

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ.....	5
1.1. Область применения тонкостенных покрытий.....	5
1.2. Конструктивные решения монолитных тонкостенных покрытий.....	5
Вопросы для самоконтроля.....	7
2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭВМ.....	8
2.1. Краткие сведения из теории поверхностей.....	8
2.2. Краткие сведения из теории пологих оболочек.....	10
2.3. Методика вычисления усилий по безмоментной теории.....	11
2.4. Схемы разрушения оболочек положительной гауссовой кривизны.....	13
2.5. Приближенная оценка местных изгибающих моментов.....	15
2.6. Проверка устойчивости оболочки.....	15
Вопросы для самоконтроля.....	16
3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ.....	17
3.1. Общие требования к расчету.....	17
3.2. Методы расчета.....	17
3.3. Назначение жесткостных характеристик.....	18
3.4. Анализ результатов расчета.....	19
Вопросы для самоконтроля.....	20
4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЗДАНИЯ С ТОНКОСТЕННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ.....	21
4.1. Исходные данные.....	21
4.2. Нагрузки и воздействия.....	29
4.3. Предварительное назначение параметров жесткости.....	37
4.4. Формирование расчетной схемы.....	37
4.5. Анализ НДС.....	58
4.6. Определение требуемого армирования элементов здания.....	75
Вопросы для самоконтроля.....	84
5. РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННОГО ПОКРЫТИЯ (БЕЗ ЭВМ).....	85
5.2. Определение местных изгибающих моментов.....	86
5.3. Расчет прочности оболочки и конструирование.....	90
Вопросы для самоконтроля.....	92
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	93

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

1.1. Область применения тонкостенных покрытий

Тонкостенные пространственные покрытия впервые начали применяться в 20-е годы XX века в качестве элементов покрытий зданий различного назначения. Это были купола, цилиндрические оболочки. С развитием методик расчета большее распространение стали получать и оболочки двойной кривизны на прямоугольном плане.

Тонкостенные пространственные покрытия обладают рядом существенных преимуществ: сниженная масса за счет малой толщины, низкий расход материалов (на 25–40% меньше по сравнению с другими типами покрытий), возможность перекрытия значительных пролетов от 24 до 200 м, архитектурная выразительность.

В СССР применялись преимущественно сборные железобетонные тонкостенные пространственные покрытия, что отвечало принципам индустриализации. В настоящее время ввиду состояния производственной базы массовое применение сборных конструкций покрытия оказывается весьма затруднительно.

Применение тонкостенных пространственных конструкций целесообразно в зданиях, где необходимо обеспечить значительные пролеты без устройства промежуточных опор. Как правило, это:

- общественные здания: здания зрелищных и культурно-просветительных учреждений (театры, клубы, концертные залы, цирки, спортивные сооружения, библиотеки, музеи, выставки и др.), вокзалы, аэропорты, физкультурно-оздоровительные комплексы, здания образовательных учреждений и т.п.;
- промышленные здания: складские здания, стоянки автомобилей, книгохранилища, производственные здания, покрытия резервуаров и т.п.;
- специальные здания и сооружения: защитные оболочки ядерных реакторов, покрытия цехов АЭС и ТЭС.

В курсовом проекте рассматривается отдельно стоящее общественное здание различного назначения в монолитном исполнении с опиранием гладкой монолитной оболочки переноса на ряды колонн. Контурная конструкция представлена криволинейным брусом.

1.2. Конструктивные решения монолитных тонкостенных покрытий

Оболочка. Конструкция покрытия в курсовом проекте представлена гладкой пологой оболочкой переноса с переменной толщиной. Конструктивное решение оболочки зависит от граничных условий, то есть от условий сопряжения тонкостенного покрытия с контурным брусом. Как правило, в монолитном исполнении оболочка опирается жестко на контурный брус без возможности перемещения вдоль контура, то есть обеспечивается полная совместная работа тонкостенной части покрытия и контурных конструкций.

Зоны утолщения определяют расчетом и устраивают в углах и по контуру здания. Угловые утолщения устраивают преимущественно для восприятия значительных сдвигающих и главных растягивающих усилий, а также для обеспечения прочности оболочки при разрушении по общей схеме. Контурные утолщения служат для размещения дополнительной арматуры вдоль контура, обусловленной растяжением приопорных зон, а также арматуры, ортогональной контуру — для восприятия местных изгибающих моментов.

