

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ.....	6
1.1. Область применения тонкостенных покрытий.....	6
1.2. Конструктивные решения монолитных тонкостенных покрытий.....	6
2. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭВМ.....	9
2.1. Краткие сведения из теории поверхностей.....	9
2.1.1. Методы математического описания поверхностей.....	9
2.1.2. Способы образования поверхностей.....	11
2.2. Краткие сведения из теории пологих оболочек.....	11
2.3. Методика вычисления усилий по безмоментной теории.....	13
2.4. Схемы разрушения оболочек положительной гауссовой кривизны.....	15
2.5. Приближенная оценка местных изгибающих моментов.....	16
2.6. Проверка устойчивости оболочки.....	17
3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ.....	19
3.1. Общие требования к расчету.....	19
3.2. Методы расчета.....	19
3.3. Требования к расчетным схемам метода конечных элементов.....	20
3.4. Назначение жесткостных характеристик.....	20
3.5. Анализ результатов расчета.....	22
4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЗДАНИЯ С ТОНКОСТЕННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ.....	23
4.1. Исходные данные.....	23
4.2. Нагрузки и воздействия.....	27
4.2.1. Нагрузки на покрытие.....	27
4.2.2. Нагрузки от ограждающих конструкций.....	30
4.2.3. Ветровые нагрузки.....	30
4.2.4. Загружения и сочетания нагрузок.....	32
4.3. Предварительное назначение параметров жесткости.....	33
4.4. Формирование расчетной схемы.....	34
4.4.1. Формирование геометрии.....	34
4.4.2. Задание жесткостных характеристик.....	44
4.4.3. Задание нагрузок и граничных условий.....	46
4.4.4. Формирование расчетных сочетаний усилий и нагружений.....	49
4.4.5. Расчет.....	51
4.5. Анализ напряженно-деформированного состояния.....	54
4.5.1. Проверка ограничений по деформациям.....	54
4.5.2. Анализ внутренних усилий.....	56
4.6. Определение требуемого армирования элементов здания.....	62
5. РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННОГО ПОКРЫТИЯ (БЕЗ ЭВМ).....	70
5.1. Расчет по зависимостям А раздела 2.3.....	70
5.2. Определение местных изгибающих моментов.....	74
5.3. Расчет прочности оболочки и конструирование.....	74
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	77

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие составлено на основании рабочей программы дисциплины «Спецкурс ЖБК» для выполнения курсового проекта и проведения практических занятий по направлениям подготовки 08.03.01 Строительство, 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений.

В рамках пособия разбирается пример выполнения курсового проекта по теме «Проектирование одноэтажного здания с тонкостенным пространственным покрытием в виде оболочки переноса» с привлечением проектно-вычислительных комплексов, реализующих метод конечных элементов.

Приведены основные расчетные предпосылки и примеры расчетов пространственного покрытия в виде оболочки переноса. Эти материалы возможно использовать для проведения практических занятий, подготовки контрольных и расчетно-графических работ.

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

1.1. Область применения тонкостенных покрытий

Тонкостенные пространственные покрытия впервые начали применяться в 20-е годы 20-го века в качестве элементов покрытий зданий различного назначения. Среди данных покрытий были купола, цилиндрические оболочки. С развитием методик расчета большее распространение стали получать и оболочки двойкой 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 железобетонные тонкостенные пространственные покрытия применялись преимущественно сборные, что отвечало принципам индустриализации. В настоящее время ввиду состояния производственной базы массовое применение сборных конструкций покрытия оказывается весьма затруднительным.

Использование 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 полой оболочкой переноса с переменной толщиной. Конструктивное решение оболочки зависит от граничных условий, т.е. от условий сопряжения тонкостенного покрытия с контурным брусом. Как правило, в монолитном исполнении оболочка опирается жестко на контурный брус без возможности перемещения вдоль контура, т.е. обеспечивается полная совместная работа тонкостенной части покрытия и контурных конструкций.

Зоны утолщения определяются расчетом и устраиваются в углах и по контуру здания. Угловые утолщения устраиваются 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 (НДС) (рис. 1.1). Армирование первого типа

(так называемая косая арматура) устанавливается в углах оболочки в зоне углового утолщения. Ее назначение — восприятие главных растягивающих усилий. При значительных растягивающих усилиях арматуру типа 1 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 нижней зонах в зависимости от уровня растягивающих усилий. Арматура четвертого типа устанавливается по всей площади оболочки, служит для уменьшения усадочных и температурных деформаций, в таком случае устанавливается конструктивно. Вторым назначением арматуры типа 4 является восприятие местных изгибающих моментов при действии сосредоточенных сил и на участках резкой смены величины равномерно распределенной нагрузки. Армирование типа 4 устанавливается в количестве не менее 0,2 % с шагом стержней 200–250 мм. При толщинах оболочки менее 100 мм армирование четвертого типа устанавливается в виде одной сетки, при большей толщине — в виде двух сеток у нижней и верхней граней.

