

Оглавление

От автора.....	3
Введение.....	7

Часть 1 Действие подвижной инерционной нагрузки на мосты на ВСМ

Глава 1

Основы построения теории динамики мостов при действии инерционной нагрузки и движении ее с постоянной и переменной скоростями	15
1.1. К построению теории динамического расчета мостов в России	15
1.1.1. К истории расчета железнодорожных мостов на подвижную нагрузку	15
1.1.2. Пути совершенствования норм для ВСМ.....	19
1.2. Численный метод для решения задач динамики строительных конструкций (мостовых сооружений).....	23
1.2.1. Постановка задачи.....	23
1.2.2. Шаговая процедура – основа для решения задач динамики мостов при действии высокоскоростных подвижных, ударных, сейсмических и аэродинамических нагрузок	24
1.2.2.1. Построение пошаговой процедуры для системы с одной степенью свободы. Тестирование процедуры, анализ устойчивости и точности.....	24
1.2.2.2. Построение пошаговой процедуры для системы с n степенями свободы. Тестирование методики	32
1.2.3. Шаговая процедура для решения нелинейных задач, тестирование процедуры	35
1.3. Метод узловых ускорений – основа для расчета конструкций на действие подвижной инерционной нагрузки	37
1.3.1. Введение	37
1.3.2. Тестирование методики, решение задачи для случая движения груза вдоль балки с постоянной скоростью.....	39
1.3.3. Решение задачи и тестирование методики для случая движения груза вдоль балки с переменной скоростью	41

Глава 2

Методы динамического расчета балочных мостов при действии высокоскоростной подвижной нагрузки.....	47
2.1. Граничные стержневые элементы для моделирования рельсового пути у мостового перехода при действии скоростной железнодорожной нагрузки.....	47
2.1.1. Постановка задачи и основные условные обозначения для стержневых систем, моделирующих транспортные конструкции	47
2.1.2. Построение системы дифференциальных уравнений, описывающих движение системы стержневых элементов	52

2.1.3. Построение шаговой процедуры для исследования системы «мост— путь—система движущихся сил»	68
2.1.4. Построение шаговой процедуры для исследования системы «путь—мост— инерционная нагрузка»	69
2.1.4.1. Модель железнодорожного вагона (10 степеней свободы)	69
2.1.4.2. Расчет моста на действие железнодорожной подвижной нагрузки	72
2.1.5. Тестирование методики для расчета на неустановившуюся динамику рельсового пути при использовании граничных стержневых элементов на упругом основании	75
2.1.6. Действие железнодорожной нагрузки на рельсовый путь в зоне мосто- вого перехода	81
2.2. Достоверность вычисления динамических воздействий на путь в системе «состав—мост» и упрощенная динамическая модель пути на мосту ВСМ	88
2.2.1. Упрощенная динамическая модель рельсового пути в системе «состав— мост»	88
2.2.2. О необходимости учета полного вертикального ускорения колесной пары при высокоскоростном движении состава	98
2.3. Метод расчета на действие скоростной железнодорожной нагрузки пролет- ного строения моста при упрощенной модели рельсового пути в виде систе- мы подвижных упруго-вязких элементов	106
2.3.1. Методика для исследования совместных вертикальных и крутильных колебаний двухпутного пролетного строения, моделируемого тонко- стенным стержнем, и подвижного состава при его движении по мосту (вертикальная динамика состава)	106
2.3.1.1. Построение системы дифференциальных уравнений и алгоритма решения задачи	106
2.3.1.2. Результаты числовых экспериментов в условиях движения соста- ва по мосту при моделировании рельсового пути системой под- вижных упруго-вязких элементов	111
2.3.2. К определению критических скоростей балочных мостов на ВСМ	116
2.3.2.1. Действие железнодорожного скоростного состава на многопро- летный балочный мост при моделировании однопутных пролет- ных строений стержнями Бернулли—Эйлера	116
2.3.2.2. Изменение критических скоростей движения состава по мостам на ВСМ как итог числовых экспериментов для системы «ско- ростной состав—мост»	118
2.4. Метод расчета взаимодействия скоростной железнодорожной нагрузки и многопролетного моста при переменной скорости движения (вертикальная динамика)	123
2.5. Использование полудискретной модели железнодорожного пути при расчете балочных мостов малого пролета на скоростную подвижную нагрузку	128
2.5.1. Действие простейших силовых подвижных нагрузок на балки на упру- гом основании с переменными параметрами	128
2.5.2. Действие движущегося груза на балку, лежащую на упругом основании с переменными параметрами. Тестирование полудискретной модели пути	132
2.5.3. Действие железнодорожной нагрузки на систему «неоднородный путь— мост малого пролета» при моделировании рельса стержнем с учетом влияния инерции поворота сечения и перерезывающих сил	137
2.5.3.1. Постановка задачи и модель пути. Тестирование методики	137
2.5.3.2. Модель состава и вставного блока, моделирующего неоднород- ность железнодорожного пути	146