Армирование оболочки выполняется четырьмя типами арматуры и определяется ее напряженно-деформированным состоянием (рис. 1.1). Армирование первого типа (т. н. косая арматура) устанавливается в углах оболочки в зоне углового утолщения. Ее назначение — восприятие главных растягивающих усилий. При значительных растягивающих усилиях арматуру этого типа выполняют преднапряженной. Армирование второго типа устанавливается ортогонально контурной конструкции и служит для восприятия отрицательных и положительных местных изгибающих моментов. Арматура третьего типа предусматривается для восприятия растягивающих усилий в надколонных зонах вдоль контурного элемента, причем может располагаться как в верхней зоне, так и одновременно в верхней и в нижней зонах в зависимости от уровня растягивающих усилий. Арматура четвертого типа устанавливается по всей площади оболочки, служит для уменьшения усадочных и температурных деформаций, и в таком случае она устанавливается конструктивно. Вторым назначением арматуры четвертого типа является восприятие местных изгибающих моментов при действии

сосредоточенных сил и на участках резкой смены величины равномерно распределенной нагрузки. Она устанавливается в количестве не менее 0,2% с шагом стержней 200–250 мм. При толщинах оболочки менее 100 мм армирование этого типа устанавливается в виде одной сетки, при большей толщине — в виде двух сеток у нижней и верхней граней.

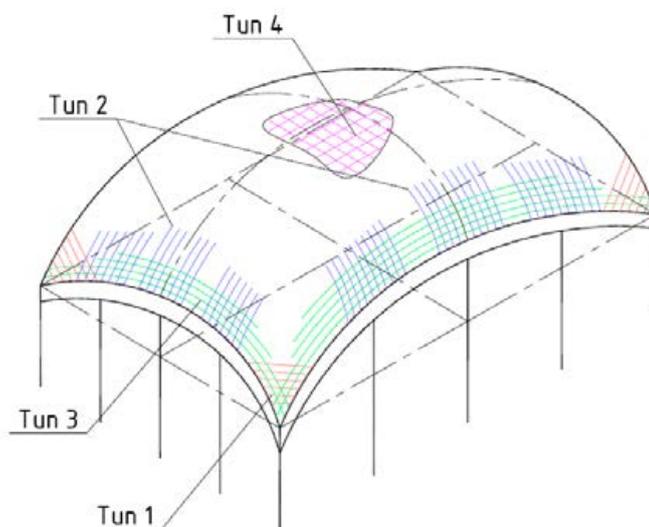


Рис. 1.1. Схема армирования оболочки

Контурные элементы. Контурные элементы проектируемого покрытия представлены криволинейным брусом, работающим как неразрезная балка как в своей плоскости, так и из нее. Ввиду эксцентричного приложения нагрузки от оболочки, в контурном бруске возникают существенные крутящие моменты, которые должны быть учтены при конструировании и расчете поперечного армирования. Сложное напряженно-деформированное состояние контурного бруса обуславливает необходимость установки расчетного продольного армирования не только в верхней и нижней зонах (определяется расчетом на действие изгибающих моментов в вертикальной плоскости), но и установку армирования боковых граней (из расчета на действие горизонтальной компоненты давления от оболочки). Контурный брус воспринимает распор от тонкостенной части покрытия, в результате в нем возникает растягивающее усилие. Армирование контурного бруса целесообразно выполнять симметричным. Следует особо отметить узел сопряжения контурного бруса с угловой колонной, который должен быть запроектирован как рамный узел, то есть с возможностью передавать опорный изгибающий момент с контурного бруса на колонну. Для обеспечения совместной работы контурного бруса с тонкостенной плитной частью оболочки необходимо устанавливать арматурные выпуски из контурного элемента в оболочку (рис. 1.2). При значительных сдвигающих усилиях по контакту оболочки и контурного бруса, которые не могут быть восприняты швом бетонирования, следует устраивать специальные мероприятия в виде шпонок, отгибов и пр.

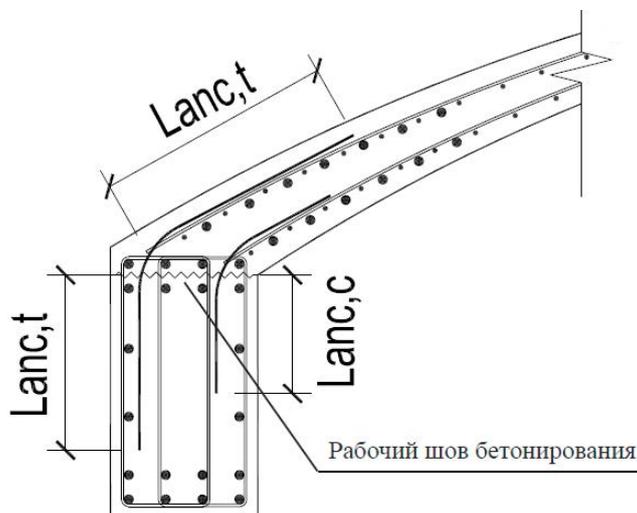


Рис. 1.2. Схема узла сопряжения оболочки и контурного бруса

Колонны. Колонны выполняются монолитными с симметричным продольным армированием. Угловые колонны работают при косом внецентренном сжатии, то есть в них возникают существенные изгибающие моменты в двух плоскостях, в рядовых колоннах — преимущественно из плоскости их положения. Ввиду значительных поперечных сил в колоннах поперечное армирование должно быть установлено по предварительному расчету. Узел сопряжения колонн с бортовым элементом выполняется путем заведения продольной арматуры колонн в контурный брус. Стык с фундаментами выполняется путем устройства арматурных выпусков. Узел сопряжения колонны с фундаментами выполняется жестким, поскольку при шарнирном сопряжении изгибающие моменты в уровне верха колонн оказываются значительными.

Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечивается совместной работой вертикальных несущих элементов — колонн, объединенных контурным криволинейным брусом с тонкостенным покрытием.

Вопросы для самоконтроля

1. Для покрытия каких зданий применяются тонкостенные пространственные конструкции?
2. Преимущества тонкостенных пространственных конструкций.
3. Конструктивные решения тонкостенных пространственных конструкций.
4. Армирование оболочек переноса положительной гауссовой кривизны.

2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭВМ

2.1. Краткие сведения из теории поверхностей

Для анализа напряженно-деформированного состояния оболочки (НДС) необходимо понимание расчетной схемы конструкции тонкостенного пространственного покрытия, которая принимается в виде поверхности без учета ее фактической толщины. Задача определения напряжений и деформаций в пространственном теле сложной формы не имеет аналитического решения даже в приближенном виде.

2.1.1. Методы математического описания поверхностей

Для описания произвольной поверхности применяют различные методы. Функция поверхности может быть задана:

- явно в виде $z = f(x, y)$;
- неявно в виде уравнения $F(x, y, z) = 0$;
- параметрически в виде системы уравнений

$$\begin{cases} x = x(i, j, k), \\ y = y(i, j, k), \\ z = z(i, j, k). \end{cases}$$

В строительстве применяют поверхности, как правило, образующие односвязные области (участки шаровых, цилиндрических и т.п. поверхностей, когда любые две точки могут быть соединены кривой, не пересекающей границу поверхности). При таком ограничении целесообразно рассматривать параметрическую зависимость от двух параметров: координат в плане или в криволинейной двумерной системе координат, сориентированной с рассматриваемой поверхностью. Поверхности, заданные в виде однозначных, непрерывных и дифференцируемых функций называются регулярными.

Тогда уравнение поверхности может быть записано в виде зависимости радиуса-вектора от двух параметров — (x, y) — координаты в плане или (ξ, η) — на поверхности:

$$\vec{r}(\xi, \eta) = x(\xi, \eta) \cdot \vec{i} + y(\xi, \eta) \cdot \vec{j} + z(\xi, \eta) \cdot \vec{k},$$

где i, j, k — базисные векторы декартовой системы координат вдоль осей X, Y, Z соответственно.

При задании поверхности в параметрическом виде касательные векторы вдоль криволинейных осей ξ и η в точке определяются как

$$\begin{aligned} \vec{r}_{\tau\xi} &= \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi}, \\ \vec{r}_{\tau\eta} &= \frac{\partial \vec{r}}{\partial \eta}. \end{aligned}$$

Элементарное расстояние между точками (элемент линии на поверхности):

$$ds = \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi} \cdot d\xi + \frac{\partial \vec{r}}{\partial \eta} \cdot d\eta.$$

В каждой точке трехмерной поверхности существует в общем случае два радиуса кривизны (рис. 2.1). Для поверхности вводится понятие кривизны, равное величине, обратной радиусу кривизны в точке и определяемое как:

$$k \vec{\nu} = \frac{d^2 \vec{r}(s)}{ds^2},$$

где $\vec{\nu}$ — вектор единичной нормали поверхности.

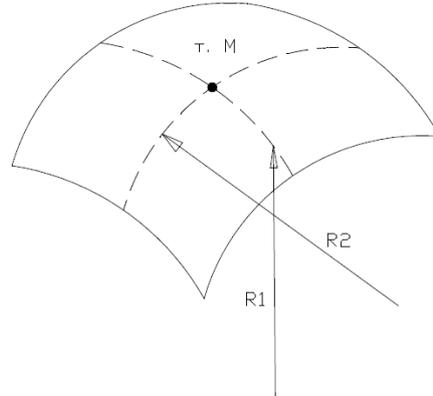


Рис. 2.1. Радиусы кривизны поверхности в точке М

Если поверхность задана однозначной явной функцией в декартовой системе координат, то ортогональные кривизны вдоль осей введенной системы координат определяются как:

$$k_x = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2},$$

$$k_y = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}.$$

Кривизна кручения

$$k_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \cdot \partial y}.$$

Для характеристики пространственной кривизны вводится понятие гауссовой кривизны:

$$\Gamma = \frac{1}{R_{m1} \cdot R_{m2}},$$

где R_{m1} и R_{m2} — радиусы главных кривизн поверхности, то есть радиусы кривизн в такой системе координат, когда кривизна кручения равна нулю. Гауссова кривизна также может быть получена и в декартовой системе координат:

$$\Gamma = \frac{k_x \cdot k_y - k_{xy}^2}{(1 + p^2 + q^2)^2},$$

где $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$.

2.1.2. Способы образования поверхностей

Поверхности могут быть образованы различными методами:

- поверхности вращения;
- поверхности переноса (трансляционные);
- складки, образованные системой плоских элементов или элементами других поверхностей;
- поверхности высших порядков.

Поверхности вращения (при вертикальной оси вращения) описываются явными функциями вида

$$z = f\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right).$$

Поверхности переноса описываются функциями вида

$$z = f_1(x) + f_2(y).$$

Произвольные поверхности двоякой кривизны описываются функциями вида

$$z = f_1(x) \cdot f_2(y).$$

Складчатые поверхности описываются с помощью сложных математических зависимостей с применением дельта-функций и других функций Хевисайда.

Рассматриваемая в рамках курсового проекта оболочка переноса описывается уравнением:

$$z(x, y) = R_1 + R_2 - \sqrt{R_1^2 - x^2} - \sqrt{R_2^2 - y^2},$$

где R_1 — радиус кривизны в направлении оси X ; R_2 — радиус кривизны в направлении оси Y .

Поверхность проектируемой оболочки образуется путем переноса параболы (дуги окружности) вдоль другой параболы.

Для рассматриваемой поверхности кривизны составят:

$$k_x = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{-R_1^2}{(R_1^2 - x^2)^{1,5}},$$

$$k_y = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{-R_2^2}{(R_2^2 - y^2)^{1,5}}.$$

Кривизна кручения равна нулю.

Как видно из полученных зависимостей, при координатах $x=0$ и $y=0$ кривизны равны величине, обратной радиусу. Гауссова кривизна в принятой системе координат, когда оси X и Y сонаправлены со сторонами оболочки, будет являться произведением ортогональных кривизн.

2.2. Краткие сведения из теории пологих оболочек

Если рассматривать пологие оболочки, то есть такие, в которых выполняется условие (рис. 2.2)

$$f_1 \leq \frac{a}{5} \text{ и } f_2 \leq \frac{b}{5},$$

то с достаточной степенью точности можно положить равенство криволинейных координат координатам на плане. Тогда уравнения равновесия принимает более простой вид:

$$\frac{\partial^2 N_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N_y}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 N_{xy}}{\partial x \cdot \partial y} = -E\delta \left[\frac{\partial^2 (k_y \cdot w)}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 (k_{xy} \cdot w)}{\partial x \cdot \partial y} + \frac{\partial^2 (k_x \cdot w)}{\partial y^2} \right],$$

$$k_x \cdot N_x + 2 \cdot k_{xy} \cdot N_{xy} + k_y \cdot N_y = D \cdot \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] - q,$$

где N_x, N_y, N_{xy} — усилия вдоль осей X, Y и сдвигающее усилие; w — прогиб; k_x, k_y, k_{xy} — кривизны.

Для решения данных уравнений вводится функция напряжений

$$N_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}; \quad N_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \quad N_{xy} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \cdot \partial y}.$$

Тогда уравнения примут вид:

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} = -E\delta \left[\frac{\partial^2 (k_y \cdot w)}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 (k_{xy} \cdot w)}{\partial x \cdot \partial y} + \frac{\partial^2 (k_x \cdot w)}{\partial y^2} \right],$$

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + 2 \cdot k_{xy} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \cdot \partial y} + k_y \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = D \cdot \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] - q.$$

Многочисленные исследования показали, что существенные изгибающие моменты действуют лишь в приопорных зонах оболочки, а также в особых точках (в точках резкой смены кривизны) и вблизи отверстий.

Для безмоментной теории оболочек полагается, что изгибная жесткость пренебрежимо мала, то есть $D=0$, тогда второе уравнение упрощается и принимает вид

$$k_x \cdot N_x + 2 \cdot k_{xy} \cdot N_{xy} + k_y \cdot N_y = -q,$$

или с учетом функции напряжений

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + 2 \cdot k_{xy} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \cdot \partial y} + k_y \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -q.$$

Таким образом, задача определения НДС сводится к определению функции напряжений при заданных граничных условиях. Вычисление функции напряжений производят с помощью численных методов приближенного решения дифференциальных уравнений (вариационный метод Бубнова—Галеркина, метод коллокации, метод сеток и т.д.).

Для анализа НДС оболочки требуется также вычисление главных усилий:

$$N_{m1,2} = \frac{N_x + N_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{N_x - N_y}{2} \right)^2 + N_{xy}^2}.$$

2.3. Методика вычисления усилий по безмоментной теории

А. Согласно п. 11.12 [5] допускается упрощенно определять усилия в элементах безмоментной оболочки положительной гауссовой кривизны при ее шарнирном опирании следующим образом. Схема оболочки и система координат показаны на рис. 2.2. Система координат принимается с центром в середине пролета, ось аппликат направлена вниз в сторону прогиба оболочки.

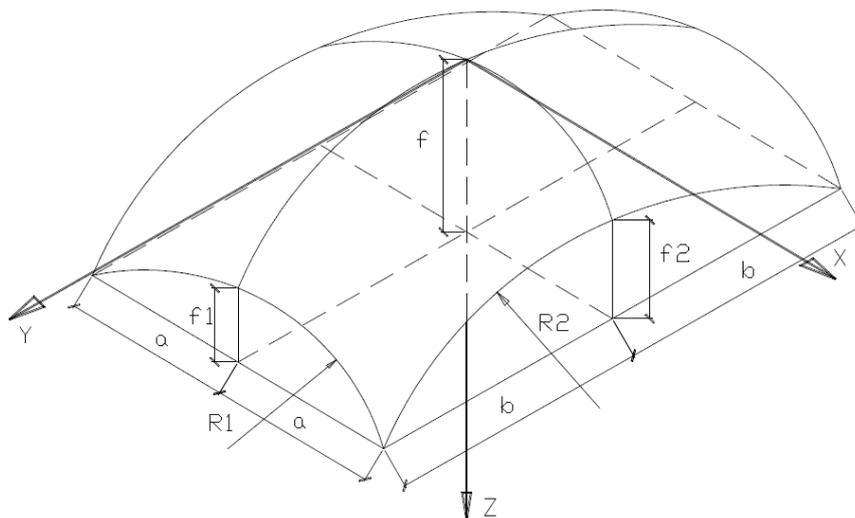


Рис. 2.2. Схема проектируемой оболочки положительной гауссовой кривизны и система координат

Усилие вдоль оси X:

$$N_x = 2 \cdot (x^2 - a^2) \cdot \left[C_1 + C_2 \cdot (6 \cdot y^2 + x^2 - b^2) \right],$$

усилие вдоль оси Y:

$$N_y = 2 \cdot (y^2 - b^2) \cdot \left[C_1 + C_2 \cdot (6 \cdot x^2 + y^2 - a^2) \right],$$

сдвигающее усилие:

$$S = -4 \cdot x \cdot y \cdot \left[C_1 + C_2 \cdot (2 \cdot x^2 + 2 \cdot y^2 - a^2 - b^2) \right].$$

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий при $x = \pm a$ $N_x = 0$ ($N_y \neq 0, N_{xy} \neq 0$), при $y = \pm b$ $N_y = 0$ ($N_x \neq 0, N_{xy} \neq 0$).

$$C_1 = \frac{5q}{8A} \cdot \left\{ 1 - \frac{B - A \cdot \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)}{B - \frac{5A \cdot B_1}{7B}} \right\},$$

$$C_2 = \frac{25q}{8} \cdot \frac{1 - \frac{A}{B} \cdot \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)}{a^2 \cdot b^2 \cdot B - \frac{5A \cdot B_1}{7B}},$$

при вспомогательных коэффициентах

$$A = k_1 \cdot a^2 + k_2 \cdot b^2,$$

$$B = k_1 \cdot \left(1 + \frac{5a^2}{7b^2} \right) + k_2 \cdot \left(1 + \frac{5b^2}{7a^2} \right),$$

$$B_1 = k_1 \cdot \left(2a^2 + 11b^2 + \frac{5a^4}{3b^2} \right) + k_2 \cdot \left(2b^2 + 11a^2 + \frac{5b^4}{3a^2} \right),$$

где кривизны

$$k_1 = \frac{1}{R_1},$$

$$k_2 = \frac{1}{R_2}.$$

Б. Согласно п. 11.10 [5] при шарнирном опирании оболочки по безмоментной теории нормальные усилии рекомендуется определять согласно следующим зависимостям:

$$N_1 = -\frac{2}{\pi} \cdot q \cdot R_1 \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{\cos \frac{\pi x}{2a}}{A} + \operatorname{arctg} \frac{\cos \frac{\pi x}{2a}}{B} \right] + \frac{4}{\pi} \cdot q \cdot R_1 \cdot e^{-\pi \theta} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a},$$

$$N_2 = -\left(q + \frac{N_1}{R_1} \right) \cdot R_2$$

$$S = \frac{q}{\pi} \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2} \cdot \left[\ln \frac{A + \sin \frac{\pi x}{2a}}{A - \sin \frac{\pi x}{2a}} - \ln \frac{B + \sin \frac{\pi x}{2a}}{B - \sin \frac{\pi x}{2a}} \right] + \frac{4q}{\pi} \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2} \cdot e^{-\pi \theta} \cdot C \cdot \sin \frac{\pi x}{2a}.$$

Коэффициенты:

$$\theta = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}},$$

$$A = \operatorname{sh}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \theta \cdot \left(1 - \frac{y}{b}\right)\right),$$

$$B = \operatorname{sh}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \theta \cdot \left(1 + \frac{y}{b}\right)\right),$$

$$C = \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi}{2b} \cdot \theta \cdot y\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \theta\right)}$$

В. В курсовом проекте выполняются статический и динамический расчеты оболочки, опертой на ряды колонн, а оболочка монолитно связана с контурным криволинейным брусом. Поэтому эпюры усилий, полученных в пп. А и Б несколько отличаются от распределения усилий в проектируемой оболочке.

Для достаточной в практических расчетах точности усилия должны быть определены в следующих точках (рис. 2.3) одного квадранта: в угловых точках, в точках на опорном контуре, а также на поверхности оболочки с шагом не более половины шага колонн. Для уточненного построения эпюр окажется необходимым произвести вычисления в промежуточных точках.

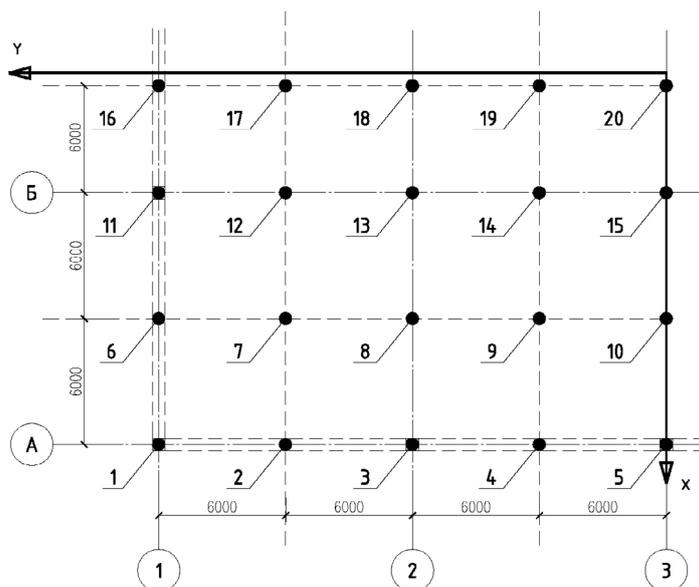


Рис. 2.3. Пример положения расчетных точек (показан один квадрант оболочки)

2.4. Схемы разрушения оболочек положительной гауссовой кривизны

Экспериментальные исследования выявили две схемы разрушения оболочек положительной гауссовой кривизны — местную и общую.

Общая схема разрушения, как правило, представляет собой пятидисковую схему излома (рис. 2.4). При такой схеме разрушения прогибы оболочки оказываются малыми по сравнению со стрелой подъема. Целью проведения расчета по предельному равновесию является подбор требуемого количества дополнительной косой арматуры в углах оболочки, а также общая проверка прочности.

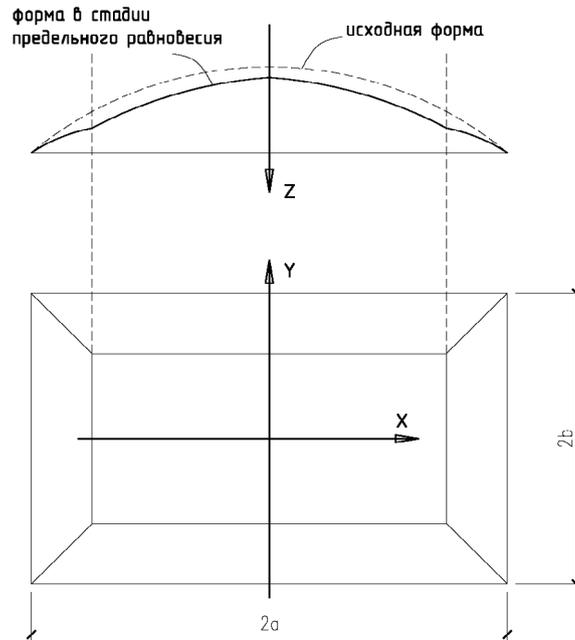


Рис. 2.4. Схема разрушения гладкой оболочки при равномерно распределенной нагрузке

Дополнительное армирование угловых зон определяется по формуле (п. 11.25 [5])

$$A_{45} = \frac{K \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot q - q_{sd} \cdot R_d^2 \cdot (\xi_d - \sin \xi_d) - R_{s,con} \cdot A_{con} \cdot (f + t)}{R_{s45} \cdot \sin \beta \cdot (f - t_1)},$$

где $K=1$ при шарнирном опирании оболочки на контур и $K=4$ при опирании по углам; $q_{sd} = \frac{b}{a} \cdot A_{sx} \cdot R_{sx} + \frac{a}{b} \cdot A_{sy} \cdot R_{sy}$ — усилие, воспринимаемое ортогональной арматурой сетки плиты оболочки в диагональном сечении; R_d — приведенный радиус кривизны диагонального сечения, определяемый как

$$R_d = \frac{a^2 + b^2 + f^2}{2f},$$

где $\xi_d = \arcsin \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{R_d}$ — угловая координата края оболочки в диагональном сечении; A_{con} — площадь сечения контурной арматуры, расположенной в контурных элементах на расстоянии t от плоскости, проходящей через вершины углов срединной поверхности; R_{s45} и $R_{s,con}$ — расчетное сопротивление соответственно косой арматуры и арматуры контурных элементов; β — угол наклона косой арматуры к диагонали; t_1 — расстояние от равнодействующей усилий в косой угловой арматуре до плоскости, проходящей через вершины углов срединной поверхности.

