

7 ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАСЧЁТОВ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

- 7.1 Виды расчётов искусственных сооружений
- 7.2 Гидромеханические расчёты мостовых переходов
- 7.3 Расчёты мостов по методу предельных состояний
- 7.4 Температурные расчёты мостов

7.1 Виды расчётов мостовых переходов

Мостовой переход – это комплекс инженерных сооружений включающих в себя мост, подходные насыпи и регуляционные сооружения. На рис. 7.1 приведен пример мостового перехода.



Рисунок 7.1 – Мостовой переход

Расчёты искусственных сооружений подразделяются на два вида:

- *гидромеханические расчёты мостовых переходов*, которые позволяют установить размеры мостового отверстия и произвести компоновку мостового перехода.

- *расчёты по предельным состояниям* – на прочность и устойчивость.

Ещё в 60-е годы прошлого века в нашей стране были сделаны попытки автоматизировать проектирование автодорожных мостов. Однако в настоящее время мостовые отделы проектных организаций, начавшие внедрение автоматизации значительно раньше дорожных, отстают от них и это отставание с течением времени увеличивается. Такое положение связано с разделением проектировщиков мостов на конструкторов и расчётчиков. Это нарушает

непрерывный процесс проектирования. Перед проектировщиками сейчас стоят задачи по разработке и внедрению проектирующих программ, в результате использования которых проектировщики мостов будут одновременно и конструировать, и рассчитывать свои конструкции одновременно.

7.2 Гидромеханические расчёты мостовых переходов

Они включают в себя гидрологические (определение расходов, уровней, глубин и скоростей воды), морфометрические (определение параметров поперечного сечения реки в створе моста) и русловые расчёты (прогноз размывов и отложений наносов).



Рисунок 7.2 – Образование островов в результате наносов у Октябрьского моста в г. Красноярске

Гидромеханические расчёты мостовых переходов реализованы в *комплексной методике*, которая включает в себя [1]:

- расчёт во времени общих размывов (т.е. общего понижения дна водотока в результате размыва, вызванного стеснением потока подходными насыпями);
- построение кривых свободной поверхности потока с учётом размывов в русле,
- прогноз русловых деформаций на значительном протяжении вверх и вниз от оси моста (образование островов и местных размывов у промежуточных опор моста).

Основа методики – одновременное решение трёх дифференциальных уравнений, описывающих физические законы сохранения массы и количества движения.

Первое уравнение – уравнение баланса наносов (уравнение Ф. Экснера). Оно описывает закон сохранения твёрдой фазы в речном потоке (сохранения массы твёрдых частиц наносов в потоке воды):

$$\frac{\partial G}{\partial t} = B \frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (7.1)$$

Второе уравнение – уравнение неразрывности (уравнение А. Сен-Венана¹). Оно описывает закон сохранения жидкой фазы (ненарушения сплошности воды):

$$\frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0. \quad (7.2)$$

Третье уравнение – уравнение неравномерного течения. Оно описывает закон сохранения количества движения:

$$i - \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\alpha}{2g} \cdot \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{Q^2}{K^2}. \quad (7.3)$$

В уравнениях введены обозначения: t – координата по времени, с; l – координата по ширине русла, м; y – координата по длине русла, м; B – ширина русла (фронта переноса наносов), м; h – глубина речного потока, м; ω – площадь живого сечения речного потока, м²; i – бытовой уклон свободной поверхности реки; Q – расход воды, м³/с; G – расход наносов руслоформирующих фракций, м³/с; v – средняя по сечению скорость воды, м/с; α – корректив кинетической энергии (Кориолиса²); α_0 – корректив количества энергии (Буссинеска³); K – расходная характеристика; g – ускорение свободного падения.

Данная система дифференциальных уравнений решается *методом конечных разностей* (МКР), в котором производные заменяются конечными разностями, непрерывные координаты и функции – дискретными. Заменяем какую-либо производную конечной разностью, например, $\frac{\partial G}{\partial x}$. Согласно определению производной можно записать

¹ *Адемар Жан Клод Сен-Венан* (1797 – 1886 г.г.) – французский учёный и инженер. В 1826 г. окончил **Парижскую Школу мостов и дорог** и получил квалификацию «**Инженер путей сообщения**». Ему принадлежат труды по теории упругости (принцип Сен-Венана), сопротивлению материалов и др. Заложил основы теории пластичности.

² *Гюстав Гаспар Кориолис* (1792 – 1843 г.г.) – французский математик, механик и инженер. В 1810 г. окончил Политехническую школу, а в 1812 - **Парижскую Школу мостов и дорог** и получил квалификацию «**Инженер путей сообщения**». Работал в области аналитической механики, дал определение понятия работы, живой силы; представил полное ускорение в виде переносного, относительного и кориолисова.

³ *Жозеф Валантен Буссинеск* (1842 – 1926 г.г.) – французский учёный, механик, член Парижской академии наук. Автор ряда работ по гидродинамике, термодинамике, теории упругости и оптике.

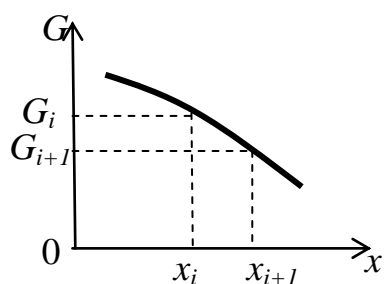


Рисунок 7.3 – Конечно-разностная сетка

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{G_{i+1} - G_i}{\Delta x} \right) \approx \frac{G_{i+1} - G_i}{\Delta x},$$

где $\Delta x = x_{i+1} - x_i$.

Тогда система дифференциальных уравнений (7.1) - (7.3) превратится в систему алгебраических уравнений.

7.3 Расчёты мостов по методу предельных состояний

В нашей стране с 1955 г. расчёты конструкций на прочность и устойчивость осуществляются по методу предельных состояний. Его суть заключается в том, что из всего множества возможных состояний объекта выбираются и проверяются лишь предельные, которые могут возникнуть при самом неблагоприятном сочетании нагрузок и воздействий. В общем виде условие непревышения предельного состояния может быть записано как

$$\Phi(F_n, R_n, \gamma_f, \gamma_m, \gamma_n, \gamma_c) \geq 0, \quad (7.4)$$

где F_n – нормативное значение обобщённого силового воздействия, R_n – нормативное значение несущей способности, γ_f – коэффициент надёжности по нагрузкам, γ_m – коэффициент надёжности по материалам, γ_n – коэффициент ответственности сооружения, γ_c – коэффициент условий работы.

Существуют два подхода к расчётам по предельным состояниям моста. Первый подход более простой и заключается в *расчленении моста на самостоятельные элементы* (плиты, главные балки, диафрагмы, опоры). Достоинства метода – простота и наглядность. Расчёты могут быть выполнены вручную с эпизодическим применением компьютеров. Недостатком данного подхода является то, что результаты расчётов могут оказаться неточными. Обычно эта неточность идёт в запас прочности, т.е. ведёт к утяжелению конструкции, перерасходу материалов.

Второй подход к расчётам конструкций – мост рассматривается, как единая система. Подход базируется на широко известном численном методе – *методе конечных элементов* (МКЭ). Он в настоящее время широко распространён и применяется от анализа напряжений в бетонных конструкциях до атомных станций и космических кораблей.

Суть метода конечных элементов заключается в том, что любой объект (конструкция) самой сложной формы представляется совокупностью некоторых элементов, имеющих конечные размеры (конечные элементы). В их качестве берутся простые геометрические фигуры – прямоугольники, треугольники (в

случае постановки плоской задачи), параллелепипеды, тетраэдры (в случае постановки пространственной задачи). Для мостов может быть применима и самая простая постановка задачи – замена моста стержневой системой, т.е. в качестве конечных элементов рассматривается отрезок. Эти элементы взаимодействуют между собой в вершинах элементов. Чем мельче элемент, тем точнее аппроксимация объекта конечными элементами.



Рисунок 7.4 – Вантовый мост в г. Красноярске

Рассмотрим вантовый мост (см. рис. 7.3). *Вантовый мост* – мост, состоящий из одного или более пилонов, соединённых с дорожным полотном посредством прямолинейных стальных тросов – *вантов*. В отличие от

висячих мостов, где дорожное полотно поддерживается вертикальными тросами, прикреплёнными к протянутым по всей длине моста основным несущим тросам, у вантовых мостов тросы (ванты) соединяются непосредственно с пилоном.

В самой простейшей модели конечным элементом является стержень, т.е. одномерный конечный элемент. Стержневая система приведена на рис. 7.5.

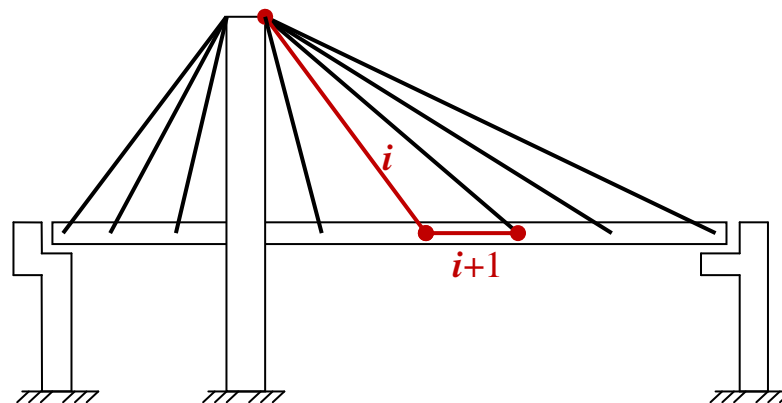


Рисунок 7.5 – Стержневая схема вантового моста

Любая характеристика мостового сооружения Φ (напряжения, перемещения, температура) представляет собой непрерывную функцию, областью определения которой является поверхность (объём в трёхмерной постановке задачи) всего объекта. Вводя конечные элементы, мы тем самым от непрерывной функции Φ

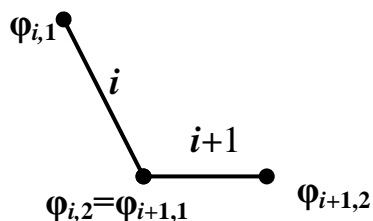


Рисунок 7.6 – Схема элементов

переходим к дискретной функции φ_i , у которой значения задаются только в узлах элементов (рис. 7.6). В промежутке между узлами (на i -м элементе длиной l_i) значение

$$\varphi_i = \alpha_i + \beta_i \cdot x, \quad (7.5)$$

$$0 < x < l_i.$$

Целью расчёта является определение неизвестных коэффициентов α_i и β_i на каждом элементе i . Для этого каждому элементу ставится в соответствие некоторый функционал. В частности в задачах на прочность и устойчивость в качестве такого функционала используется выражение для полной потенциальной энергии Π . Решение задачи находится в том случае, когда потенциальная энергия достигает минимума, т.е.

$$\frac{d\Pi}{dx} = 0. \quad (7.6)$$

Определив коэффициенты α_i и β_i на всех конечных элементах модели объекта, мы тем самым находим интересующую нас характеристику (напряжения или перемещения) во всём сооружении.

7.4 Температурные расчёты мостов

Результаты обследований эксплуатируемых железобетонных мостов со сроками службы, близкими к нормируемым, показывают, что 80 % из них имеют дефекты. Серьёзные дефекты возникают в зонах, где действуют наибольшие температурные напряжения. Это приводит к нарушению сплошности и герметичности бетона защитного слоя.

Температурное поле описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (7.7)$$

где a – коэффициент температуропроводности; T – температура; t – время; x, y, z – пространственные координаты.

Коэффициент температуропроводности определяется теплофизическими константами материала сооружения и вычисляется по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (7.8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоёмкость, ρ – плотность.

Для замыкания задачи на границах, т.е. поверхности моста, должны быть заданы краевые условия.

Начальное условие:

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T^0(x, y, z), \quad (7.9)$$

т.е. при $t = 0$ известно температурное поле в сооружении.

На границе соприкосновения двух твёрдых тел задаётся известная температура (граничное условие первого рода):

$$T = T_c = const \quad (7.10)$$

или поток тепла (граничное условие второго рода)

$$\frac{\partial T}{\partial x} = f(t). \quad (7.11)$$

На границе твёрдого тела и окружающей среды (граничное условие третьего рода)

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_g - T_c), \quad (7.12)$$

где α – коэффициент теплопередачи (принимается из экспериментов), T_g – температура воздуха, T_c – температура на границе тела.

Для решения такой задачи используется метод конечных элементов. Структура конечных элементов при определении температурного поля и поля напряжений может быть принята одинаковой. В качестве функционала – температурный баланс.

Источники информации

1. Федотов, Г.А. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог / Г.А. Федотов. – М.: Транспорт, 1986. – 317 с.
2. ГОСТ 3 54257-2010 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. – М.: Стандартинформ, 2011. – 18 с.