2.5.3.3. Уравнения взаимодействия систем «состав» и «путь—мост малого пролета»	147
2.5.3.4. Результаты числовых экспериментов и их обсуждение.....	148
2.6. Поперечная динамика скоростного состава при движении по двухпутному мосту, моделируемого тонкостенным стержнем	150
2.6.1. Историческая справка и постановка задачи для исследования поперечной динамики мостов на ВСМ	150
2.6.2. Модель пролетного строения и построение системы уравнений, описывающих колебания пролетного строения моста при действии подвижной силовой нагрузки	155
2.6.3. Модель подвижного состава и формирование системы уравнений, описывающих его динамику (модель системы «вагон—путь», 37 степеней свободы)	161
2.6.3.1. Решение вспомогательной задачи для учета зазоров в системе «колесная пара—рельс»	161
2.6.3.2. Формирование системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение механической системы «вагон—путь»	162
2.6.3.3. Построение шаговой процедуры для исследования вибраций скоростного состава и двухпутного пролетного строения	173
2.6.4. Результаты числовых экспериментов для системы «двухпутный мост—высокоскоростной состав»	174
Глава 3	
Методы динамического расчета мостов коробчатого сечения, используемых на ВСМ (пространственная модель подвижного состава).....	184
3.1. Метод расчета мостов коробчатого сечения на подвижную нагрузку на базе модального анализа при конечноэлементной дискретизации сооружения.....	184
3.1.1. Постановка задачи	184
3.1.2. Определение ускорений точек контакта с мостом движущейся системы сил	187
3.1.3. Методика составления уравнений колебаний вагона (пространственная модель, 31 степень свободы)	190
3.1.4. Формирование разрешающей системы уравнений и числовые эксперименты по оценке динамических коэффициентов.....	196
3.2. Метод расчета мостов на подвижную нагрузку с использованием прямого интегрирования (традиционный МКЭ и МКР).....	201
3.2.1. Построение разрешающей системы уравнений для решения задач подвижной нагрузки	201
3.2.2. Тестирование методики и решение задачи для случая движения по мосту системы неподдрессоренных масс с силовой нагрузкой.....	208
3.2.3. Исследование колебаний коробчатого пролетного строения моста при движении высокоскоростной поездной нагрузки. Резонансные режимы.....	215
Глава 4	
Методы динамического расчета рамных мостов и ферм при действии высокоскоростной подвижной железнодорожной нагрузки	222
4.1. Граничные стержневые элементы, матрицы A_N^h , B_N^h и C_N^h , формирующие связь между узловыми ускорениями и усилиями.....	222
4.1.1. Матрицы A_N^h , B_N^h и C_N^h для изучения изгибных колебаний элемента e_a в плоскости $\bar{0}_h \bar{y}_a \bar{z}_a$	222
	523