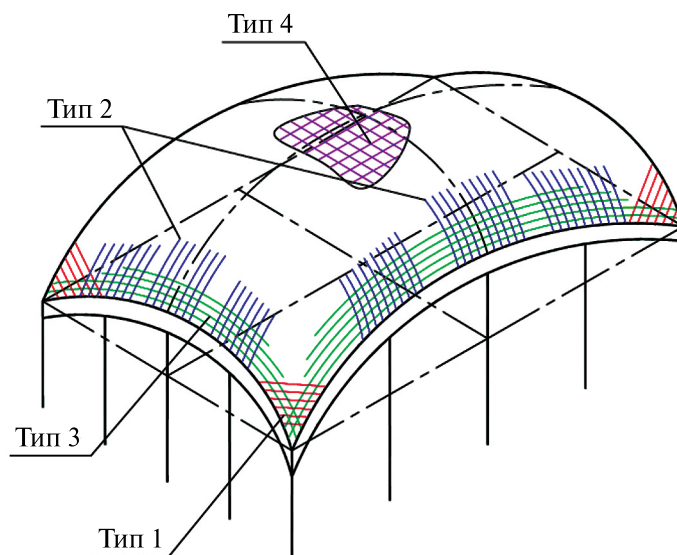


Рис. 1.1. Схема армирования оболочки

Контурные элементы. Контурные элементы проектируемого покрытия представлены криволинейным брусом, работающим в качестве неразрезной балки 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 в верхней и нижней зонах (определяется расчетом на действие изгибающих моментов в вертикальной плоскости) и установки 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, т.е. 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.

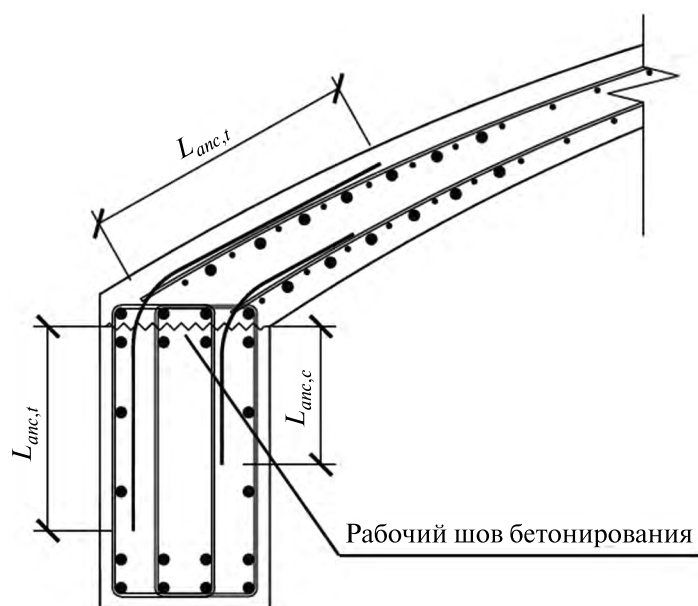


Рис. 1.2. Схема узла сопряжения оболочки и контурного бруса:

$L_{anc,t}$ — длина анкеровки растянутого стержня; $L_{anc,c}$ — длина анкеровки сжатого стержня

Колонны. Колонны выполняются монолитными с симметричным продольным армированием. Угловые колонны работают при косом внецентренном сжатии, т.е. в них возникают существенные изгибающие моменты в двух плоскостях. В рядовых колоннах возникают преимущественно из плоскости их положения. Ввиду значительных поперечных сил в колоннах поперечное армирование должно быть установлено по 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 обеспечиваются 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 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 тому подобных 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, ориентированной 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: координат в плане (x, y) или координат на поверхности (ξ, η) :

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

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — 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

$$\vec{r}_{\xi} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial \xi};$$

$$\vec{r}_{\eta} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial \eta}.$$

Элементарное расстояние между точками (элемент линии на поверхности):

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

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

$$k\vec{v} = \frac{\partial^2 \vec{r}(s)}{\partial s^2},$$

где вектор \vec{v} — вектор единичной нормали поверхности.

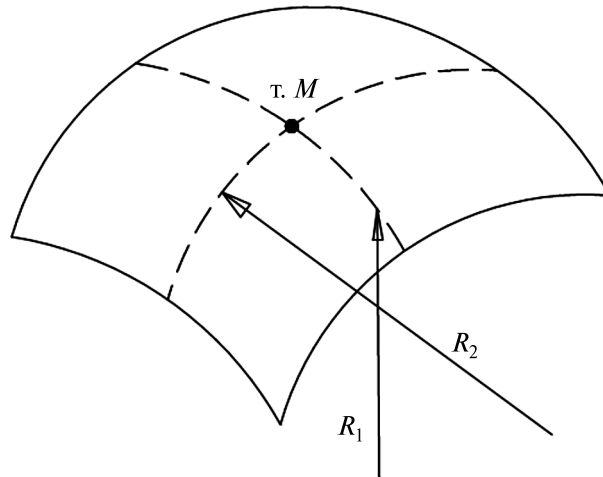


Рис. 2.1. Радиусы кривизны поверхности в точке M

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, т.е. радиусы кривизн в такой системе координат, когда кривизна кручения равна нулю. Гауссова кривизна также может быть получена и в декартовой системе координат:

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

где $p = \partial z / \partial x$; $q = \partial z / \partial y$.

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, т.е. такие, в которых выполняется условие

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

где a, b — размеры в плане (см. далее рис. 2.2), то с достаточной степенью точности можно положить равенство криволинейных координат координатам на плане. Тогда уравнения равновесия принимают более простой вид

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

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

где N_x, N_y, N_{xy} — соответственно усилия вдоль осей X, Y и сдвигающее усилие; w — прогиб; k_x, k_y, k_{xy} — кривизны; E — модуль деформации бетона; D — жесткость оболочки; δ — толщина оболочки.

Для решения данных уравнений вводится функция напряжений ϕ :

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

Тогда уравнения примут вид

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

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

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, т.е. $D = 0$, тогда второе уравнение упрощается и принимает вид

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

или с учетом функции напряжений:

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

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 СП 387.1325800.2018 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.

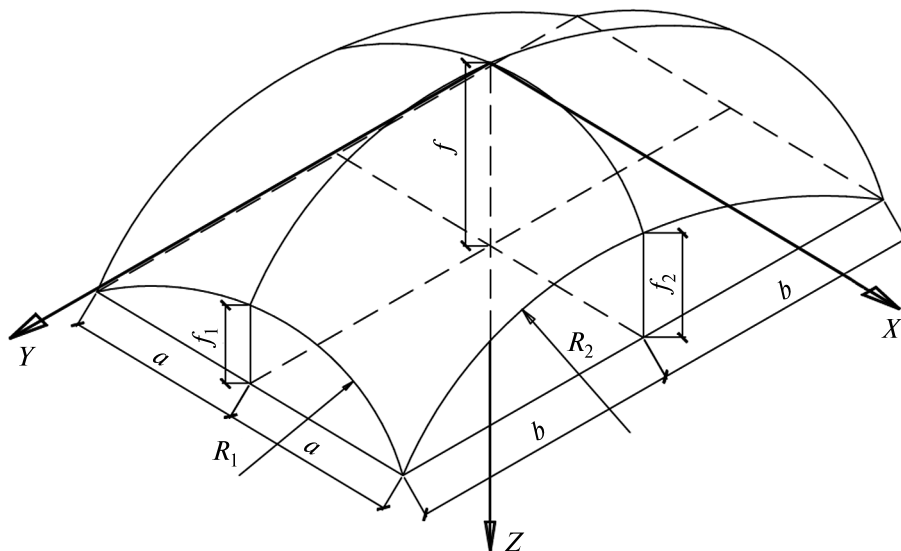


Рис. 2.2. Схема проектируемой оболочки положительной гауссовой кривизны и система координат

Усилие вдоль оси X :

$$N_x = 2(x^2 - a^2)[C_1 + C_2(6y^2 + x^2 - b^2)];$$

усилие вдоль оси Y :

$$N_y = 2(y^2 - b^2)[C_1 + C_2(6x^2 + y^2 - a^2)];$$

сдвигающее усилие:

$$S = -4xy[C_1 + C_2(2x^2 + 2y^2 - a^2 - b^2)].$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются из граничных условий:

при $x = \pm a$: $N_x = 0$ ($N_y \neq 0$, $N_{xy} \neq 0$);

при $y = \pm b$: $N_y = 0$ ($N_x \neq 0$, $N_{xy} \neq 0$).

$$C_1 = \frac{5q}{8A} \left(1 - \frac{B - A \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)}{B - \frac{5AB_1}{7B}} \right);$$

$$C_2 = \frac{25q}{8} \frac{1 - \frac{A}{B} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)}{a^2 b^2 B - \frac{5AB_1}{7B}}$$

при вспомогательных коэффициентах

$$A = k_1 a^2 + k_2 b^2;$$

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

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

где кривизны

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

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

Б. Согласно п. 11.10 СП 387.1325800.2018 при шарнирном опирании оболочки по безмоментной теории нормальные усилия N_1 , N_2 и сдвигающее усилие S рекомендуется определять согласно следующим зависимостям:

$$N_1 = -\frac{2}{\pi} q R_1 \left(\operatorname{arctg} \frac{\cos \frac{\pi x}{2a}}{A} + \operatorname{arctg} \frac{\cos \frac{\pi x}{2a}}{B} \right) + \frac{4}{\pi} q R_1 \cdot e^{-\pi \theta} \cdot C \cdot \cos \frac{\pi x}{2a};$$

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

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

где коэффициенты

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

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

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

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

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 п. 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.

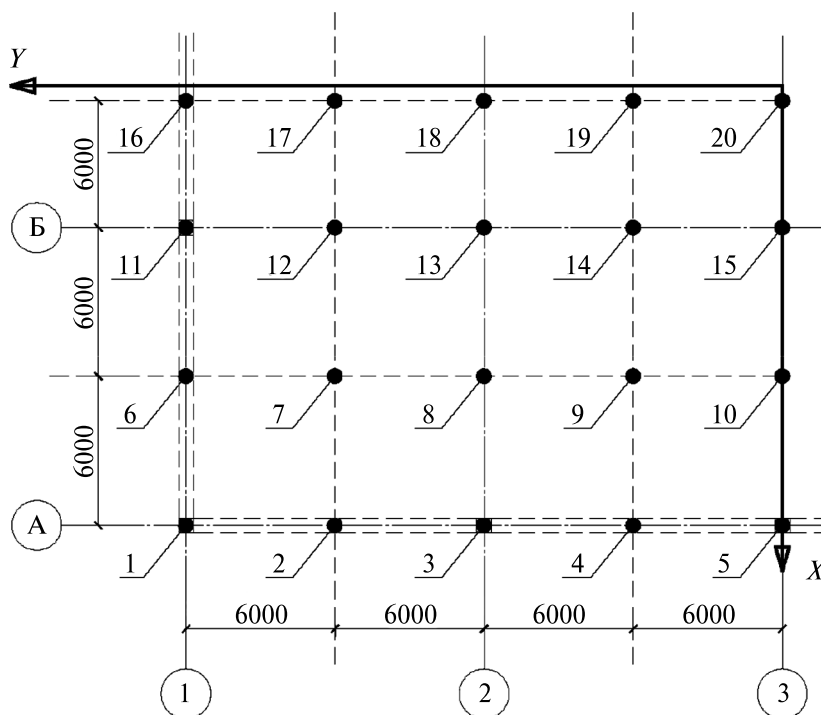


Рис. 2.3. Пример положения расчетных точек (показан один квадрант оболочки)

2.4. Схемы разрушения оболочек положительной гауссовой кривизны

Экспериментальные исследования выявили две схемы разрушения оболочек положительной гауссовой кривизны — местная и общая схемы разрушения.

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 кривой арматуры в углах оболочки, а также общая проверка прочности.

Дополнительное армирование угловых зон определяется по формуле (п. 11.20 СП 387.1325800.2018)

$$A_{45} = \frac{\frac{Ka^2b^2q}{3\sqrt{a^2 + b^2}} - q_{sd}R_d^2(\xi_d - \sin \xi_d) - R_{s,con}A_{con}(f + t)}{R_{s45} \cdot \sin \beta (f - t_1)},$$

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

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

ξ_d — угловая координата края оболочки в диагональном сечении, $\xi_d = \arcsin \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{R_d}$;

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.

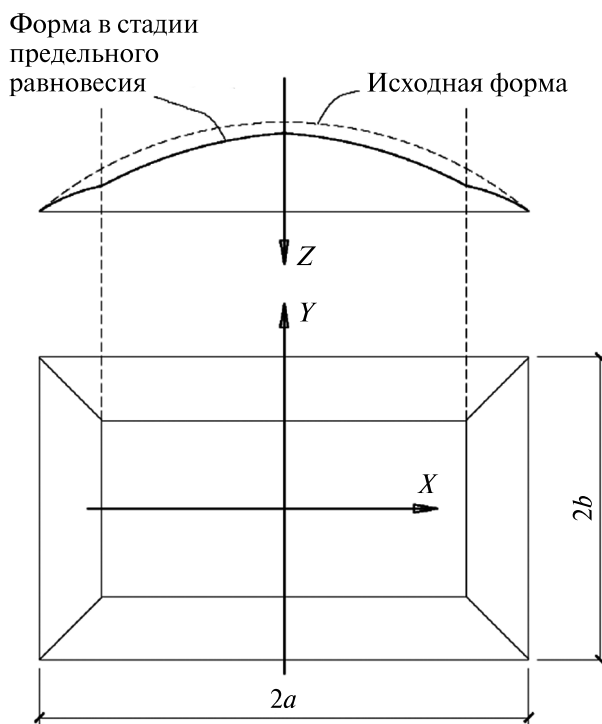


Рис. 2.4. Схема разрушения гладкой оболочки при равномерно распределенной нагрузке

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 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 аналогов 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:

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru