы по их статическому расчету принадлежат Р.Клебу, Т.Карману, С.П.Тимошенко, А.И.Лурье. Развитие теории тонкостенных криволинейных стержней базировалось на кинематических гипотезах В.З.Власова о недеформируемости контура поперечного сечения и об отсутствии сдвигов срединной

НТБ  
ДНУЖТ

поверхности. В этом направлении известны работы Г.Ю.Джанелидзе, А.А.Уманского, А.Р.Ржаницына, Н.Я.Гривберга, Ю.П.Григорьева, Я.А.Пратусевича, Р.Дабровски.

Дальнейшее уточнение теории потребовало учета изменяемости контура поперечного сечения. Здесь отметим результаты Е.А.Бейлина, В.Л.Бидермана, В.П.Ильина, А.С.Лисового, В.К.Окшешева, Д.А.Усманова. Обобщение теории на естественно закрученные и тонкие криволинейные стержни дано в работах О.Б.Голубева, Ю.С.Воробьева, Б.Ф.Шорра, В.Л.Бердичевского, Л.А.Старосельского, Л.Д.Магомазза и других ученых.

Расчету криволинейных пролетных строений мостов на статическую нагрузку посвящены работы М.Е.Гибшмана, Б.Е.Улицкого, В.А.Уткина, А.А.Потапкина, Е.Г.Игнатьева, Р.И.Рубинчик, В.А.Шастина, Н.И.Богданова. Большой вклад в теорию расчета мостов как пространственных систем внесли А.В.Александров, В.Г.Донченко, Н.П.Дукли, А.А.Петропавловский, Н.Н.Стрелецкий, Н.Н.Шапошников.

Проблема динамического расчета сооружений отражена в литературе достаточно широко. Действие подвижных нагрузок на балки освещено в классических трудах А.Н.Крылова, С.П.Тимошенко, С.Иглия, В.В.Болотина, В.А.Киселева, С.А.Ильясевича, Б.Е.Гибшмана, а также в фундаментальных работах Н.Г.Бондаря, Ю.С.Воробьева, С.С.Кохманяка, Г.Б.Муравского, В.М.Мучникова, Г.С.Шестоперова, Г.Н.Яковлева.

Колебания пролетных строений при движении подрессоренной нагрузки исследовали Н.Г.Бондарь, И.И.Казей, С.К.Кашаев, Ю.Г.Козьмин, И.А.Колесник, С.И.Конашенко, Б.Ф.Лесохия, Э.Г.Ройт - бурд, В.П.Тарасенко, Ю.П.Федоров, И.К.Цыпьяс, Д.Фриба, а также сотрудники кафедры строительной механики Воронежского инженерно-строительного института под руководством А.Г.Барченко.

НТБ  
ДНУЖТ

Изучением динамики криволинейных пролетных строений автодорожных мостов занимались А.Тазар, С.Шор, Э.Хейнц, С.Чаудхури, П.Кристьяно и другие зарубежные авторы.

Вопросы динамики криволинейных стержней освещены в отечественной литературе в основном в рамках свободных колебаний. Е.А.Бейлин развил постановку задачи В.Э.Власова на стержни с деформируемым контуром. Колебания тонких пространственных стержней рассмотрел И.Д.Грудев. При определении собственных частот криволинейных тонкостенных стержней Б.А.Корбут, Г.В.Лазарева, Е.А.Бейлин учитывали сдвиговые деформации введением специальных геометрических характеристик сечения. Аналогичные характеристики были получены ранее В.Б.Мещеряковым и В.И.Лазаревым для прямолинейных стержней. Эти способы учета сдвигового эффекта применены в реферируемой диссертации.

В первой главе поставлена задача и приведена методика расчета криволинейных тонкостенных стержней открытого профиля с учетом сдвигов на статическую нагрузку. Исследования выполнены применительно к неразрезным пролетным строениям автодорожных мостов.

Для описания напряженно-деформированного состояния стержня использованы три группы зависимостей: семь дифференциальных уравнений равновесия, восемь дифференциальных зависимостей между деформациями и перемещениями, восемь соотношений между усилиями и деформациями.

На основе интегро-интерполяционного метода получены дискретные аналоги указанных зависимостей, соответственно имеющих вид

$$\overline{AP} = -h\overline{q} \quad (I)$$

НТБ  
ДНУЖТ

$$\bar{P} = J\bar{E} \quad (2)$$

$$\bar{E} = \hat{h}^{-1} A^T \bar{x} \quad (3)$$

Здесь  $\bar{P}$  - вектор внутренних сил;  $\bar{q}$  - вектор внешних нагрузок;  $\bar{E}$  - вектор деформаций;  $\bar{x}$  - вектор перемещений, содержащий в каждом из узлов дискретной сетки продольное, горизонтальное в плоскости кривизны и вертикальное из плоскости кривизны перемещения, углы поворота сечения относительно координатных осей и функцию деформации сечения. Кроме того  $A$  - матрица конечно-разностного оператора дифференцирования;  $J$  - квазидиагональная матрица жесткостных характеристик стержня;  $h$  и  $\hat{h}$  - диагональные матрицы длин участков дискретизации.

После подстановки выражений (3) в (2), а затем (2) в (1), получена система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных перемещений

$$C\bar{x} = h\bar{q} \quad (4)$$

где  $C = A J \hat{h}^{-1} A^T$  - блочная матрица жесткости стержня, имеющая профильную структуру с шириной полуленты  $N_L = 9$ .

Переход к неразрезному стержню осуществлен на уровне дискретных уравнений. Исключение перемещений в направлении наложенных связей было достигнуто увеличением в  $10^6$  раз соответствующих диагональных элементов матрицы жесткости, что фактически означает введение абсолютно жестких опор.

Выполнено численное исследование влияния сдвигов, кривизны, длины пролетов, эксцентриситета расположения нагрузки, горизонтальных связей по нижним поясам пролетного строения, представленного тонкостенным стержнем, на его напряженно-деформированное состояние. В качестве внешней принималась вре-

Н. В. В.  
Д. Н. Д.

менная автомобильная нагрузка АII по СНиП 2.05.03-84 "Мосты и трубы".

Расчеты показали, что кривизна оси существенно изменяет картину деформированного состояния при  $R/b \leq 30$  ( $R$  - радиус кривизны,  $b$  - характерный размер поперечного сечения стержня). С увеличением кривизны ее влияние возрастает. Экспериментально и теоретически установлено, что между центром кривизны и осью стержня расположена точка, при приложении вертикальной нагрузки к которой, изгиб стержня не сопровождается его кручением.

Учет сдвигов в криволинейных стержнях при  $L/b \leq 5$  ( $L$  - длина пролета) дает увеличение перемещений на 10...15%. Для прямолинейных стержней увеличение перемещений за счет сдвигов составляет 5...10%.

Доказаны устойчивость и второй порядок аппроксимации используемой разностной схемы. С помощью экстраполяции Ричардсона получено решение четвертого порядка точности путем линейной комбинации решений второго порядка на последовательности вложенных сеток.

Достоверность теоретических результатов подтверждена экспериментом. Испытан двухпролетный стержень, изготовленный из алюминиевого сплава. Радиус кривизны оси составлял 1,17 м, длины пролетов - по 0,99 м и по 0,49 м каждый. Поперечное сечение с вертикальной осью симметрии типично для мостов с двумя главными балками. Установка загружалась системой сосредоточенных сил в серединах пролетов с различными эксцентриситетами относительно линии центров изгиба.

Сопоставление теоретических результатов с экспериментальными данными показало, что принятое теоретическое описание

НТБ  
ДНУЖТ

адекватно отражает статическое напряженно-деформированное состояние криволинейных тонкостенных стержней. Учет сдвигов позволяет более точно описать это состояние.

Во второй главе описан предложенный алгоритм расчета свободных колебаний неразрезных криволинейных тонкостенных стержней открытого профиля с учетом сдвигов и инерции вращения.

С помощью интегро-интерполяционного метода исходные дифференциальные уравнения в частных производных преобразованы в систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$C\ddot{\bar{x}}(t) = -\rho h M \ddot{\bar{x}}(t), \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $M$  – матрица инерционных членов;  $\ddot{\bar{x}}(t)$  – вектор ускорения.

После разделения переменных получена система алгебраических уравнений обобщенной проблемы собственных значений

$$C\bar{X} = \Omega^2 \rho h M \bar{X}, \quad (6)$$

которая в результате преобразования подобия приведена к стандартному виду

$$T\bar{Z} = \Omega^2 \rho h \bar{Z} \quad (7)$$

где  $M = L L^T$ ;  $T = L^T C L^{-T}$ ;  $\bar{Z} = L^T \bar{X}$ ;  $\Omega$  – собственные частоты стержня;  $\bar{X}$  – вектор собственных форм.

Для решения системы (7) применен алгоритм Гивенса приведения матрицы  $T$  к трехдиагональному виду с последующим определением собственных значений и векторов.

Выполнено исследование спектра частот в зависимости от

НТБ  
ДНУЖТ

радиуса кривизны, обнаружившее заметные изменения низших частот при уменьшении отношения  $R/b \leq 5 \dots 8$ .

Установлено, что поправки от сдвигов к частотам (особенно высшим) в криволинейных стержнях несколько больше, чем в прямолинейных. Так для двухпролетного стержня радиусом 100 м при изменении  $L/b$  в 1,5 раза поправки изменяются в 1,4...3,1 раза; для прямолинейного - соответственно в 1,1...2,6 раза.

Доказано условие ортогональности собственных форм и неотрицательности собственных частот дискретной модели стержня.

Применение экстраполяционной процедуры Ричардсона позволило повысить порядок точности решения со второго до четвертого без увеличения затрат машинного времени.

Третья глава посвящена расчету динамического давления на путь механической системы, моделирующей автомобиль при криволинейном движении.

Из многочисленных исследований по динамике автомобилей широко известны работы Р.В.Ротенберга, Я.М.Певзнера, А.А.Силаева. Криволинейное движение механических моделей транспортных средств рассматривали Б.М.Додонов, А.А.Хачатуров, А.Ф.Хмыров, В.А.Лазарян, Н.А.Радченко, М.А.Магур, В.И.Зинченко, идеи которых используются в реферируемой диссертации.

Автомобиль представлен плоской в поперечном направлении моделью с пятью степенями свободы, которая состоит из дисков (кузов и задний мост) и упруго-диссипативных связей (рессоры и шины). Связи имеют кусочно-линейные характеристики жесткости и учитывают пробивание рессор и отрыв шин от дороги. Демпфирование учтено по гипотезе Фойгта.

Для расчета вынужденных колебаний экипажа применен метод прямого пошагового интегрирования исходной системы дифферен-

циальных уравнений на основе временной дискретизации и использования трехслойной явной разностной схемы (по А.А.Самарскому, К.Бате и Е.Вилсону). При этом векторы ускорений  $\ddot{\bar{x}}_H(t_j)$  и скоростей  $\dot{\bar{x}}_H(t_j)$  в  $j$ -тый момент времени представлены через перемещения в  $(j-1)$ -ый,  $j$ -тый и  $(j+1)$ -ый моменты времени в виде центральных разностей

$$\begin{aligned}\ddot{\bar{x}}_H(t_j) &= \frac{\bar{x}_H(t_{j+1}) - 2\bar{x}_H(t_j) + \bar{x}_H(t_{j-1}))}{\tau^2} \\ \dot{\bar{x}}_H(t_j) &= \frac{\bar{x}_H(t_{j+1}) - \bar{x}_H(t_{j-1}))}{2\tau}\end{aligned}\quad (8)$$

где  $\tau$  - шаг временной дискретизации. На каждом временном шаге (слое) решалась система уравнений относительно неизвестных перемещений в момент времени  $t_{j+1}$ :

$$\tilde{K}_H \bar{x}_H(t_{j+1}) = \tau^2 \bar{q}_H(t_j) + \tilde{C}_H \bar{x}_H(t_j) - \tilde{K}_{H1} \bar{x}_H(t_{j-1}) \quad (9)$$

где  $\tilde{K}_H$ ,  $\tilde{K}_{H1}$ ,  $\tilde{C}_H$  - эффективные (в комбинациях с матрицей инертности) матрицы демпфирования и жесткости;  $\bar{q}_H(t_j)$  - вектор внешних воздействий.

В результате расчета криволинейного движения модели груженого автомобиля МАЗ-5335 по неровному пути выявлено существенное перераспределение вертикального давления на путь между наружным и внутренним колесами, а также появление горизонтальной составляющей давления. Перемещения кузова при переезде одиночных неровностей импульсного типа оказались незначительными по сравнению с перемещениями заднего моста, что позволило применить линейную модель нагрузки. При этом динамическая загруженность шин более чем в 4 раза превышает загруженность рессор и зависит от продолжительности кинематического импульса и его формы. Описанная в данной главе механическая модель использована далее в качестве подрайной нагрузки.

НТБ  
ДНУЖТ

В четвертой главе приведена методика расчета пространственных колебаний неразрезных криволинейных тонкостенных стержней с учетом сдвигов и инерции вращения под действием движущейся подрессоренной нагрузки.

Получены дискретные по пространственной переменной уравнения вынужденных колебаний стержня. Неупругое сопротивление материала учтено по модернизированной гипотезе Фойгта частотно-независимого поглощения энергии введением матрицы диссипации  $K$ .

При численном интегрировании исходных дифференциальных уравнений движения стержня

$$M \ddot{\bar{x}}(t) + (1 + K \frac{\partial}{\partial t}) C \dot{\bar{x}}(t) = \bar{q}(t) \quad (10)$$

векторы ускорений  $\ddot{\bar{x}}(t)$ , скоростей  $\dot{\bar{x}}(t)$  и перемещений  $\bar{x}(t)$  в момент времени  $t_j$  представлены центральными разностями. Тогда трехслойная неявная разностная схема получила вид:

$$\tilde{C} \bar{x}(t_{j+1}) = \bar{q}(t_j) + \tau^{-2} M \bar{x}(t_j) - \tilde{C}_1 \bar{x}(t_{j-1}) \quad (11)$$

где  $\tilde{C}$  и  $\tilde{C}_1$  - эффективные (в комбинациях с матрицами диссипации и инертности) матрицы жесткости стержня;  $\bar{q}(t_j)$  - вектор внешних нагрузок.

Для подрессоренной нагрузки решение в те же моменты времени определялось по явной схеме (9); причем в вектор  $\bar{q}_n(t_j)$  были добавлены слагаемые, учитывающие обратную связь - кинематическое действие перемещений несущей конструкции на экипаж в точках их контакта.

Неявная схема, использованная для стержня, является абсолютно устойчивой и не накладывает ограничений на величину шага временной дискретизации  $\tau$ . В условно устойчивой явной

НТБ  
ДНУЖТ

схеме шаг  $\tau$  должен быть не более критического  $\tau \leq \tau_{кр} = T_{min}/\sqrt{g}$  (где  $T_{min}$  — наименьший собственный период колебаний нагрузки). Применение данной схемы обусловлено тем, что нелинейная матрица жесткостных характеристик экипажа переходит в правую часть системы (9). Это избавляет от необходимости пошагового пересчета коэффициентов левой части уравнений (9) и значительно сокращает время вычислений. Окончательно шаг дискретизации  $\tau$  назначается из условий устойчивости интегрирования по явной и точности — по неявной схемам.

Исследования вынужденных колебаний проведены для двухпролетного (42 + 42 м) криволинейного ( $R = 100$  м) стержня открытого профиля, моделирующего несущую конструкцию автодорожного моста. Параметры экипажа соответствовали автомобилю МАЗ-5335.

Анализ результатов показал, что максимальные значения динамических перемещений и усилий в криволинейных стержнях на 20...30% больше, чем в прямолинейных. Деформированное состояние стержня зависит от траектории движения нагрузки: при движении ближе к наружному краю возрастающий эффект закручивания способствует увеличению вертикальных и горизонтальных перемещений; при движении у внутреннего края угол закручивания меняет знак, линейные перемещения при этом уменьшаются. Амплитуды колебаний пролетного строения возрастают на 10...40% при увеличении скорости экипажа с 5 до 15 м/с. Пренебрежение обратной связью ведет к незначительному изменению всех компонент колебаний системы. Учет сдвигов в криволинейном стержне приводит к увеличению динамических перемещений в 1,1...1,6 раз по сравнению с прямолинейным.

Динамическим расчетом семипролетной эстакады малой кривизны ( $R = 600$  м) установлено, что горизонтальные составляющие перемещений и нормальные напряжения от изгибающих моментов

НТБ  
ДНУЖТ

в горизонтальной плоскости на 2...3 порядка меньше, чем соответствующие вертикальные перемещения и напряжения от изгибающих моментов в вертикальной плоскости. Это подтверждает нормативные рекомендации о возможности неучета кривизны моста при  $R \geq 600$  м.

Выполнены численные исследования динамики двухпролетного моста радиусом 100 м при импульсном кинематическом возмущении нагрузки, движущейся через одиночные неровности покрытия в виде выпуклой косинусоиды, прямоугольного выступа и впадины. В динамической реакции системы обнаружены осцилляции высших форм, на которые, как известно, существенно влияют деформации сдвига срединной поверхности. Максимальные значения перемещений середины пролетов с учетом сдвигов оказываются на 5...12% больше, чем без их учета, тогда как динамические коэффициенты исследованных величин отличаются незначительно.

Рассмотрена динамика системы "стержень + нагрузка" при различных скоростях движения  $V$ . Численно найдены резонансные длины неровностей типа "выпуклая косинусоида":  $l_n = 4$  м при  $V = 10$  м/с;  $l_n = 6$  м при  $V = 15$  м/с.

Доказано, что используемые методы прямого интегрирования более чувствительны к изменению шага временной дискретизации (чем пространственной), что следует учитывать при необходимости уточнения решения.

Изложена методика и результаты расчета случайных колебаний неразрезного криволинейного тонкостенного стержня с учетом сдвигов и инерции вращения при движении колонны под эсонируемых грузов. Основными разработками вероятностных методов в строительной механике являются Н.С.Стрелецкий, В.В. Болотин, А.Р.Ряницын. Применительно к автодорожным мостам

НТБ  
ДНУЖТ

эти методы развивали А.Г.Барченков, В.С.Сафронов, И.К.Цып-нас, В.П.Чирков, Л.Фрыба и другие ученые.

Численное исследование выполнено для неразрезного двух-пролетного 42 + 42 м моста радиусом 100 м. В качестве случайных исходных параметров были приняты микропрофиль пути и начальные условия нагрузки перед входом на пролетное строение. Вычислительный эксперимент проведен методом статистических испытаний при 100 оменах ситуации на мосту. Определены статистические характеристики случайных рядов максимальных перемещений и усилий в середине пролета и над промежуточной опорой стержня, а также реакций в этой опоре. Построены гистограммы распределения, которые аппроксимированы кривыми Пирсона различных типов. Согласованность статистических распределений и аппроксимирующих кривых проверена с помощью критериев согласия Колмогорова и Пирсона.

Получены динамические коэффициенты случайных перемещений и усилий, которые были сопоставлены с динамическими коэффициентами, рекомендуемыми СНиП 2.05.03-84 "Мосты и трубы".

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика динамического расчета неразрезных криволинейных тонкостенных стержней открытого профиля с учетом сдвигов и инерции вращения под действием подвижной подрессоренной нагрузки. Оценено влияние кривизны, сдвигов и других параметров на колебания системы "стержень + нагрузка" при движении нагрузки по неровному пути случайного и импульсного характера.

НТБ  
ДНУЖТ

2. Предложена методика расчета свободных колебаний неразрезных криволинейных тонкостенных стержней. Выполнены исследования спектра собственных частот в зависимости от геометрических размеров стержней, числа участков дискретизации, учета и неучета деформаций сдвига.

3. Приведена методика статического расчета неразрезных криволинейных пролетных строений. Представлены примеры расчета, данные о влиянии сдвигов, оценки устойчивости и сходимости построенной разностной схемы, способ повышения порядка точности решений.

4. Поставленный эксперимент подтвердил результаты теоретических исследований деформированного состояния неразрезных криволинейных тонкостенных стержней.

5. Для плоской в поперечном направлении модели грузового автомобиля даны оценки перемещений и ускорений инертных элементов и функции динамического давления на путь при движении по круговым кривым и движения через одиночные неровности импульсного типа.

6. Предложен алгоритм расчета случайных колебаний криволинейных в плане пролетных строений автодорожных мостов с учетом сдвигов и инерции вращения при движении бесконечной колонны подвешенных грузов по стохастическому неровному пути. Динамические коэффициенты, полученные в результате вероятностного анализа, оказались в одних случаях выше, в других - ниже нормативных.

По разработанным алгоритмам автором составлен комплекс программ на языке Фортран-IV для ЕС ЭМ.

НТБ  
ДНУЖТ

Материалы диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Журавлев В.А. Действие кинематических импульсных возмущений на упругие системы с конечным числом степеней свободы // Исследования по статике и динамике стержневых и тонкостенных систем.- Воронеж: Изд-во Воронежск. ун-та, 1983.- С. 85-98.

2. Хмыров А.Ф., Аверин А.Н., Журавлев В.А. Разностная схема расчета свободных колебаний неразрезных тонкостенных стержней с плоской криволинейной осью // Изв. вузов. Стр-во и архитектура.- 1984.- № 4.- С. 34-38.

3. Аверин А.Н., Журавлев В.А., Хмыров А.Ф. Расчет колебаний неразрезного криволинейного тонкостенного стержня с учетом сдвигов и инерции вращения под действием подвижной нагрузки // Инженерные задачи статки, динамики и устойчивости сооружений.- Воронеж: Изд-во Воронежск. ун-та, 1985.- С. 171-178.



ЛБ № 02110. Подписано к печати 05.II.86 г. Формат 60 x 84<sup>1</sup> /16.  
Объем 1,0 п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 390. Бесплатно.

Отпечатано на роталпринте Воронежского ордена Трудового  
Красного Знамени инженерно-строительного института.

394006, Воронеж, ул.20-летия Октября, 84.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ  
ДНУЖТ