4.1.2. Матрицы A_N^h , B_N^h и C_N^h для изучения изгибных колебаний элемента e_n в плоскости $\bar{0}_n \bar{y}_n \bar{x}_n$	232
4.2. Граничные стержневые элементы при продольных и крутильных колебаниях стержней.....	233
4.2.1. Введение.....	233
4.2.2. Граничные стержневые элементы при продольных и крутильных колебаниях стержней на упругом основании	233
4.2.2.1. Граничные стержневые элементы при продольных и крутильных колебаниях стержней с учетом упругого основания	233
4.2.2.2. Граничные стержневые элементы при продольных и крутильных колебаниях стержней без упругого основания	238
4.3. Граничный элемент для изучения колебаний пространственных стержневых систем при использовании технической теории изгиба	240
4.4. Граничный элемент для изучения колебаний плоских стержневых систем	244
4.5. Стержневой граничный элемент для подвижной нагрузки при расчете произвольной стержневой системы.....	246
4.5.1. Формирование уравнений колебаний пространственной стержневой несущей конструкции при подвижной нагрузке.....	246
4.5.2. Уравнения колебаний подвижной нагрузки в виде скоростного железнодорожного состава	255
4.5.3. Построение шаговой процедуры для исследования совместных колебаний стержневой системы и подвижной инерционной нагрузки	256
4.6. Действие на рамную эстакаду (плоская модель) скоростного состава с постоянной скоростью движения	258
4.6.1. Тестирование граничных элементов в задачах подвижной нагрузки (действие на балку простейшей подвижной нагрузки)	258
4.6.2. Рамная эстакада (плоская модель) и скоростной состав. Резонансные скорости движения	260
4.6.3. Специализированный граничный элемент для изучения совместных колебаний рамных мостов и путевых конструкций при движении поездов	262
4.7. Действие на рамную эстакаду (пространственная модель) скоростного состава с постоянной скоростью движения	282
4.7.1. К вопросу формирования уравнений колебаний эстакады и скоростного состава	282
4.7.2. Методика составления уравнений колебаний системы «вагон—путь» (пространственная модель, 35 степеней свободы)	283
4.7.3. Построение шаговой процедуры для исследования колебаний системы «скоростной состав—путь—эстакада». Суперэлемент проезжей части моста.....	287
4.7.4. Модель эстакады для скоростного движения железнодорожных составов	288
4.7.5. Резонансные режимы в системе «эстакада—путь—состав»	291
4.8. Действие на мостовую ферму (пространственная модель) скоростного состава с постоянной скоростью движения.....	297
4.8.1. Граничный элемент для проезжей части при действии нагрузки с эксцентриситетом.....	297
4.8.2. Модели мостовой фермы и скоростных составов	303
4.8.3. К вопросу определения критических скоростей движения состава по мостовой ферме.....	305

Часть 2

Действие аэродинамических и сейсмических нагрузок на мосты

Глава 5

К аэродинамическому расчету балочных пролетных строений мостов	311
5.1. Историческая справка и основные предпосылки в задачах аэродинамики мостов	311
5.2. Метод для определения критического состояния пролетного строения в форме изгибно-крутильного флаттера, построенный на основе характеристических определителей	325
5.2.1. Постановка задачи для балочных мостов	325
5.2.2. Построение методики на основе характеристических определителей для определения критического состояния пролетного строения в форме изгибно-крутильного флаттера	327
5.2.3. Тестирование методики по определению критических скоростей изгибно-крутильного флаттера	330
5.2.4. Расчет тонкостенного пролетного строения для определения его критического состояния	331
5.3. Численный метод определения критического состояния в форме изгибно-крутильного флаттера для балочного пролетного строения, моделируемого тонкостенным стержнем	336
5.3.1. Постановка задачи	336
5.3.2. Использование аэродинамических коэффициентов для построения методики на основе численного метода в задачах изгибно-крутильного флаттера балочных мостов	337
5.3.3. Тестирование методики для определения критических скоростей численным методом	340
5.3.4. Исследование аэродинамики пролетного строения (определение критических скоростей и частот)	342
5.4. Аэродинамика балочных мостов, моделируемых тонкостенными стержнями, при действии инерционной подвижной нагрузки	347
5.4.1. Введение и постановка задачи о действии на мост подвижной инерционной нагрузки при поперечном ветровом потоке	347
5.4.2. Построение дифференциальных уравнений для системы «мост—состав» в условиях срывного флаттера для двухпутного пролетного строения моста, моделируемого тонкостенным стержнем	348
5.4.3. Численное решение системы разрешающих уравнений и обобщение полученных результатов в задаче срывного флаттера для пролетного строения моста в момент действия подвижной нагрузки	357

Глава 6

Сейсмические и подвижные нагрузки, действующие на мосты, расположенные на ВСМ (методы расчета)	364
6.1. Применение численных методов в задачах сейсмике строительных конструкций	364
6.1.1. Пути развития методики расчета строительных сооружений на сейсмические воздействия	364
6.1.2. Кинематическое возбуждение колебаний стержневой системы и ее расчет на воздействия, заданные акселерограммами	377
6.2. Метод расчета взаимодействия скоростных составов и двухпутных балочных мостов, моделируемых тонкостенными стержнями, при действии сейсмических воздействий	380
6.2.1. Действие на мост сейсмических и подвижных силовых нагрузок	380

6.2.1.1. Дифференциальные уравнения движения пролетного строения моста, моделируемого тонкостенными стержнями при действии подвижной силовой нагрузки	380
6.2.1.2. Разрешающая система уравнений для пролетного строения моста с учетом действия силовых и сейсмических воздействий	391
6.2.1.3. Примеры расчета мостовых сооружений, моделируемых тонкостенными стержнями, при действии сейсмического воздействия и силовой подвижной нагрузки	392
6.2.2. Действие на мост инерционной подвижной и сейсмической нагрузок, включая моделирование элементов безопасности в системе «двухпутный мост—состав»	394
6.2.2.1. Введение и постановка задачи для изучения динамики системы «мост—железнодорожный состав» при сейсмических воздействиях	394
6.2.2.2. Формирование системы дифференциальных уравнений движения системы «двухпутный мост—состав» при поперечных сейсмических воздействиях	396
6.2.2.3. Пример расчета сооружения на действие сейсмического воздействия и инерционной подвижной нагрузки, включая моделирование элементов безопасности в системе «двухпутный мост—состав»	402
6.3. Расчет мостовых сооружений, моделируемых стержневыми системами, на одновременное действие подвижных инерционных и сейсмических воздействий по заданным акселерограммам (пространственные модели)	406
6.3.1. К истории вопроса расчета мостовых ферм и рам на сейсмические воздействия	406
6.3.2. Граничноэлементная дискретизация пространственной мостовой фермы	408
6.3.3. Построение дифференциальных уравнений ферменного пролетного строения при движении силовой подвижной нагрузки и действии сейсмических воздействий	412
6.3.4. Подвижная железнодорожная нагрузка (пространственная модель вагона, система с 31 степенью свободы)	419
6.3.5. Построение разрешающей системы уравнений «скоростной состав—мостовая ферма» при действии поперечной сейсмической нагрузки, заданной акселерограммами	425
6.3.6. Результаты числовых экспериментов по расчету мостовых ферм при поперечных сейсмических воздействиях и подвижной нагрузке	427
6.3.7. К вопросу разработки элементов безопасности типа «ловушка» в системе «состав—путь—мост» при сейсмических воздействиях	434
Глава 7	
Сейсмозащита мостов (граничноэлементный подход)	438
7.1. Историческая справка и постановка задачи	438
7.2. Моделирование системы «мост—сейсмозащитные опорные устройства»	441
7.2.1. Модель моста как граничноэлементная система	441
7.2.2. Модели сейсмозащитных устройств	442
7.3. Дифференциальные уравнения, описывающие движение механической системы «мост—сейсмозащитные опорные устройства», и их решение	444
7.3.1. К построению граничных и жестких конечных элементов для решения задач сейсмозащиты мостов	444

7.3.1.1. Общие соотношения между полями ускорений и усилий для элементов $\{e_{1k}\}$, $\{e_{2k}\}$, $\{e_{3k}\}$, формирующих модель моста	444
7.3.1.2. Построение жестких конечных элементов для сейсмозащиты мостов $\{e_{1k}\}$, учитывающих сухое трение в момент сейсмических воздействий	447
7.3.2. Построение разрешающей системы уравнений движения для системы элементов $\{e_{1k}\}$, $\{e_{2k}\}$, $\{e_{3k}\}$ и шаговой процедуры для реализации задач сейсмозащиты	452
7.3.3. Редукция разрешающей системы уравнений	453
7.4. Числовые эксперименты для системы «мост–сейсмозащитные опорные устройства»	454
7.4.1. Решение тестовых задач для сейсмозащитных опорных элементов	454
7.4.2. Применение стержневых граничных и жестких конечных элементов для исследования колебаний фермы с опорными сейсмозащитными устройствами	459

Часть 3

Приложение 1

8.1. Определение положения центра изгиба для сечений тонкостенных стержней замкнутого профиля с ответвлениями	467
8.1.1. К расчету тонкостенных стержней замкнутого профиля	467
8.1.2. Тестирование методики по определению центра изгиба для поперечного сечения тонкостенного стержня замкнутого профиля	468
8.1.3. Определение центра изгиба для поперечного сечения пролетного строения моста, моделируемого тонкостенным стержнем замкнутого профиля с ответвлениями	472

Приложение 2

8.2. К расчету мостов на основе модального анализа	478
8.2.1. Определение спектра частот и форм собственных колебаний механической системы с конечным числом степеней свободы	478
8.2.2. Метод разложения по собственным формам в задаче вынужденных колебаний конечноэлементной механической системы	482

Приложение 3

8.3. О построении матрицы жесткости для конечноэлементной системы	486
8.3.1. Основные подходы к построению матриц жесткости для конечного элемента	486
8.3.2. Прямоугольные и треугольные КЭ при плосконапряженном состоянии и изгибе	487
8.3.3. К вопросу построения глобальной матрицы жесткости	500
Литература	501