Местное разрушение обусловлено значительным изменением формы поверхности оболочки в ограниченной области. Одной из возможных схем местного разрушения железобетонных оболочек является образование одиночной вмятины, как правило, в угловых зонах. В рамках курсового проекта проверку прочности при местном разрушении допускается не производить (см. п. 11.28 и п. 11.31 СП 52-117-2008).

Другим возможным вариантом местного разрушения является образование вмятины под воздействием сосредоточенных сил (п. 11.35 СП 52-117-2008).

2.5. Приближенная оценка местных изгибающих моментов

Методика оценки величины местных изгибающих моментов в приопорной зоне оболочки основана на рассмотрении полосы элементарной ширины как полубесконечной балки на упругом основании, при этом в качестве аналога выступают продольные усилия в оболочке вдоль контурного бруса. Распределение моментов зависит от типа сопряжения тонкостенной части оболочки с контурной конструкцией.

Функция краевых изгибающих моментов вдоль линии, ортогональной контурному элементу при шарнирном сопряжении

$$M = 0,5 \cdot s^2 \cdot q \cdot e^{-\varphi} \cdot \sin \varphi,$$

где $\varphi = \frac{x}{s}$ — относительная координата; $s = 0,76 \cdot \sqrt{R \cdot \delta}$, δ — толщина оболочки, R — радиус кривизны вдоль контурного элемента.

Максимальный момент при шарнирном опирании составляет

$$M_{\max} = \frac{q \cdot s^2}{6}$$

и расположен в точке на расстоянии от контурного элемента

$$x_1 = \frac{\pi \cdot s}{4} = 0,597 \sqrt{R \cdot \delta}.$$

Функция местных изгибающих моментов вдоль линии, ортогональной контурному элементу при жестком сопряжении

$$M = 0,5 \cdot s^2 \cdot q \cdot e^{-\varphi} \cdot (\sin \varphi - \cos \varphi).$$

Максимальный момент при жестком опирании составляет

$$M_{\max} = -\frac{q \cdot s^2}{2}.$$

Эпюры моментов приведены на рис. 2.5.

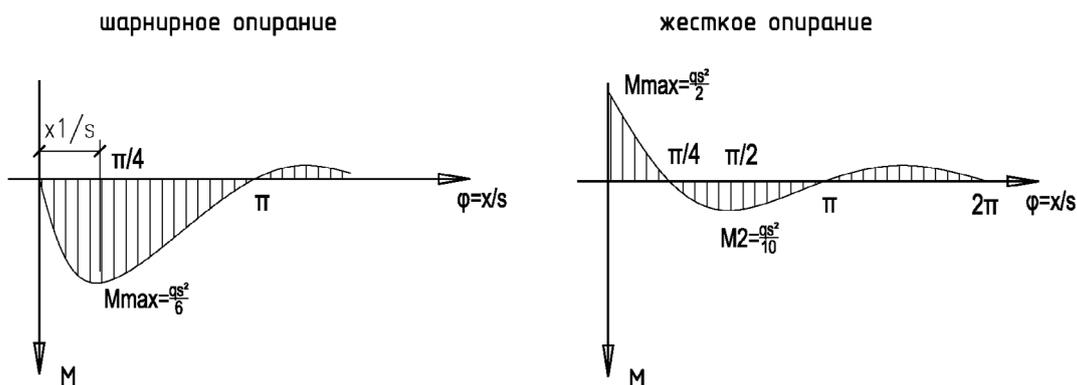


Рис. 2.5. Эпюры местных изгибающих моментов около контурных элементов

2.6. Проверка устойчивости оболочки

Расчет устойчивости оболочек положительной гауссовой кривизны в первом приближении рекомендуется производить из условия:

$$q \leq 0,2 \cdot E_{def} \cdot \left(\frac{\delta}{R} \right)^2,$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru