

Министерство науки, высшей школы и технической политики  
Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. Соколов

**ЗАЩИТНЫЕ ОБОЛОЧКИ  
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Учебное пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2003

## **Введение**

Современные атомные электростанции представляют собой сложный технологический комплекс, объединяющий ядерный реактор, различное оборудование, трубопроводные, электрические и контрольно-измерительные системы, а также целый ряд таких внешних элементов, как водоснабжение, аварийное электроснабжение, хранилища отходов и др.

Промплощадка АЭС любого типа включает в себя большое количество различных зданий и сооружений (рис. 1), основным из которых является главный корпус. В главных корпусах многих современных отечественных и зарубежных АЭС все оборудование первого радиоактивного контура размещено в герметичном объеме, заключенном в защитную оболочку того или иного типа конструктивного исполнения (рис. 2).

Создание надежных защитных сооружений, обеспечивающих безопасную работу АЭС, связано с проведением целого комплекса работ от разработки объемно-планировочных и конструктивных решений, определения напряженно-деформированного состояния от различных воздействий и их сочетаний, выбор материалов и конструирования отдельных элементов сооружения, до технико-экономических обоснований принятого варианта и, далее, до вопросов, связанных с технологией и организацией их возведения. Решением этих проблем занимались и занимаются в настоящее время многие научно-исследовательские и проектные институты, высшие учебные заведения и строительные фирмы.

Учебное пособие написано по материалам читаемого автором семестрового курса (лекции и курсовой проект) для студентов специальности “Промышленное и гражданское строительство”

специализации “ Строительство тепловых и атомных электростанций” на Инженерно-строительном факультете СПбГПУ.

В пособии отражена лишь часть перечисленных выше проблем, ориентированная в большей степени на выполнение студентами курсовых и дипломных проектов по разделу “ Конструирование и расчет элементов реакторных отделений АЭС”.

Представленный в пособии обзорный материал упорядочен в рамках классификации защитных оболочек, предложенной автором на основе анализа мирового опыта их создания. Классификация оболочек заметно отличается от имеющейся в литературных источниках. Не претендуя на то, чтобы стать общепринятой, такая классификация, вместе с тем, дает возможность студентам не просто познакомиться с обширным, главным образом, зарубежным опытом создания различных конструктивных форм, но и способствует умению самостоятельно сконструировать защитные сооружения, удовлетворяющее любым функциональным требованиям. Просматривая данную классификацию во времени, можно отметить поистине стремительное развитие конструктивных решений оболочек от первых простых форм до сложных современных сооружений повышенной надежности и безопасности, а значит увидеть развитие и движение инженерной мысли в данной области. Кроме того, упорядочение обзорного материала в хронологическом порядке с использованием иллюстраций и поясняющего текста способствует еще и лучшему его запоминанию.

Кроме обзорного материала по основным типам и конструктивным решениям реакторных зданий в виде оболочек в пособии приведена инженерная методика расчета усилий в элементах оболочки при особых воздействиях технологического характера, возникающих при прохождении аварийной ситуации уровня максимальной проектной аварии. Рассматривается напряженно-деформированное состояние при действии внутреннего избыточного давления и повышении температуры

среды под оболочкой по всему объему. Предложенные методики, основанные на принятых допущениях и использовании приближенных подходов из теории оболочек, с достаточной в инженерной практике степенью точности дают картину распределения усилий, вполне достоверную и приемлемую для разработки различных вариантов конструктивного исполнения сооружений и их сравнения, т.е. для этапа вариантного проектирования. По мнению автора, именно такой, самый простой, инженерный подход лучше воспринимается и осваивается студентами, т.к. позволяет на конкретных примерах сооружений при выполнении курсовых проектов найти применение полученным ранее знаниям ряда разделов высшей математики, сопротивления материалов и строительной механики, а также ознакомиться с элементами теории оболочек на уровне основ. Методика ценна еще и тем, что любая задача в рассматриваемых рамках может быть без особых затрат решена вручную без привлечения компьютерной техники.

Учебное пособие состоит из семи разделов.

В первых трех разделах представлены общие положения, назначение, классификация и обзорный материал по конструктивному решению защитных оболочек.

В четвертом разделе дана общая классификация нагрузок и воздействий на защитные оболочки в рамках общепринятого в современных Нормах подхода. Определены особенности построения основных и особых сочетаний нагрузок и воздействий для различных режимов работы рассматриваемых сооружений.

Пятый раздел посвящен описанию методики расчета усилий в элементах защитных оболочек при действии внутреннего избыточного давления.

В шестом разделе представлена методика расчета усилий в элементах защитных оболочек при температурных воздействиях. И пятый и шестой разделы завершаются описанием схем построения

решения при рассмотренных воздействиях для оболочек с различным конструктивным исполнением. Приводятся примеры построения эпюр внутренних усилий.

Седьмой раздел посвящен краткому описанию программы расчета защитных оболочек. Программа расчета усилий в элементах оболочек "SHILD" разработана студентом-дипломником Костровым Г.Д. во время работы над дипломным проектом под руководством автора.

Данная работа обобщает десятилетний опыт преподавания рассматриваемого курса на кафедре " Энергетические и промышленно-гражданские сооружения", но не заменяет читаемый курс полностью. Ряд положений, доказательств и зависимостей из теории оболочек даны без вывода, чтобы не усложнять изложения методик с точки зрения их практической направленности. Дополнить представленный материал необходимыми выводами, по мнению автора, целесообразно во время чтения лекций и ведения практических занятий.

Автор выражает искреннюю признательность д.т.н., проф. П.И.Васильеву, впервые на факультете в 1985 году прочитавшему цикл лекций, посвященный защитным оболочкам АЭС, а также к.т.н., доц. Н.А.Малинину, с помощью которого в этом же году впервые были заложены основы постановки соответствующего курсового проекта. Именно эти материалы и методические проработки легли в основу создания существующего семестрового курса, а также использованы при написании данного учебного пособия.

## **1. Назначение, общие сведения**

В реакторных отделениях атомных электростанциях в случаях возникновения аварийных ситуаций предусмотрены системы обеспечения локализации последствий выброса радиоактивной среды в пределах нескольких замкнутых герметических помещений, так называемых герметических боксов, либо в пределах одного герметичного объема, заключенного в защитную оболочку.

Согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), для реакторов мощностью от 10 до 100 МВт желательно устройство защитных оболочек; для реакторов большей мощности (100-1000 МВт) возведение защитных оболочек обязательно. В связи с этим система безопасности АЭС с применением защитных оболочек признана на современном этапе развития реакторостроения основным элементом защиты всех типов используемых корпусных атомных реакторов для промышленных АЭС, АЭСТ и АТЭЦ. Такая система защиты в наибольшей степени обеспечивает регламентируемую нормами безопасность персонала, населения и окружающей среды.

В настоящее время под защитной оболочкой( в защитном сооружением) понимают комплексную конструкцию, предохраняющую окружающую среду от радиоактивных выбросов при авариях и не допускающую разгерметизации сооружения при особых внешних воздействиях. При этом функции герметичности выполняет защитная оболочка, имеющая соответствующую систему герметичности, а функции защиты от внешних воздействий и функции биологической защиты – реакторное здание, которое тоже может быть решено в виде защитной оболочки (двойные оболочки). Эти функции могут быть и совмещены в одном объеме в виде комбинированной защитной конструкции, что стало наиболее часто применяться в последние годы и в зарубежной и в отечественной практике строительства АЭС.

Защитные оболочки для реакторных отделений АЭС применяются относительно недавно. Впервые защитная оболочка построена в США в 1953 году для защиты исследовательской реакторной установки Поллзской лаборатории, а далее она была применена уже на американских АЭС “SM-1” и “W-3”.

К настоящему времени во всем мире построено, строится и проектируется более 160 защитных оболочек различных типов защитных оболочек причем разнообразием конструктивных решений богат зарубежный опыт. Это объясняют различными причинами как социального характера (конкуренция, борьба за рынки сбыта), так и технико-экономическими, когда в условиях равной надежности различных конструктивных решений необходимо выбрать наиболее обоснованное для данного энергоблока [12].

Назначение защитных оболочек сводится к обеспечению безопасности при следующих технологических режимах и внешних воздействиях:

1. Локализация в объеме защитной оболочки последствий распространения радиоактивных продуктов в окружающую среду в установленных нормами пределах в случае максимально опасной проектной аварии (МПА). В качестве такой аварии можно рассматривать внезапный разрыв главного циркуляционного трубопровода системы I-го контура, в результате которого происходит нарушение проектных эксплуатационных режимом, резко повышается давление и температура в герметичном объеме. Могут также возникнуть последствия в процессе МПА, приводящие к разрушению технологического оборудования вследствие неконтролируемого движения разорванного трубопровода и возникающих при этом локальных воздействий на строительные конструкции.

2. Обеспечение безопасных условий эксплуатации реакторной установки, парогенераторов и другого технологического оборудования

при любых климатических воздействиях, таких как ветер, ураган, торнадо и др.

3. Защита технологического оборудования герметичного объема реакторного отделения от внешних особых динамических воздействий, таких, как ударная волна от возможных взрывов, удар потерявших управление, падающих летательных аппаратов.

4. Обеспечение сейсмостойкости строительных конструкций защитной оболочки и размещенного в ней технологического оборудования при сейсмических воздействиях, включая максимальное расчетное землетрясение (МРЗ).

Полезный объем защитных оболочек определяется, во-первых, в зависимости от габаритов и компоновки оборудования всего радиоактивного контура и, во-вторых, от принятого при проектировании аварийного давления. Чем меньше объем оболочки, тем выше расчетное давление, которое должно быть воспринято несущей конструкцией. Соотношение между объемом и внутренним давлением в оболочке предопределяет область применения видов защитных оболочек, которые в основном возводятся из стали и железобетона.

Чтобы представить общую картину достижений в области создания на АЭС защитных сооружений оболочечного типа, проследить пути развития инженерных решений и накопленный опыт при их конструировании, необходимо рассмотреть все разнообразие типов защитных оболочек или хотя бы их большинство. Именно эти соображения положены в основу в дальнейшем при изложении общей классификации защитных оболочек, при описании их типов и конструктивных особенностей, нагрузок и воздействий, учитываемых при проектировании, а также в описании используемых в инженерной практике методов расчета напряженно-деформируемого состояния.

## **2. Классификация защитных оболочек**

Классификацию защитных оболочек можно провести по следующим признакам:

- I. По уровню внутреннего аварийного давления (избыточного):
  - 1) оболочки полного давления (выше 0,035 МПа); большинство рассматриваемых оболочек относятся к этому типу;
  - 2) оболочки сниженного давления (ниже 0,035 МПа).
  
- II. По общей внешней форме оболочечной поверхности (рис.2.1):
  - 1) сферические в виде полного шара, как классической формы по восприятию внутреннего давления;
  - 2) цилиндрические с покрытием в виде полусферического купола и днищем, очерченным по полусферическим, пологой сферической или эллиптической поверхности;
  - 3) цилиндрические с полусферическим куполом и плоским днищем;
  - 4) цилиндрические с покрытием в виде пологого сферического или эллиптического купола с плоским днищем; цилиндрическая и купольная части соединяются с помощью сопрягающего элемента - кольцевой балки жесткости;
  - 5) цилиндрические с плоским покрытием и плоским днищем; при этом покрытие может быть в виде сплошной или структурной железобетонной конструкции с полостями для размещения элементов системы охлаждения;
  - 6) оболочки в виде усеченного конуса с плоской крышкой покрытия и плоским днищем;
  - 7) оболочки грушевидной формы; могут рассматриваться как разновидность комбинации основной сферической части и цилиндрического колодца.

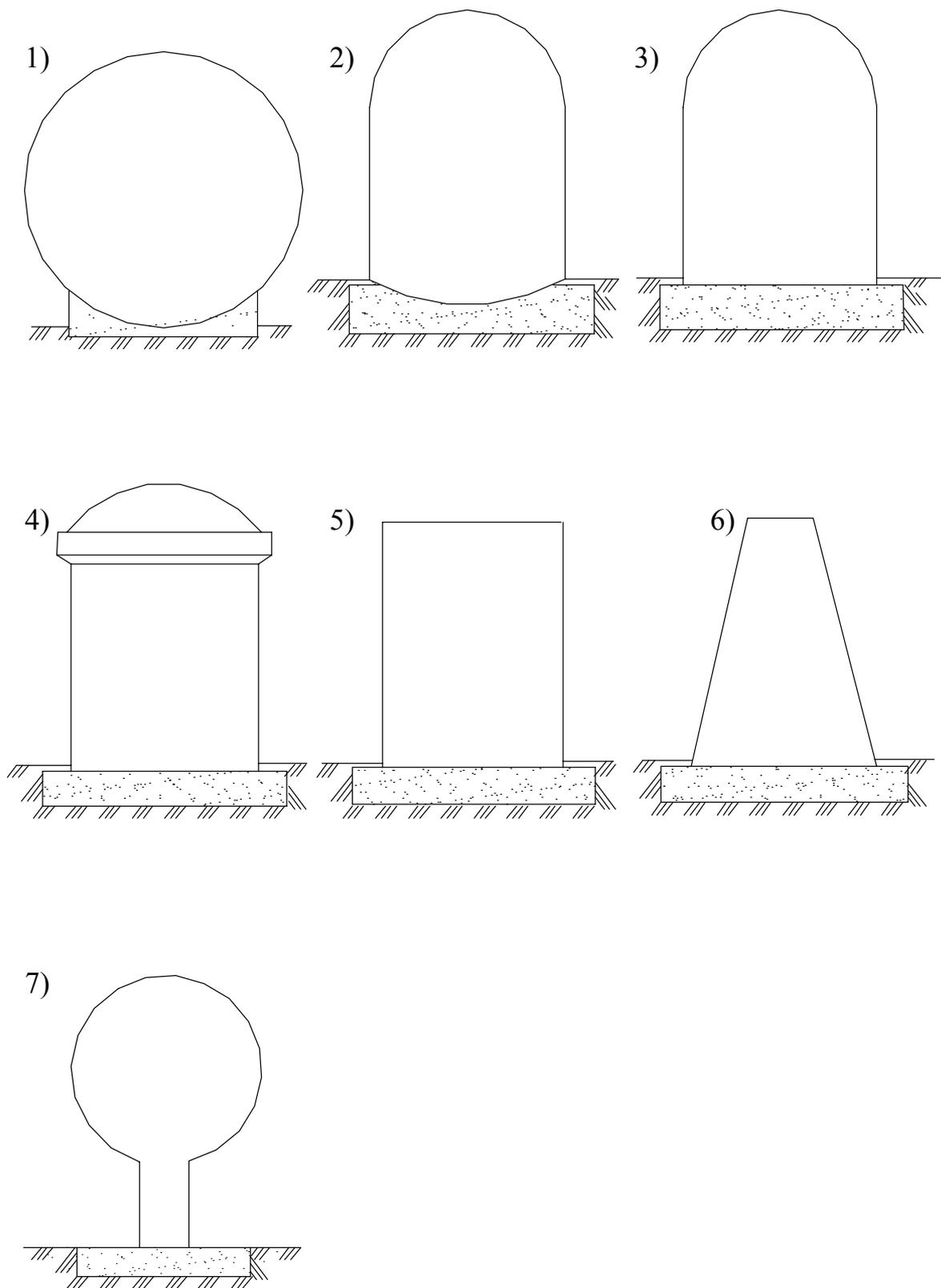


Рис.2.1. Разновидности форм защитных оболочек реакторных отделений АЭС

В ряде литературных источников в классификацию оболочек по общей форме включают сооружения призматического типа. Это неверно, так как эти сооружения не являются [7,13,22] оболочками по определению. Известно, что оболочками называются сооружения, форма образования которых основана на использовании криволинейных поверхностей вращения или переноса положительной, нулевой и отрицательной Гауссовой кривизны.

Следует также отметить, что большинство защитных сооружений АЭС оболочечного типа относятся к сложным составным оболочкам, построенным с использованием, в основном, комбинации цилиндрической и сферической поверхности в том или ином виде (“длинный” или “короткий” цилиндр с подъемистым полусферическим или пологим сферическим куполом).

III. По материалам изготовления – основной признак классификации защитных оболочек, заключающий в себе различия, рассмотренные и в предыдущих признаках, а также различия в конструктивном и компоновочном исполнении реакторных зданий в целом. Классификацию по этому признаку целесообразно представить схематично (рис. 2.2).

В следующем параграфе обзор типов и конструктивных особенностей защитных оболочек основан именно на представленной в схеме классификации и принятых в ней обозначениях.

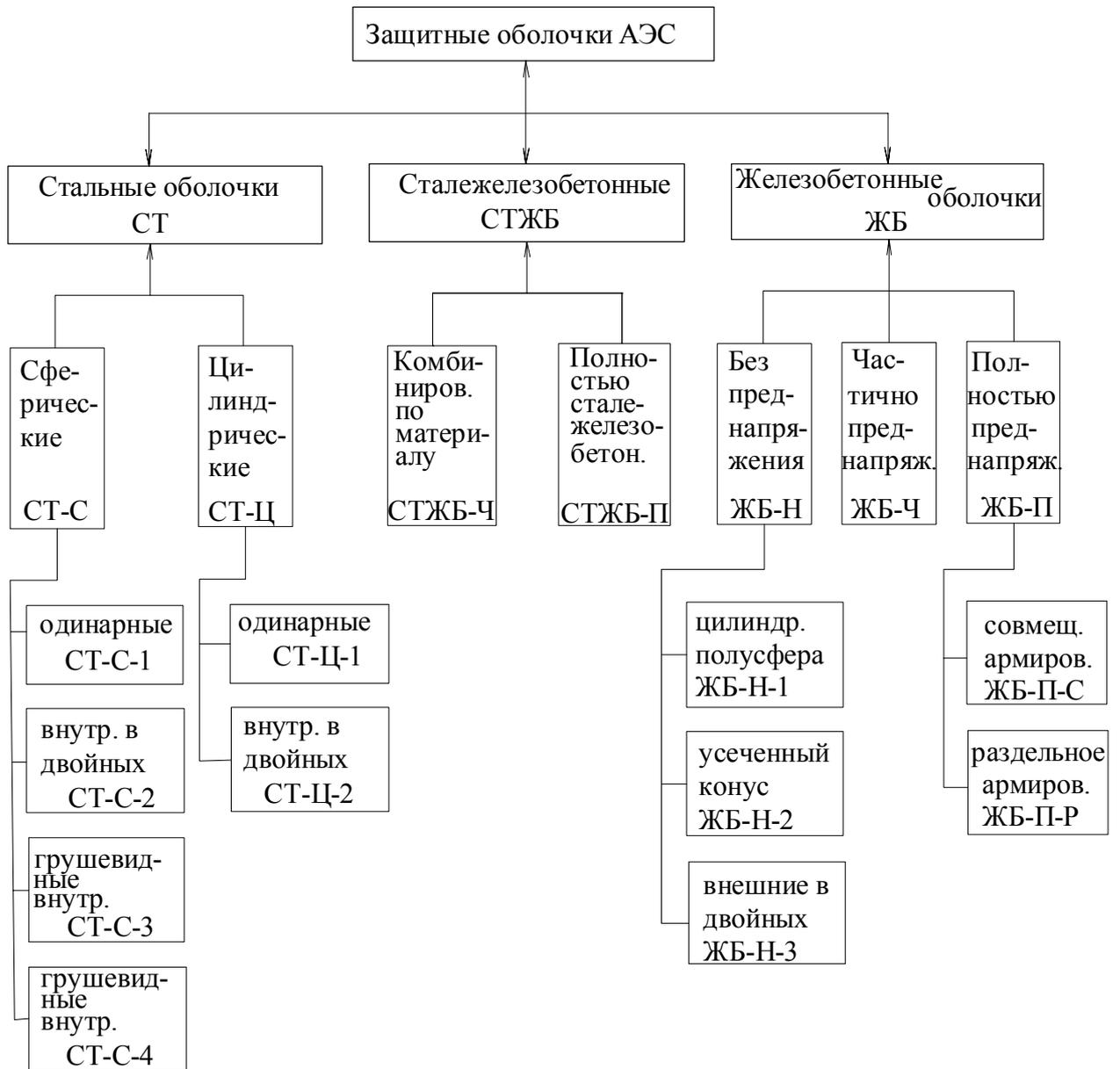


Рис.2.2. Общая классификация защитных оболочек реакторных отделений АЭС

### **3. Обзор и основные конструктивные решения защитных оболочек**

#### **3.1. Стальные оболочки – СТ**

##### А. Стальные оболочки с основной сферической частью (СТ-С)

1) Стальные сферические оболочки в виде полной сферы (СТ-С-1), представляющие собой одинарный шаровой объем с внутренней железобетонной биозащитой. Именно они появились первыми в мировой практике для защиты сначала исследовательских реакторных установок, а затем на АЭС для защиты энергетических реакторов малой мощности. Применены на АЭС “SW-1”, “W-3”, “Янки Атомик” и др. в США. Схематично представлены на рис. 3.1.

2) Стальные сферические оболочки в виде полной сферы (СТ-С-2), представляющие собой внутренний объем реакторного здания двойной оболочечной компоновки. Эти оболочки выполняют функции сосуда давления, воспринимают воздействия от резкого повышения внутренней температуры, а также функции герметичности. Функции биологической защиты возложены на внешнюю оболочку, относящуюся в представленной на рис. 2.2 классификации к типу ЖБ-Н-3. Кроме того, эта оболочка защищает реакторную установку от внешних воздействий.

Рассматриваемые решения нашли широкое применение при проектировании и строительстве защитных сооружений реакторной установки типа PWR в зарубежной практике, особенно в США и Германии. Фирмами этих государств разработаны проекты стандартного решения реакторного здания с оболочками подобного типа. При этом стальные оболочки по условиям свариваемости без специальной

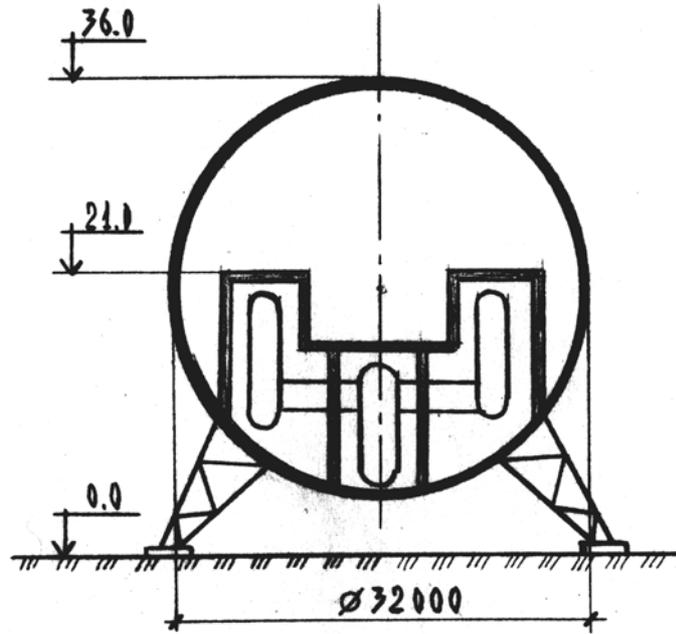


Рис.3.1. Одинарная стальная сферическая защитная оболочка

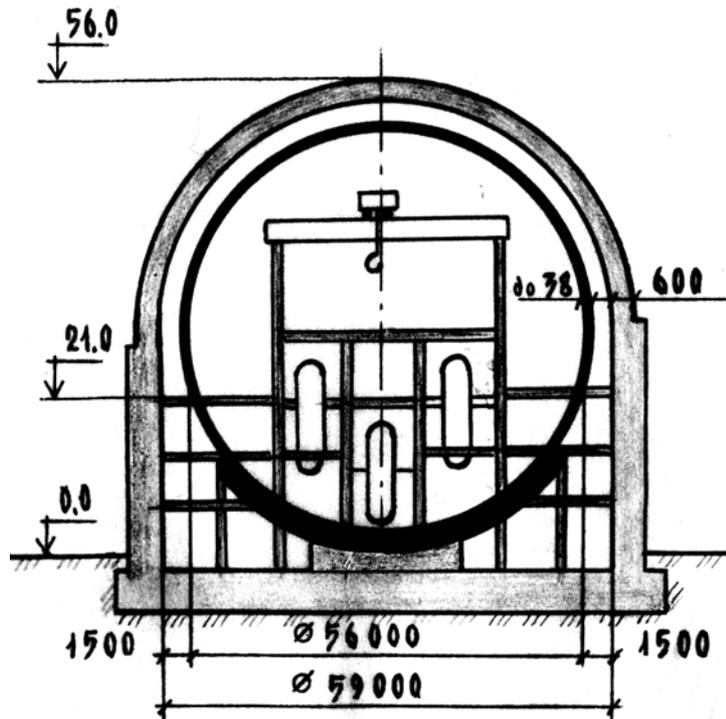


Рис.3.2. Внутренняя стальная сферическая защитная оболочка в реакторном здании двойного типа

термообработки в соответствии с нормами США изготавливаются из листовой вальцованной стали строительных марок толщиной не более 38 мм ( не более 1,5 дюймов). Оболочки имеют диаметр, изменяющийся от 44 м до 59 м. Общий вид реакторного здания с оболочками рассматриваемого типа схематично представлен на рис. 3.2, а в качестве характерных примеров можно привести энергоблоки следующих АЭС:

“Перкинс”, “Чироки”, “Индиан-Пойнт” и др. – США;

“Обригхейм”, “Штаде”, “Мюльхайм-

Кёрлих”, “Унтервезер”, “Крюммель”, “Библис - А”, “Библис - Б” и др. – Германия;

“Атуча” – Аргентина и т.д.

Всего в мире приблизительно 35 энергоблоков АЭС имеют такое решение реакторного здания.

Стальная оболочка АЭС “Обригхейм” ( мощность блока 600 МВт) диаметром 44 м выполнена из стальных вальцованных листов толщиной 30мм и рассчитана на избыточное давление 0,405 МПа. Внутренняя оболочка АЭС “Штаде” (мощность блока 630 МВт), имеющая диаметр 48 м и толщину 25 мм, рассчитана на избыточное давление 0,385 МПа. Оболочка блока АЭС “Библис - Б” (мощность 1300 МВт) имеет диаметр 59 м и толщину листа 35 мм, рассчитана на 0,60 МПа и повышение аварийной температуры внутри объема до 135 °С. Во всех вариантах реакторного здания с подобной компоновкой между наружной и внутренней оболочками предусмотрено пространство – вентилируемый зазор от 1,2 до 1,7 м.

3) Стальные оболочки грушевидной формы (СТ-С-3) в виде комбинированного сосуда давления, представленного основной сферической частью и нижним цилиндрическим колодцем. Оболочка находится внутри реакторного здания коробчатой конструкции,

выполненного в сборно-монолитном железобетоне. Разделение объемов здания по функциональным признакам аналогично рассмотренному выше. Основные размеры элементов рассмотрены на примере реакторного здания энергоблока АЭС “Тульнерфельд” (Австрия), схематично показанного на рис 3.3. Как видно, во внутреннем объеме сферической части оболочки расположена кольцевая барботажная камера как элемент системы локализации аварии. Приблизительно такими же являются решения реакторных зданий для энергоблоков АЭС “Филиппсбург” и “Брюннесбютель” (Германия), а также для ряда АЭС в США. Различия состоят лишь в компоновочном решении внешнего здания. Следует отметить, что подобное решение используется для защиты реакторных установок типа PRW небольшой мощности (200-400 МВт). Всего в мире оболочки такого типа применены на 11 АЭС.

3) Стальные оболочки грушевидной формы (СТ-С-4) в виде комбинированного сосуда давления, состоящего из основной сферической части и верхнего цилиндрического колодца. Оболочка находится внутри массивной железобетонной шахты грушевидной формы с толщиной стен до 3,0 м. Между шахтой и оболочкой предусмотрен вентилируемый зазор 0,5-0,7 м. Характерной особенностью является наличие в нижней части реакторного здания кольцевой барабанной камеры, соединяемой со сферической частью оболочки радиальными коллекторами и представляющей собой конструктивное решение системы сброса параметров давления и температуры в случае возникновения аварийных ситуаций в первом контуре. Основные размеры элементов рассмотрены на примере реакторного здания энергоблока АЭС “Найн-Майл-Пойнт” (США), схематично представленного на рис.3.4. Внешнее реакторное здание с оболочками рассмотренного типа представляет собой коробчатую конструкцию, выполненную в сборно-монолитном железобетоне.

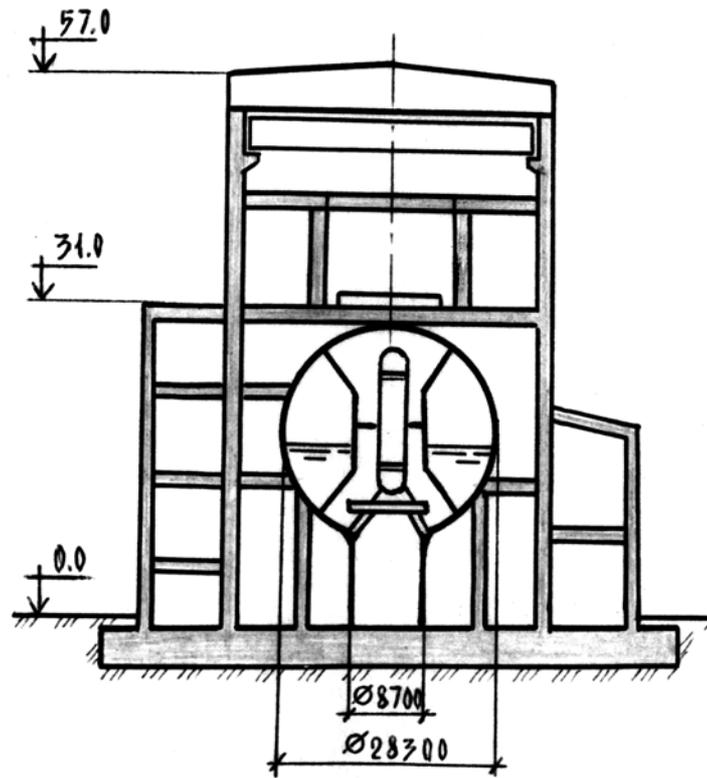


Рис.3.3. Внутренняя грушевидная защитная оболочка с нижним цилиндрическим колодцем

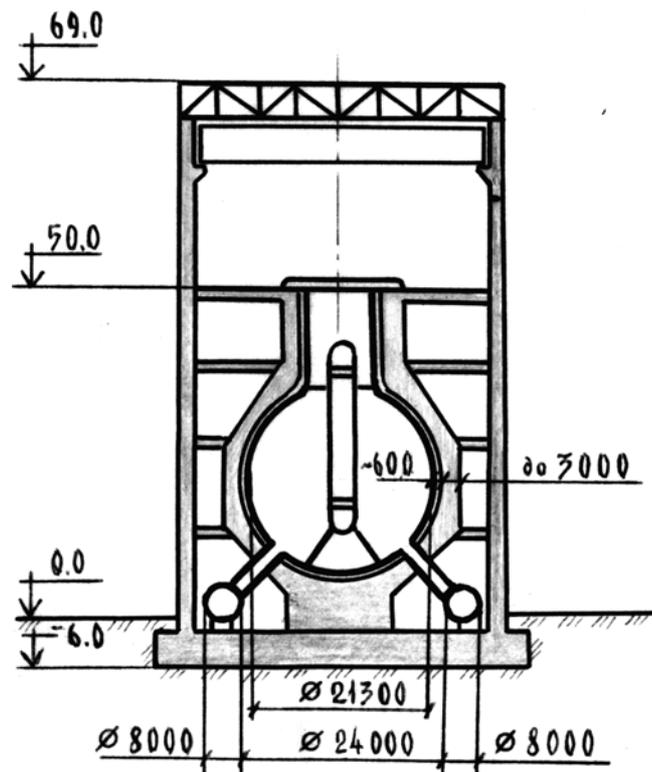


Рис.3.4. Внутренняя грушевидная защитная оболочка с верхним цилиндрическим колодцем

Разделение объемов здания по функциональным требованиям в данном случае принято следующим: оболочка с системой локализации аварии – герметичный сосуд давления, шахта - биологическая защита, реакторное здание- защита от внешних воздействий.

Рассмотренное решение реализовано в мировой практике в 8 случаях для АЭС с небольшой (200-400 МВт) мощностью энергоблока.

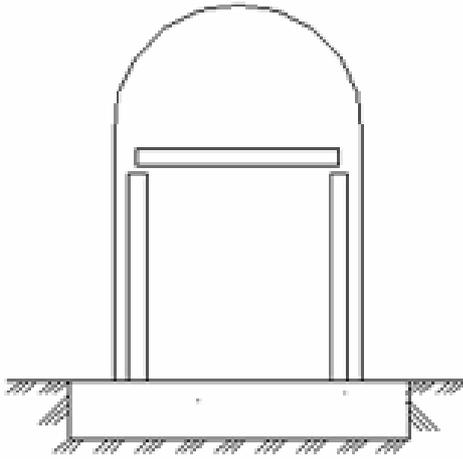
### Б. Стальные оболочки с основной цилиндрической частью (СТ-Ц)

Стальные оболочки такого типа представляют собой полый цилиндр с плоским или сферическим (эллиптическим) днищем и полусферическим купольным покрытием.

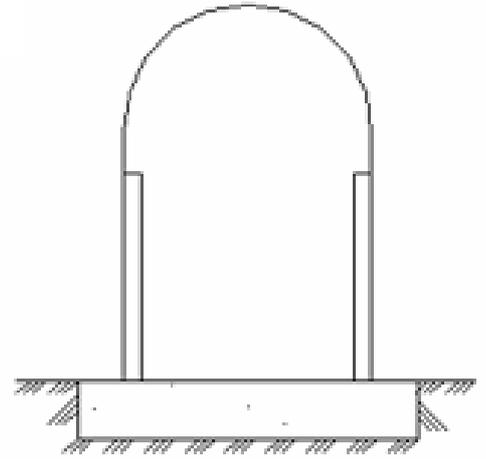
1) Цилиндрические одинарные оболочки (СТ-Ц-1), так же, как оболочки СТ-С-1, были первыми в практике строительства исследовательских реакторных установок, а затем на АЭС с энергетическими блоками малой мощности. Для таких установок существует несколько конструктивных решений в зависимости от взаимного размещения стальной оболочки и железобетонной защиты в реакторном здании. Имеются стальные оболочки АЭС, в которых биологическая защита располагается внутри помещения вокруг реактора и не входит в состав оболочки (рис.3.5,а). Такие решения применены на первых блоках АЭС “Гундреминген” (Германия), на АЭС “Виндскейл” (Англия), на АЭС “Симанэ” (Япония) [5]. Цилиндрические оболочки имеют внутри противоосколочную защиту в виде цилиндрической бетонной стенки без покрытия. Стенка в ряде случаев используется как несущая конструкция для полноповоротного мостового крана или другого оборудования.

Железобетонная защита может входить в состав оболочки и располагаться внутри стальной части, как, например, на АЭС “Дрезден”

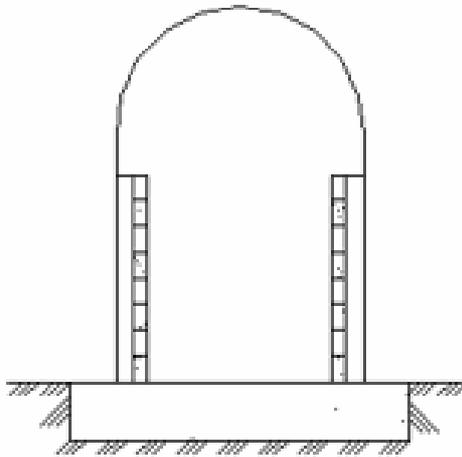
А)



Б)



С)



Д)

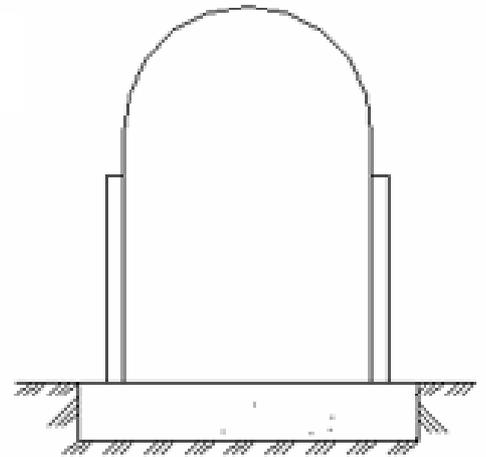


Рис.3.5. Конструктивные формы стальных цилиндрических оболочек

(США) и “Гарильяно” (Италия). В таких зданиях внутренняя железобетонная часть является и биозащитой и защитой стальной оболочки от ударных воздействий летящих масс в случае аварий, связанных с взрывом оборудования (рис.3.5,б).

Существует решение, когда внутренняя железобетонная биозащита для целей герметизации покрыта полимерным защитным слоем (рис.3.5,в). Возможно размещение железобетонной защиты снаружи по всей цилиндрической поверхности стальной оболочки (рис. 3.5,г).

2) Цилиндрические оболочки (СТ-Ц-2) являются внутренними герметичными сосудами давления в реакторных отделениях двойной оболочечной компоновки. Функциональное название объемов реакторного здания аналогично названию объемов зданий с оболочками типа СТ-С-2. Внешняя оболочка и в этом случае по схеме на рис.2.2 относится к сооружениям типа ЖБ-Н-3. Основные габаритные размеры элементов здания с оболочками рассматриваемого типа показаны на рис.3.6.

Представлен вариант с массивным фундаментом реакторного отделения и днищем внутренней стальной оболочки, очерченным по эллиптической поверхности. Данное конструктивное решение разработано для реакторных установок типа PRW и к настоящему времени применено приблизительно на пятидесяти энергоблоках зарубежных АЭС. В качестве характерных примеров можно привести следующие:

“Кьюони”, “Дейвис Бесс”, “Прери Айленд” и др. – США;

“Гундреминген”, “Линген” и др. – Германия;

“Ловииса” – Финляндия;

“Бецнау” – Швейцария;

проект АЭС НП-500 – Россия.

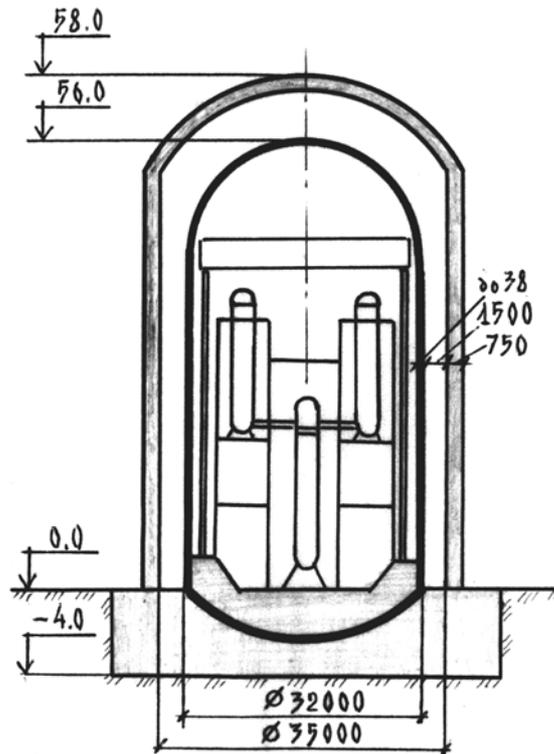


Рис. 3.6. Внутренняя стальная цилиндрическая защитная оболочка  
в реакторном здании двойного типа

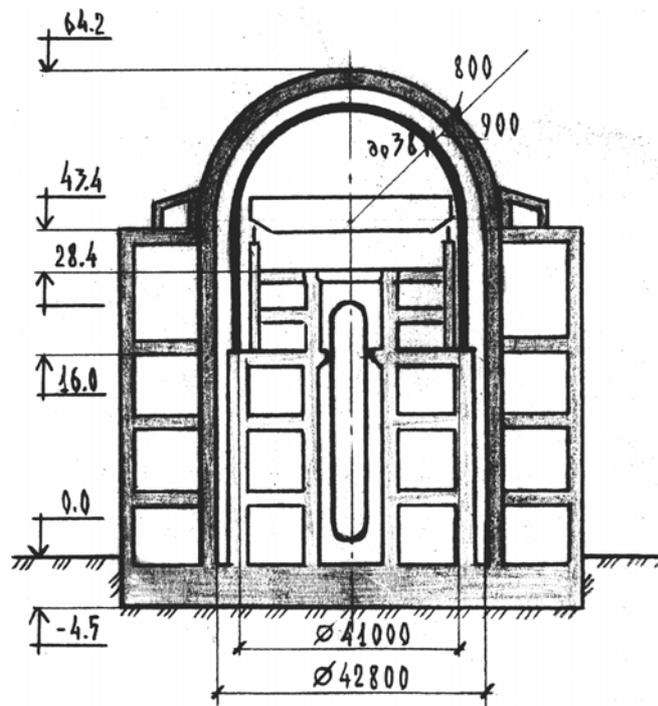


Рис. 3.7. Внутренняя стальная цилиндрическая защитная оболочка  
в реакторном здании АЭС НП-500

Стальные оболочки АЭС “Линген” (мощностью 240 МВт) имеют диаметр в цилиндрической части 30 м, высоту 63 м и толщину листовой вальцованной стали 30 мм, а покрытие толщиной 18 мм представляет собой полусферический купол. Оболочка испытана на герметичность избыточным давлением 0,475 МПа и рассчитана на температуру до 150<sup>0</sup>С.

Оболочка АЭС “Гундреминген” ( мощностью 240 МВт) аналогична оболочки АЭС “Линген”. Ее диаметр и высота равны 30 м, цилиндр сверху и снизу сопряжен с полусферами. Для цилиндра применен стальной лист толщиной 26,5 мм, для сфер – 13,5 мм. Для расчета приняты внутренне давление 0,54 МПа и температура в аварийной ситуации 150<sup>0</sup>С. Внешняя оболочка и в том и другом случае имеет толщину 38 см, изнутри покрыта слоем теплоизоляции толщиной 5 см. Между оболочками предусмотрен зазор до 1,5 м.

Стальной цилиндр оболочки АЭС “Прери Айленд” ( мощностью 2x550 МВт) сопрягается с покрытием в виде полусферы и днищем в виде эллипсоида. Полная высота равна 62,7 м, толщины стального листа в цилиндре, сфере и днище соответственно равны 38,1 мм, 19 мм, 38,1 мм. Оболочка рассчитана на избыточное давление 0,323 МПа и температуру 130<sup>0</sup>С. Наружная оболочка из железобетона с толщиной стенки 76 см покрыта пологим куполом с толщиной 61 см.

Компоновочное решение реакторного здания по проекту НП-500 схематично показано на рис. 3.7.

Внутренняя стальная оболочка толщиной 36 мм рассчитана на аварийное давление 0,48 МПа и температуру 150<sup>0</sup>С.

### 3.2. Сталежелезобетонные оболочки – СТЖБ

**А.** Частично сталежелезобетонная оболочка, комбинированная по материалу цилиндрической и купольной частей ( СТЖБ-4). Подобный тип оболочки существует в мировой практике в единственном экземпляре – на АЭС “ Дуглас-Пойнт” (Канада) с тяжеловодной реакторной установкой типа CANDU (мощностью 200 МВт). Оболочка состоит из железобетонной цилиндрической части с внутренним диаметром 35 м, высотой 45,0 м и толщиной 1,3 м и купольного покрытия радиусом 19 м из листовой стали толщиной 35 мм, переходящего в цилиндрической части в герметизирующую облицовку. Плита днища оболочки толщиной 3,0 м является одновременно фундаментной плитой всего реакторного здания. Таким образом, функции сосуда давления, герметичности, биозащиты и защиты от внешних воздействий в данном случае конструктивно совмещены в едином сооружении – реакторном здании оболочечного типа. Схематично оболочка представлена на рис. 3.8.

**Б.** Полностью сталежелезобетонная оболочка (СТЖБ-II) или оболочка из стальных ячеек, представляют собой конструкцию, состоящую из основной цилиндрической части и полусферического покрытия. Оболочка по всей поверхности имеет наружную и внутреннюю стальную облицовку. Между слоями облицовки устанавливаются армокаркасы и укладывается бетонная смесь. Толщина стен, таким образом, в цилиндрической части получается равной 1,2 м и далее постепенно уменьшается в купольной части до 1,0 м. Внутренний диаметр цилиндра 45 м, а высота 55 м. Плита днища имеет толщину около 3,0 м и является также фундаментной плитой всего реакторного здания. Толщины наружной и внутренней облицовок обосновываются и принимаются расчетом, т.е. облицовки помимо выполнения функций

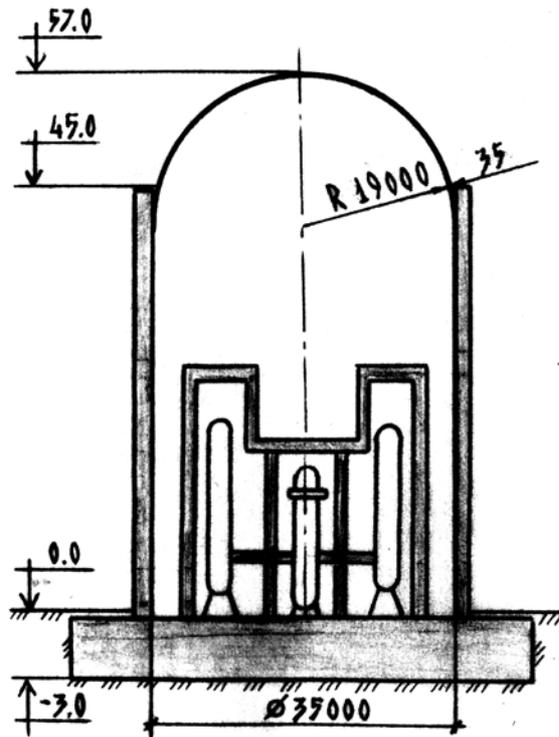


Рис. 3.8. Частично сталежелезобетонная защитная оболочка

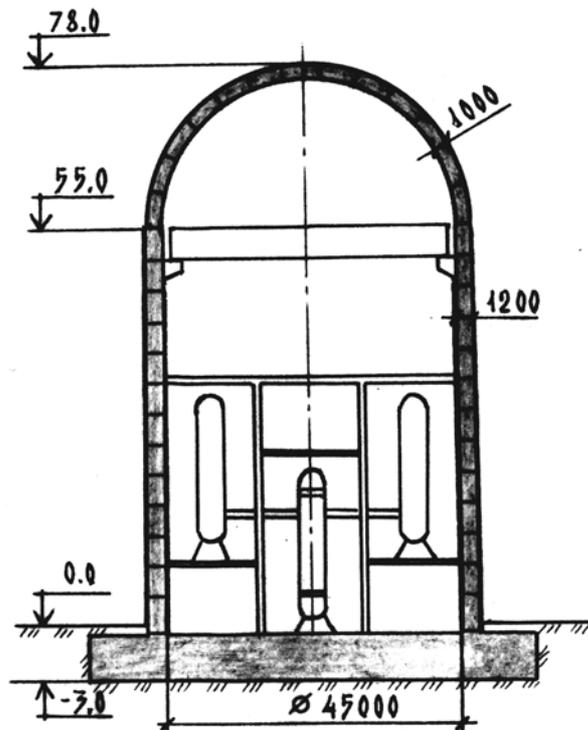


Рис. 3.9. Полностью сталежелезобетонная защитная оболочка

герметичности рассматриваются как внешнее листовое армирование, что достигается соответствующей анкеровкой облицовок в бетонном массиве для обеспечения сцепления и совместной работы стальных листов и бетонной стенки. Кроме того, стальные листы облицовки выполняют функции опалубки при ведении бетонных работ. Толщина внутренней облицовки в связи с этим меняется снизу вверх от 12 мм до 8 мм, а наружной – от 30 мм до 20 мм.

Оболочки такого типа представляются достаточно перспективным решением защитного сооружения, однако, требуют высокой точности заводского изготовления стальных ячеек, из которых собираются и цилиндрическая и купольные части, а также качественного ведения сварочных работ на монтаже. В настоящее время можно привести единственный пример возведения оболочки такого типа – это оболочка для энергоблоков АЭС “Стендаль” в Восточной Германии. Схематично оболочка показана на рис. 3.9.

### 3.3. Железобетонные оболочки – ЖБ

А. Оболочки без предварительного напряжения (ЖБ-Н) можно разделить на три основные группы:

1) Оболочки с основной цилиндрической частью и полусферическим куполом (ЖБ-Н-1), которые армируются обычной стержневой арматурой в кольцевом и меридиональном направлениях. Оболочка имеет внутреннюю облицовку, выполняющую только функции герметичности и имеющую толщину от 6 до 12 мм. Толщина стен в цилиндрической части до 1,35 м с постепенным уменьшением в купольной части до 0,75 м. Внутренний диаметр цилиндра принимается в пределах 40 м, общая высота здания от 55 до 60 м. Все защитные функции в этом случае совмещены в одном реакторном здании. На рис. 3.10 представлены основные габаритные размеры оболочек подобного типа. Всего их построено около 25, в основном, в США, а в качестве характерных примеров АЭС можно привести следующие: “Коннектикут-Янки”, “Сарри”, “Мэн-Янки” и др.

2) Оболочки в форме усеченного конуса с плоской крышкой и плоским днищем (ЖБ-Н-2). Рассматриваются в мировой практике строительства АЭС как внутренний объем реакторного здания двойной оболочечной компоновки. Имеют внутреннюю облицовку, толщиной порядка 8 мм и толщину стен до 1,3 м, выполняя тем самым функции сосуда давления, герметичности и биозащиты. Защиту от внешних воздействий выполняет внешнее здание в виде цилиндрической железобетонной оболочки с толщиной стен до 0,5 м и плоским покрытием. Эту оболочку можно отнести к типу ЖБ-Н-3. Между внешней и внутренней оболочкой компонуются технологические помещения для размещения вспомогательного оборудования.

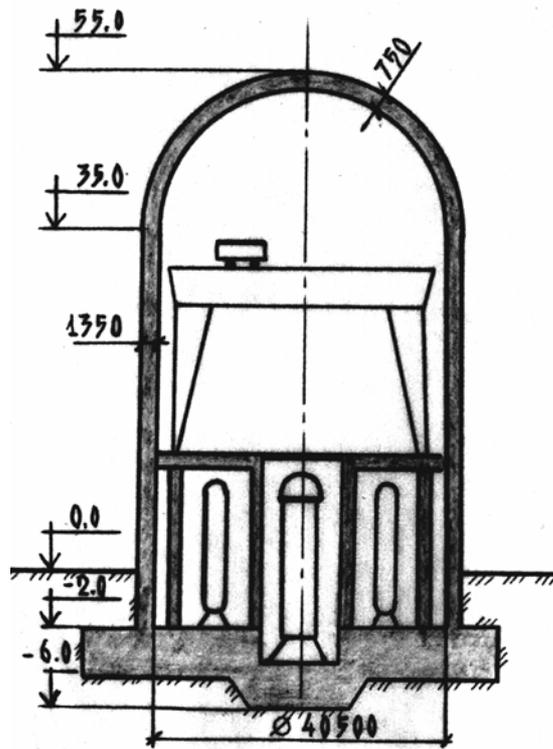


Рис. 3.10. Железобетонная защитная оболочка без предварительного напряжения

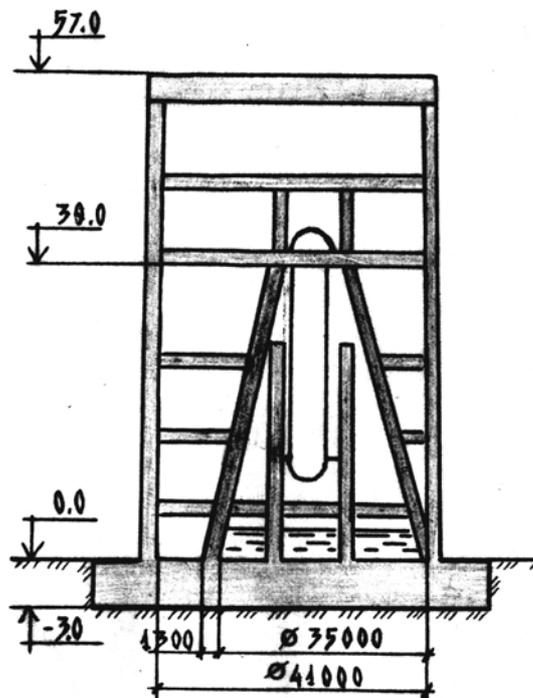


Рис. 3.11. Внутренняя железобетонная коническая защитная оболочка без предварительного напряжения

Перекрытия этих помещений не опираются на стены внутренней оболочки, а примыкают по принципу “скользящего шарнира”, чем достигается независимая работа оболочки при действии внутреннего избыточного давления. В нижней части конической оболочки размещаются помещения и бассейны системы локализации аварии. Такое решение реакторного здания встречается в основном, в США на тринадцати АЭС, а наиболее характерным примером является АЭС “Шорхем”. На рис. 3.11 схематично показано реакторное здание рассматриваемого типа и размеры его основных элементов.

3) Внешние оболочки реакторных зданий двойной конструкции (ЖБ-Н-3), выделены в отдельный тип оболочек, армированных обычной стержневой арматурой и выполняющих функции защиты реакторной установки от внешних воздействий и функции биозащиты. Как правило, все оболочки такого типа имеют в составе цилиндрическую часть и купольное покрытие либо в виде полусферы для защиты оболочек СТ-С-1, либо в виде пологой сферы для защиты оболочек СТ-Ц и ЖБ-П-Р, либо плоское покрытие для оболочек ЖБ-Н-2. Основные размеры и особенности геометрических форм этих оболочек рассмотрены в ходе описания и схематично представлены на рис. 3.2, 3.6, 3.7 ,3.11. Можно лишь добавить появившееся в последние годы решение реакторного здания, в котором для оболочек типа СТ-Ц-2 в качестве внешнего объема применена цилиндрическая железобетонная оболочка с покрытием в виде мощной плоской железобетонной структурной плиты, в помещениях которой размещены системы охлаждения внутренней стальной оболочки в случае возникновения аварийных ситуаций.

**Б. Частично предварительно напряженные оболочки (ЖБ-4)**

Представляют собой комбинацию цилиндрического стакана и полусферического купольного покрытия в монолитном железобетоне, причем предварительно напряженной является только цилиндрическая часть и только в меридиональном направлении. Оболочки такого типа применены на двух АЭС в США: “Робинсон” и “Роберт Е. Джина”. Основные размеры оболочки АЭС “Робинсон” представлены на схеме на рис. 3.12, а схема размещения армоэлементов показана на рис. 3.14,а. Оболочка с совмещенными защитными функциями рассчитана на действие избыточного внутреннего давления 0,29 МПа и температуры 140 °С. В качестве напрягаемой арматуры использованы стержни диаметром 35 мм, собираемые в системы по 6 штук и размещаемые в каналообразователях в виде оцинкованных труб диаметром 152 мм. Анкеровка в нижней части выполнена с использованием стальных плит толщиной 100 мм, в верхнем анкере на карнизе стержни закреплялись с помощью гаек. Натяжение арматуры осуществлялось со стороны верхнего анкера. После натяжения каналообразователи заинъецированы цементным раствором.

**В. Полностью предварительно напряженные оболочки (ЖБ-П) –** делятся на основные группы:

1) С совмещенной схемой армирования цилиндра и полусферического купола (ЖБ-П-С).

Характерным примером такого решения является оболочка АЭС “Троян” (США) с энергоблоком мощностью 1130 МВт. Схематично оболочка представлена на рис. 3.13.

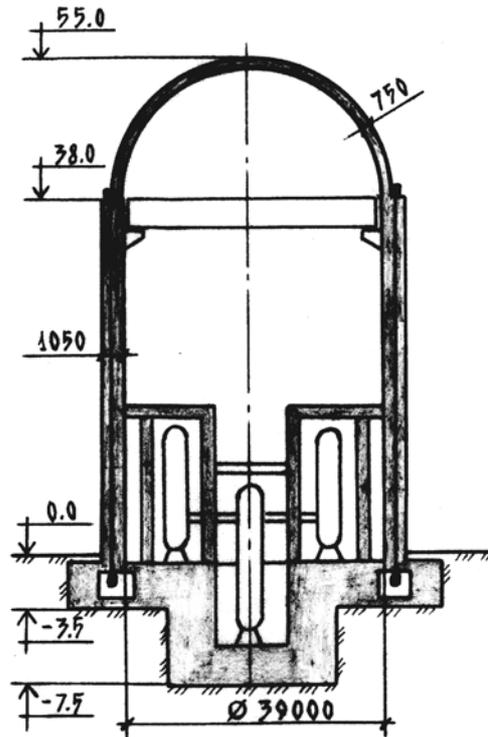


Рис. 3.12. Частично предварительно напряженная защитная оболочка

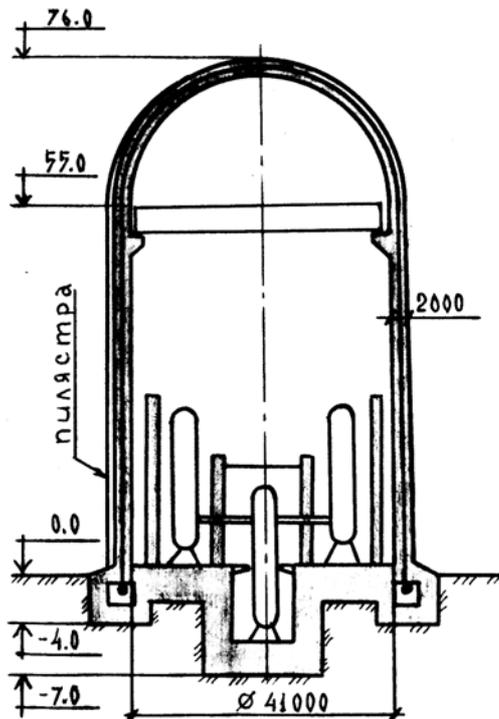


Рис. 3.13. Железобетонная защитная оболочка с совмещенной схемой размещения предварительно напряженных армоэлементов (ортогонально-петлевая)

Как видно, вертикальные (меридиональные) армоэлементы проходят в каналообразователях цилиндра, а затем перебрасываются через купол и заанкериваются в галерее под днищем, т.е. располагаются по, так называемой, петлевой схеме. Горизонтальные (кольцевые) пучки с углом охвата  $240^{\circ}$  закрепляются в трех пилястрах – вертикальных выступах размером  $3,7 \times 0,7$  м в цилиндрической и купольной частях. Важно подчеркнуть, что горизонтальные пучки обязательно заводятся в купольную часть для гашения скатных составляющих, возникающих в зоне перехода из цилиндра в купол при натяжении меридиональных петлевых пучков. Именно с этой целью пилястры частично выходят на купольную часть (рис. 3.15). Общая схема размещения армоэлементов показана на рис. 3.14,б.

Большая длина напрягаемых арматурных элементов позволяет сократить количество анкерных устройств, что отмечается как преимущество данной схемы преднапряжения, однако, это же является и недостатком, так как при таком расположении армоэлементов значительно возрастают потери преднапряжения. Кроме того, усложняется производство работ по устройству каналообразователей и укладке в них арматурных пучков. После натяжения арматурных пучков каналообразователи и в этом случае инъецируются цементным раствором.

2) С отдельной схемой армирования купола и цилиндра (ЖБ-П-Р). Как правило, такие оболочки имеют кольцевую балку жесткости, сопрягающую цилиндрическую и купольную части. Купольное покрытие оболочек такого типа не является полусферическим, а представляет собой пологий купол с подсечкой  $35^{\circ} - 40^{\circ}$ .

Для размещения преднапряженных армоэлементов в купольной части применяются схемы:

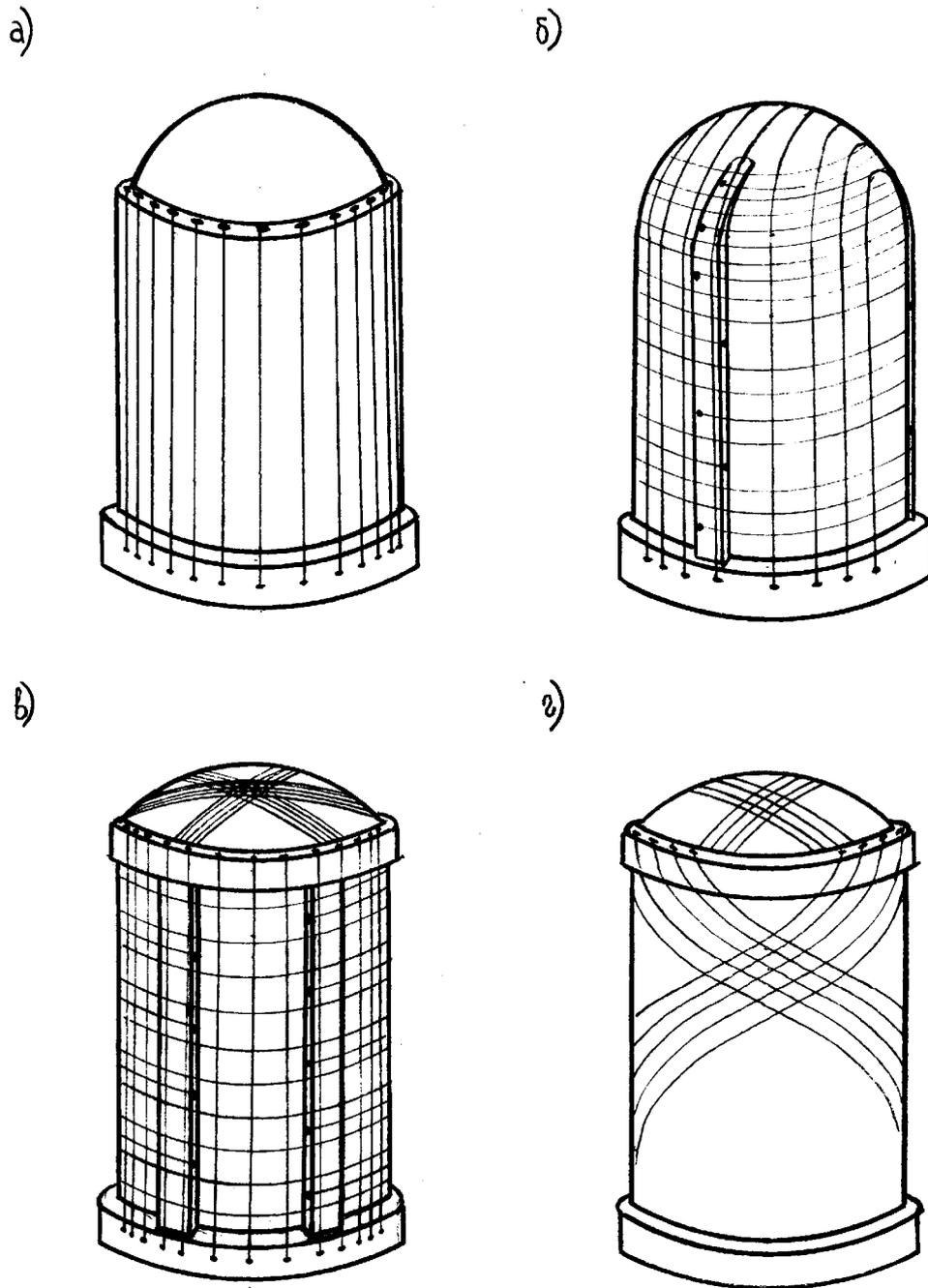


Рис. 3.14. Схемы преднапряжения защитных оболочек:

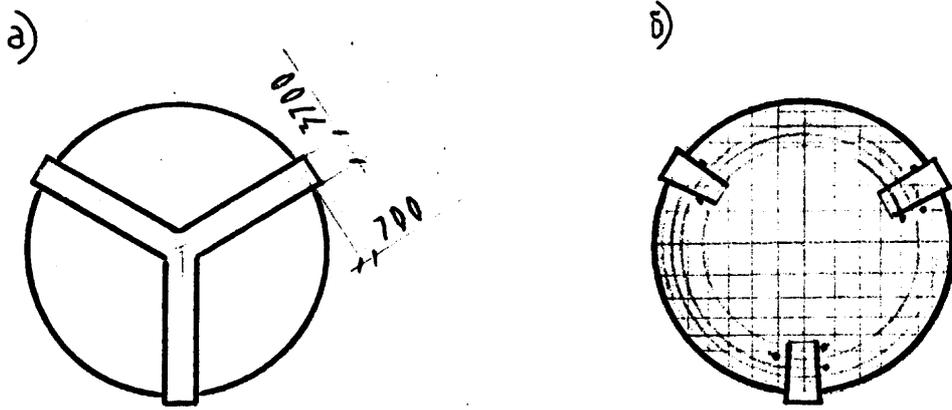
а) частичное преднапряжение цилиндрической части в меридиональном направлении; б) совмещенная (ортогонально-петлевая) схема преднапряжения; в) отдельная ортогональная схема преднапряжения в цилиндре и трехпутная в куполе; г) отдельная геликоидальная (контргеликоидальная) схема преднапряжения в цилиндре и двухпутная в куполе

а) двухпутная ортогональная сетка армоэлементов с прохождением в двух уровнях и закреплением на кольцевой балки жесткости (рис. 3.16,а); применена для армирования купольной части защитных оболочек по унифицированному моноблочному варианту АЭС, разработанному в бывшем СССР (энергоблоки Запорожской АЭС, Балаковской АЭС и др.);

б) более сложная трехпутная схема размещения пучков на трех или пяти уровнях с закреплением на кольцевой балки жесткости (рис. 3.16,б), применена для армирования куполов стандартной оболочки США и оболочки V блока Нововоронежской АЭС в России.

Для размещения преднапряженных армоэлементов в цилиндрической части существуют три схемы:

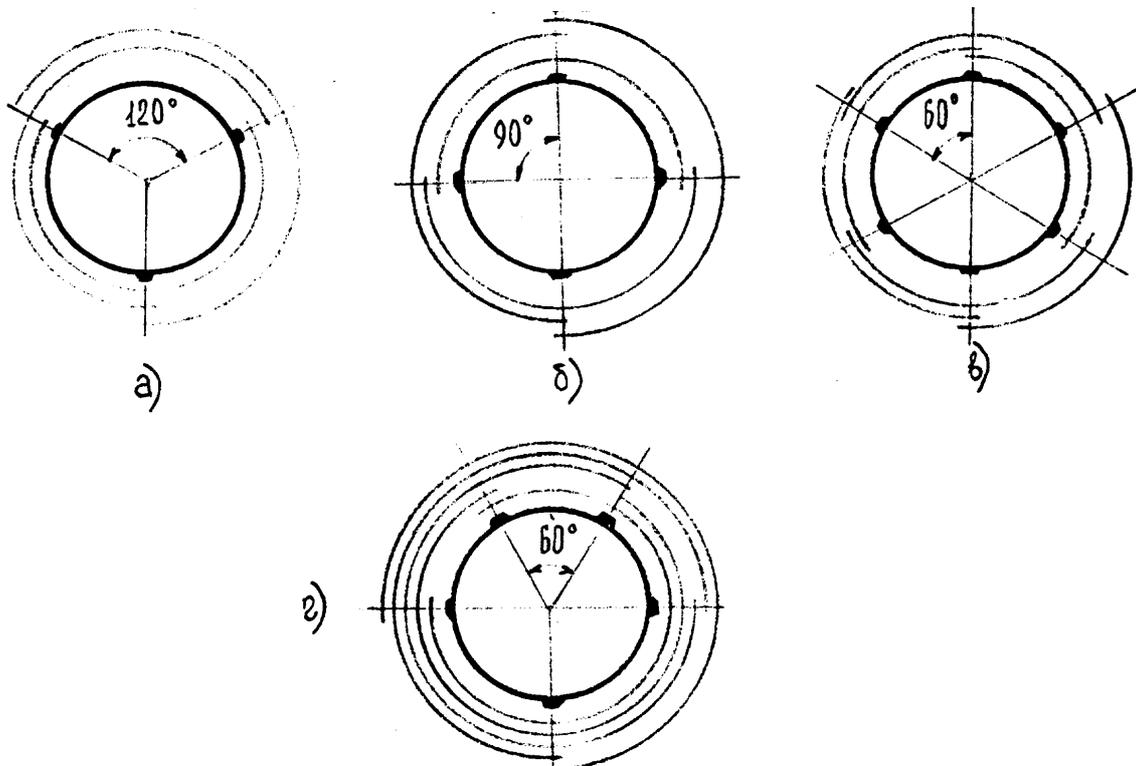
а) ортогональная схема армирования с расположением пучков в кольцевом и меридиональном направлениях; кольцевые армоэлементы проходят в каналобразователях и закрепляются на пиллястрах, количество которых может быть от 2 до 6 с углами охвата от  $360^{\circ}$  до  $120^{\circ}$  (рис. 3.17); меридиональные пучки закрепляются в кольцевой галерее фундаментной части и на карнизе кольцевой балки жесткости. Ортогональные схемы армирования цилиндрической части применимы в проекте стандартной защитной оболочки США для АЭС с энергоблоками мощностью 800 МВт. На рис. 3.18 схематично даны основные габариты и конструктивные элементы этой оболочки, а на рис. 3.14,в показан общий вид сооружения. В качестве армоэлементов применены пучки из высокопрочной проволоки диаметром 6 мм по 90 штук в каждом элементе. Каналообразователями служат жестяные трубки диаметром до 92 мм, причем в каналообразователи после натяжения пучка под давлением нагнетается антикоррозионная смазка. Такое решение позволяет снизить потери на трение арматурных пучков



**Рис. 3.15.** Схема размещения пилястр на куполе защитной оболочки с ортогонально-петлевым армированием (вид сверху)



**Рис. 3.16.** Двухпутное (а) и трехпутное (б) размещение преднапряженных армоэлементов в куполе (вид сверху)



**Рис. 3.17.** Углы охвата кольцевых преднапряженных пучков в цилиндре с закреплением их на 3, 4, 6 и 5 пилястрах

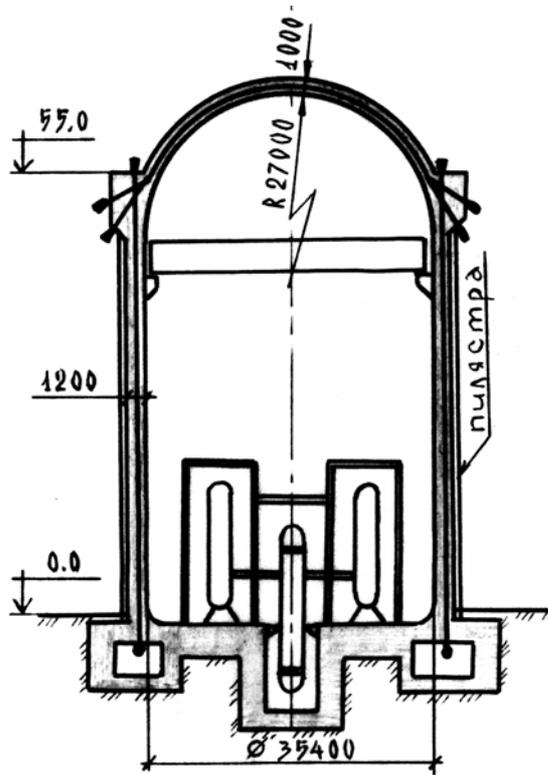


Рис. 3.18. Железобетонная преднапряженная защитная оболочка с раздельной схемой армирования цилиндра и купола

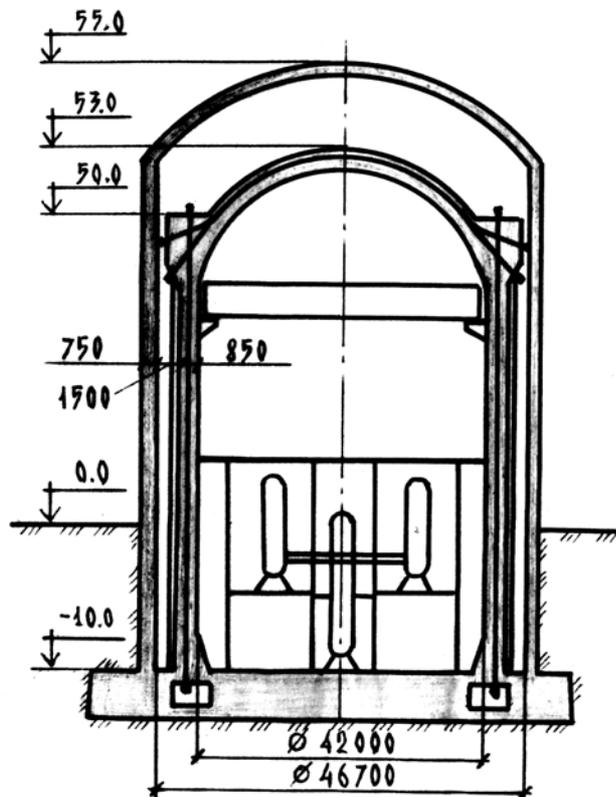


Рис. 3.19. Внутренняя железобетонная преднапряженная защитная оболочка с раздельной схемой армирования цилиндра и купола

о стенки каналов и контролировать уровень преднапряжения во время эксплуатации.

Оболочка рассчитана на давление 0,41 МПа и повышение температуры до 143 °С.

Проект стандартной оболочки США реализован на следующих энергоблоках:

- “Ранчо Секо”, “Кальверт-Клифс”, “Окони”, “Терки Пойнт” – США;
- “Пиккеринг”, “Джентли” – Канада;
- “Монтс Аррее” – Франция;
- “Калпакам” – Индия.

б) ортогональная схема с непрерывным армированием по внешней поверхности цилиндра ( по принципу навивки); распространение на реальные сооружения не получила в основном из-за большого количества проходок, технологических отверстий в стенках цилиндрической части; использована лишь для преднапряжения цилиндрической части моелей защитных оболочек [5].

в) диагональная схема преднапряжения или геликоидальная с расположением армоэлементов по спирали (винтовым) линиям, идущим навстречу друг другу с наклоном 35° к горизонту, что обеспечивает равномерное обжатие бетона в кольцевом и меридиональном направлениях. Анкеровка диагональной арматуры осуществляется либо в двух уровнях – под днищем плиты и на карнизе кольцевой балки (Нововоронежская АЭС), либо только на кольцевой балке (унифицированные моноблоки).

В последнем варианте пучок, проходя вниз по винтовой линии, в нижней части в пределах толщины днища оболочки разворачивается и поднимается вновь вверх. Такую схему иногда называют

контргеликоидальной. В качестве армоэлементов применимы высокопрочные канаты К-7 (пряди), собираемые в пучки. Каналообразователями служат полиэтиленовые трубы диаметром 220 мм. Для снижения потерь от трения о стенки криволинейных каналов и для защиты арматуры от коррозии используются специальные смазочные составы. Оболочка рассчитана на аварийное давление 0,4 МПа и аварийную температуру до 150<sup>0</sup>С. Общий вид сооружения показан на рис. 3.14,г.

Защитные оболочки полностью преднапряженные с отдельной схемой армирования купола и цилиндра (ЖБ-П-Р) проектируются и возводятся и как внутренние объемы в реакторных зданиях двойной оболочечной компоновки. При этом внешние оболочки относятся также к типу ЖБ-Н-3. Характерным примером служит решение реакторного здания АЭС “Тяньж” (Франция), схематично представленное на рис. 3.19, а на рис. 3.17,г показан принцип размещения и закрепления на пяти пиллястрах армоэлементов в кольцевом направлении. Подобный проект разрабатывается в настоящее время в России для АЭС с энергоблоками мощностью 1000 МВт.

#### **4. Общий перечень нагрузок и воздействий на защитные оболочки**

Классификация нагрузок и воздействий на защитные оболочки РО АЭС в целом соответствует общепринятой в Нормах [18], однако имеет свои особенности.

Нагрузки и воздействия можно классифицировать следующим образом:

##### **I. Постоянные нагрузки:**

- собственный вес конструкций – СВ;
- предварительное напряжение – ПН;
- давление грунтов засыпки на заглубленную часть сооружения – ДГ;

##### **II. Временные нагрузки и воздействия:**

###### **1) Временные длительного действия:**

- собственный вес стационарного оборудования, воды или растворов в камерах, сосудах, бассейнах – СВО;
- внутреннее избыточное давление при нормальных условиях эксплуатации – ВДЭ;
- температурное технологическое воздействие в условиях нормальной эксплуатации – ТВЭ;
- температурные климатические воздействия – ТКД;

###### **2) Временные кратковременные:**

- внутреннее давление при испытаниях защитной оболочки – ВДИ;
- нагрузки от подвижного подъемно-транспортного оборудования (крановые) – КН;
- снеговые нагрузки – СН;
- ветровые воздействия – ВН;
- температурно-климатические воздействия – ТКК;

### III. Особые нагрузки и воздействия:

#### 1) Особые воздействия технологического характера:

- внутреннее избыточное давление режима МПА – ВДА;
- температурное воздействие режима МПА – ТВА;

#### 2) Особые динамические воздействия:

##### а) воздействия, связанные с эксплуатацией самой станции (локальные воздействия) – ЛВ;

- воздействия от разрыва ГЦТ и истечения струй теплоносителя под высоким давлением в режиме МПА;
- локальные ударные нагрузки от летящих частей оборудования, возможные в режиме МПА;

##### б) воздействия, связанные с деятельностью человека за пределами АЭС;

- взрывные и сейсмозрывные воздействия от расположенных рядом взрывоопасных предприятий – ударная волна – УВ;
- падение на защитную оболочку самолета или его обломков при авиакатастрофах или падение потерявших управление других летательных аппаратов - УПС;

##### в) воздействия от стихийных явлений:

- сейсмические воздействия при землетрясениях; рассматривается проектное землетрясение – ПЗ;
- максимальное расчетное землетрясение – МРЗ;
- ветровые воздействия высокой интенсивности – ураганы и воздействия от атмосферных вихрей – смерчи (торнадо) – ВНУ;
- воздействия от наводнений, ветровых волн – цунами.

В таблице 4.1 приведены основные и особые сочетания нагрузок и воздействий, на которые выполняются расчеты напряженно-

деформированного состояния элементов оболочки для следующих режимов работы:

- режим производства строительных работ – I сочетание;
- испытательный режим – II сочетание;
- режим нормальной эксплуатации – III сочетание;
- аварийный режим – IV сочетание;

Остальные сочетания, как видно, включают нагрузки и воздействия двух особых групп – максимальной проектной аварии и особые динамические нагрузки. Этим расчетным условием сооружения АЭС отличаются от других сооружений, при проектировании которых в соответствии с [18] в особое сочетание включается только одна особая нагрузка.

Таблица 4.1

Сочетания нагрузок и воздействий	№ соч	Постоянные			Временные длительные				Временные кратковременные					Особые							
		СВ	ПН	ДГ	СВО	ВДЭ	ТВЭ	ТКД	ВДИ	КН	СН	ВН	ТКК	ВДА	ТВА	ЛВ	УВ	УПС	ПЗ	МРЗ	ВНУ
Основные	I	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	III	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Особые	IV	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
	V	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-
	VI	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-
	VII	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-
	VIII	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-
	IX	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-
	X	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-
	XI	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+

## **5. Напряженно-деформированное состояние защитных оболочек при действии внутреннего давления**

Защитная оболочка реакторного отделения АЭС в расчетном отношении рассматривается как составная осесимметричная оболочка вращения, состоящая в общем случае из цилиндрической части, сферического купола и сопрягающего элемента – кольцевой балки жесткости. Принимается, что цилиндрическая часть жестко закреплена в днище оболочки. В практике инженерных расчетов при  $h/R < 1/20$  оболочку можно отнести к категории тонких. Здесь:  $h$  – толщина оболочки,  $R$  – минимальный радиус средней поверхности. Задача определения напряженно-деформированного состояния рассматриваемой оболочки при внутреннем избыточном равномерно распределенном давлении решается как осесимметричная задача тонкостенных оболочек вращения.

В основу современных инженерных теорий расчета таких оболочек положены следующие основные гипотезы:

1. Оболочка испытывает только двухосное напряженное состояние, т.е. считается, что давление друг на друга слоев оболочки, параллельных срединной поверхности, пренебрежимо мало.

2. Материал оболочки изотропен и следует закону Гука, т.е. справедлив линейно-упругий закон деформирования.

3. Справедлива гипотеза прямых нормалей (гипотеза Кирхгофа-Лява), согласно которой прямолинейный элемент, перпендикулярный срединной поверхности до деформации, остается прямолинейным и перпендикулярным срединной поверхности после деформации и не изменяет своей длины.

## 5.1. Общие положения

Для оболочек вращения, нагруженных осесимметричной нагрузкой, наиболее характерным является безмоментное напряженное состояние. При таком напряженном состоянии в сечениях оболочки возникают только меридиональные и кольцевые усилия. Изгибающие и крутящие моменты, поперечные силы и сдвигающие усилия либо отсутствуют, либо пренебрежимо малы.

Усилия в оболочках, определяемые по безмоментной (мембранной) теории, имеют достаточно точное для инженерной практики значение в зонах, удаленных от мест резкого изменения геометрических и статических параметров оболочки (форма, размеры, жесткость), а также от мест приложения сосредоточенных силовых воздействий. На этих участках, называемых краевыми, кроме мембранных усилий возникают дополнительные усилия, носящие название краевого эффекта. Краевой эффект в виде значительных изгибающих моментов и поперечных сил возникает в местах пересечения оболочек, у колец жесткости, у края оболочки, в местах ступенчатого изменения толщины, в зонах сосредоточенных воздействий.

Дополнительные краевые усилия в оболочках не могут быть определены по безмоментной теории. Для их определения необходимо применить аппарат моментной теории тонких упругих оболочек. Точное решение уравнений моментной теории представляет собой задачу большой математической сложности и поэтому для инженерных расчетов такая методика трудно применима.

Для расчета усилий в оболочках вращения при осесимметричных нагружениях разработана методика, по которой общее решение задачи можно получить путем суммирования результатов решения по безмоментному напряженному состоянию с результатами определения

напряженного состояния, вызванного краевыми силами, т.е. с решением краевой задачи. При этом краевые усилия могут быть определены с использованием обычных методов строительной механики. Методы строительной механики в применении к расчету напряженно-деформированного состояния составных оболочек рассматриваемого типа наиболее полно разработаны П.Л.Пастернаком [4]. В основу положен метод сил, при использовании которого для рассматриваемой оболочки в основной системе должны обеспечиваться условия существования безмоментного напряженного состояния. Для этого в оболочке у мест возникновения краевого эффекта мысленно делаются разрезы и вводятся связи, обеспечивающие неизменяемость системы и в тоже время дающие возможность краям оболочки свободно поворачиваться и смещаться в радиальном направлении. В качестве таких связей можно принять сплошной ряд шарнирно подвижных опорных стерженьков, при введении которых каждый элемент “разрезанной” таким образом оболочки становится свободным. В местах разрезов деформации оболочек будут изменяться скачкообразно, нарушая тем самым непрерывность срединной поверхности. Для того, чтобы выполнить условие неразрывности деформаций (относительный сдвиг и относительный угол поворота равны нулю), необходимо к краям – разрезам приложить неизвестные внутренние равномерно распределенные поперечные силы и изгибающие моменты (рис. 5.1).

Для определения внутренних неизвестных составляются и решаются обычные канонические уравнения метода сил. В данном случае для основной системы, изображенной на рис.5.1 систему канонических уравнений можно записать в следующем виде:

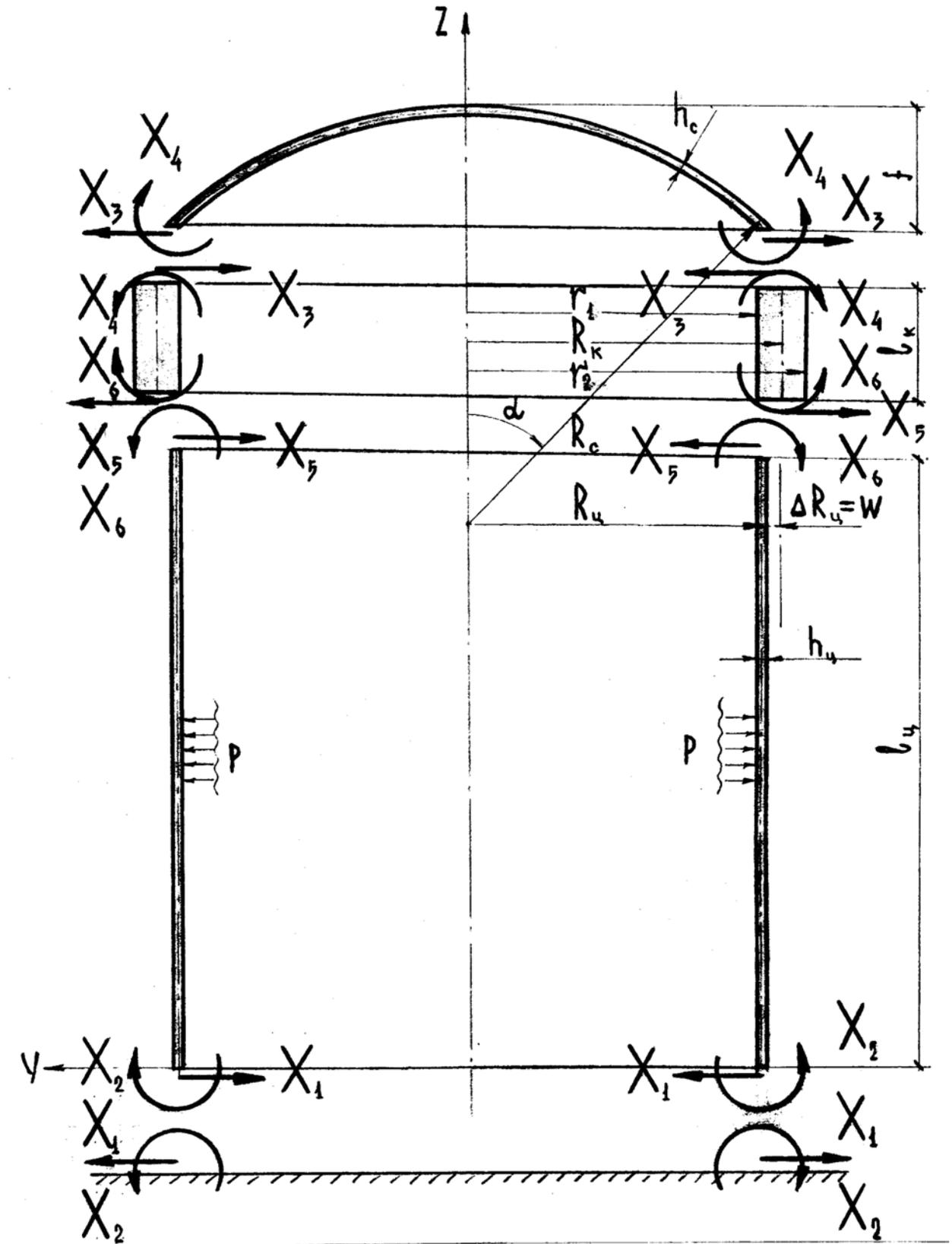


Рис. 5.1. Основная система метода сил и геометрические параметры оболочки

$$\begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{14} & \delta_{15} & \delta_{16} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{24} & \delta_{25} & \delta_{26} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} & \delta_{34} & \delta_{35} & \delta_{36} \\ \delta_{41} & \delta_{42} & \delta_{43} & \delta_{44} & \delta_{45} & \delta_{46} \\ \delta_{51} & \delta_{52} & \delta_{53} & \delta_{54} & \delta_{55} & \delta_{56} \\ \delta_{61} & \delta_{62} & \delta_{63} & \delta_{64} & \delta_{65} & \delta_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_{1,p} \\ \Delta_{2,p} \\ \Delta_{3,p} \\ \Delta_{4,p} \\ \Delta_{5,p} \\ \Delta_{6,p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

где  $\delta_{ij}$  – краевые перемещения в основной системе от единичных усилий  $X_i$ ;  $\Delta_{i,p}$  – краевые перемещения от внешних воздействий в основной системе;  $X_i$  – неизвестные краевые усилия – поперечные силы и изгибающие моменты на единицу длины кольцевого сечения оболочки (кН/м, кН·м/м).

Выражение (5.1) можно записать в сокращенной матричной форме:

$$LX + \Delta = 0, \quad (5.2)$$

где  $L$  – матрица коэффициентов  $\delta_{ij}$ , называемая, как известно, матрицей податливости системы;  $\Delta$  – матрица-столбец (вектор) свободных членов системы;  $X$  – матрица-столбец (вектор) неизвестных краевых усилий.

Таким образом, полное решение задачи расчета оболочки на действие внутреннего избыточного давления складывается из следующих этапов:

1) Расчет усилий в оболочке по безмоментной теории и определение углов поворота и радиальных перемещений от внешней нагрузки;

2) Расчет усилий в оболочке, загруженной только краевыми силами и моментами по моментной теории, и определение краевых деформаций от этого нагружения (краевая задача);

3) Суммирование усилий безмоментного напряженного состояния с усилиями, найденными при решении краевой задачи от усилий  $X_i$ , величины которых определяются из решения системы (5.1).

## 5.2. Безмоментное напряженное состояние

Строгие понятия и формулировки условий существования безмоментного напряженного состояния приведены в ряде литературных источников [2,7,13,20,22,23] и в данном пособии не приводятся. Решение для произвольной оболочки при осесимметричном нагружении получается из рассмотрения равновесия выделенного элемента оболочки. Выводятся уравнения равновесия, как сумма проекций всех сил на направление нормали, называемое уравнением Лапласа и уравнение равновесия, как сумма проекций всех сил на направление оси оболочки. Из двух уравнений при решении задачи для свободных сферы и цилиндра определяются мембранные усилия в меридиональном и кольцевом (окружном) направлениях [21]. Таким образом, по безмоментной теории задача определения напряженного состояния цилиндрической и сферической оболочек является статически определимой. Зависимости для определения меридиональных и кольцевых усилий в свободных цилиндрической и сферической оболочках, нагруженных внутренним давлением даются без вывода. Зависимости известны под названием “котельных формул”.

Для цилиндрической оболочки

$$N_1 = \frac{pR_{\text{ц}}}{2}; N_2 = pR_{\text{ц}}. \quad (5.3)$$

Для сферической оболочки

$$N_1 = N_2 = \frac{pR_{\text{с}}}{2}. \quad (5.4)$$

В этих формулах  $N_1$  и  $N_2$  – меридиональные и кольцевые усилия, определяемые на единицу длины кольцевого и меридионального сечений, соответственно;  $p$  – внутреннее избыточное давление;  $R_{\text{ц}}$  и  $R_{\text{с}}$  – радиусы срединной поверхности цилиндрической и сферической оболочек; как видно из рис.5.1

$$R_c = R_{\text{ц}}/\sin\alpha,$$

где  $\alpha$  - угол подсечки сферического купола.

Радиальное перемещение краев свободной цилиндрической оболочки  $\Delta R_{\text{ц}}=w$  при действии давления  $p$  определяется следующим образом. Находятся деформации удлинения в кольцевом направлении

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta R_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} = \frac{w}{R_{\text{ц}}}; \text{ или иначе } \frac{\sigma_2}{E} = \frac{w}{R_{\text{ц}}},$$

где  $\sigma_2$  – кольцевые напряжения;  $E$  – модуль деформаций материала оболочки. Переходя к условиям  $N_2$ , можно записать

$$N_2 = \frac{Eh_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} w, \quad (5.5)$$

или, учитывая двухосное напряженное состояние,

$$N_2 = \frac{Eh_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} w + \nu N_1, \quad (5.6)$$

где  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $h_{\text{ц}}$  – толщина стен цилиндрической оболочки.

Используя зависимости (5.3), (5.4), (5.6) и учитывая, что радиальное перемещение края  $w$  есть не что иное, как перемещение в свободном цилиндре от действия внутреннего давления в направлении 1(или 5), можно получить зависимость

$$\Delta_{1,p}^{\text{ц}} = \Delta_{5,p}^{\text{ц}} = -\frac{pR_{\text{ц}}^2}{Eh_{\text{ц}}}(1 - \nu/2). \quad (5.7)$$

Знак ( - ) в этой формуле означает, что направление перемещений  $\Delta_{1,p}^{\text{ц}} = \Delta_{5,p}^{\text{ц}}$  не совпадает с выбранными направлениями 1 и 5 в основной системе метода сил (рис.5.1).

Рассуждая аналогично, можно определить радиальные перемещения краев сферической оболочки

$$\Delta_{3,p}^{\text{ц}} = \frac{pR_c^2}{2Eh_c} \sin \alpha (1 - \nu). \quad (5.8)$$

Углы поворота краев свободных цилиндра и сферы при действии давления  $p$  отсутствуют, т.е. перемещения в направлениях 2, 6 и 4 принимаются равными нулю.

$$\Delta_{2,p}^u = \Delta_{6,p}^u = 0;$$

$$\Delta_{4,p}^u = 0$$

### 5.3. Решение краевой задачи для цилиндрической оболочки

#### 5.3.1. Уравнение изгиба цилиндрической оболочки

В [1,4,21,20] показано, что решение задачи об изгибе круговой цилиндрической оболочки постоянной толщины, находящейся под действием осесимметричной нагрузки, сводится к решению линейного дифференциального неоднородного уравнения четвертого порядка. В данном случае уравнение имеет вид

$$\frac{d^4 w}{dz^4} + 4\beta^4 w = \frac{p}{D_{\text{ц}}}, \quad (5.9)$$

где  $z$  – вертикальная координата (рис. 5.1, 5.2);  $p$  – внутреннее избыточное давление;  $D_{\text{ц}}$  – цилиндрическая жесткость при изгибе

$$D_{\text{ц}} = \frac{Eh_{\text{ц}}^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (5.10)$$

$\beta$  - параметр, определяемый по формуле

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{R_{\text{ц}}^2 h_{\text{ц}}^2}}. \quad (5.11)$$

Общее решение уравнения (5.9), т.е. закон изменения радиального перемещения  $w$  по координате  $z$  имеет вид

$$w = e^{\beta z} (C_1 \cos \beta z + C_2 \sin \beta z) + e^{-\beta z} (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z) + f(z), \quad (5.12)$$

где  $f(z)$  – частное решение уравнения (5.9), представляющее собой закон изменения давления  $p$  вдоль образующей;  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – постоянные интегрирования; их находят, как известно, из граничных условий после решения системы из четырех уравнений с четырьмя неизвестными. Теоретические исследования, выполненные различными авторами, показали, что во многих случаях эта система оказывается слабо связанной и распадается на две системы с двумя неизвестными.

Таким образом, постоянные  $C_1$  и  $C_2$  определяются независимо от постоянных  $C_3$  и  $C_4$ . Это объясняется тем, что слагаемые в (5.12) имеют различный характер: первое слагаемое – это быстро возрастающая периодическая функция, а второе представляет собой быстро

затихающую периодическую функцию. Если длина цилиндра  $l_{\text{ц}}$  достаточна велика и функция

$$e^{-\beta z} (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z)$$

при  $z$  близких  $l_{\text{ц}}$  принимает исчезающе малые значения, то можно считать, что деформации цилиндра у одного края не зависят от условий в окрестностях второго. Таким образом, для достаточно длинного цилиндра существует возможность проанализировать напряженное состояние при малых  $z$ , пренебрегая возрастающей функцией

$$e^{\beta z} (C_1 \cos \beta z + C_2 \sin \beta z),$$

т.е. полагая, что  $C_1 \approx C_2 \approx 0$ . Если рассматривать цилиндр с двух краев – нижнего и верхнего, каждый раз полагая, что  $z$  изменяется от 0 до  $l_{\text{ц}}$ , то можно ограничиться только одним слагаемым в окончательном решении для  $w$

$$w = e^{-\beta z} (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z) + f(z). \quad (5.13)$$

Критерием отнесения цилиндрической оболочки к категории длинны по данным теоретических исследований является выполнение условия

$$l_{\text{ц}} \geq 3,5S_{\text{ц}}, \quad (5.14)$$

где  $S_{\text{ц}}$  – параметр, характеризующий длину волны затухания краевого эффекта в цилиндрической оболочке и определяемой формулой

$$S_{\text{ц}} = \frac{1}{\beta} = \sqrt[4]{\frac{R_{\text{ц}}^2 h_{\text{ц}}^2}{3(1-\nu^2)}}. \quad (5.15)$$

Как правило, длина цилиндрической части защитных оболочек АЭС удовлетворяет условию (5.14), что дает право при определении перемещений и усилий использовать решение уравнения (5.9) в виде (5.13).

### 5.3.2. Определение краевых перемещений в цилиндрической оболочке

Рассматривается длинная цилиндрическая оболочка, нагруженная например, по нижнему краю равномерно распределенными моментами  $M_0$  и поперечными силами  $Q_0$  (рис. 5.2). Таким образом, решается только краевая задача, т.е. предполагается, что давление на поверхность оболочки  $p$  отсутствует. При таких условиях в общем решении (5.13) следует принять  $f(z)=0$ , и решение примет вид:

$$w = e^{-\beta z} (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z). \quad (5.16)$$

Постоянные  $C_3$  и  $C_4$  определяются из граничных условий на нагруженном краю

$$\begin{aligned} M|_{z=0} &= -D_{\text{ц}} \left( \frac{d^2 w}{dz^2} \right) \Big|_{z=0} = M_0, \\ Q|_{z=0} &= -D_{\text{ц}} \left( \frac{d^3 w}{dz^3} \right) \Big|_{z=0} = Q_0. \end{aligned} \quad (5.17)$$

После подстановки выражения (5.16) в (5.17) и решения системы уравнений с двумя неизвестными, зависимости для  $C_3$  и  $C_4$  принимают вид:

$$C_3 = -\frac{1}{2\beta^3 D_{\text{ц}}} (\beta M_0 - Q_0); \quad C_4 = \frac{1}{2\beta^3 D_{\text{ц}}} M_0. \quad (5.18)$$

Выражение для радиальных перемещений тогда окончательно запишется следующим образом

$$w = -\frac{e^{-\beta z}}{2\beta^3 D_{\text{ц}}} [M_0 \beta (\cos \beta z - \sin \beta z) - Q_0 \cos \beta z]. \quad (5.19)$$

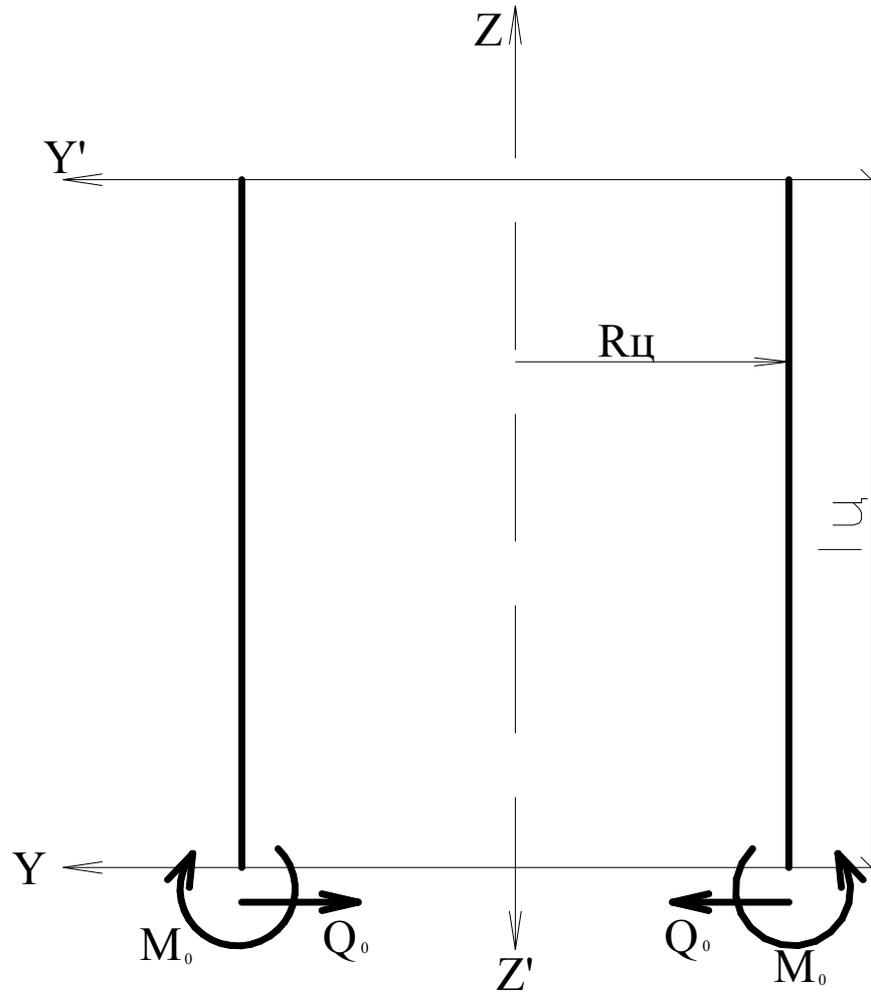


Рис. 5.2. К решению краевой задачи для цилиндрической оболочки

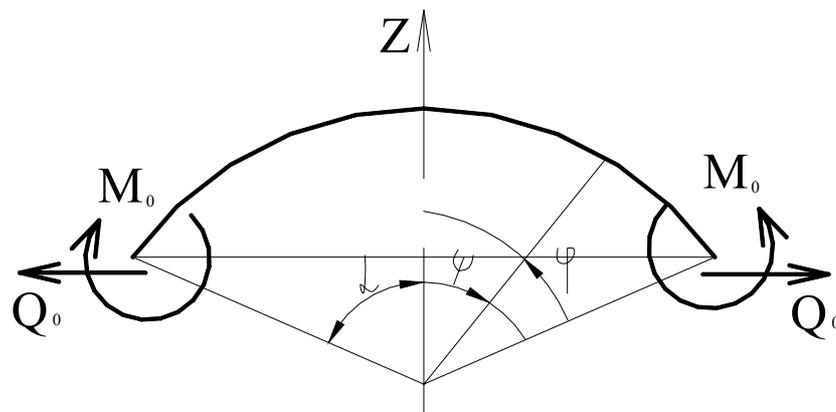


Рис. 5.3. К решению краевой задачи для сферической оболочки

Максимальный прогиб получается на загруженном краю, т.е. при  $z=0$ , и определяется формулой

$$w|_{z=0} = -\frac{1}{2\beta^3 D_{\text{ц}}} (M_0 \beta - Q_0). \quad (5.20)$$

Максимальный угол поворота также получается на загруженном краю и определяется путем дифференцирования выражения (5.19)

$$\theta|_{z=0} = \left( \frac{dw}{dz} \right) \Big|_{z=0} = \frac{1}{2\beta^3 D_{\text{ц}}} (2\beta M_0 - Q_0). \quad (5.21)$$

Выражения (5.20) и (5.21) используются для определения краевых перемещений цилиндрической оболочки, загруженной по краю попеременно единичными моментами ( $M_0=1$ ) и поперечными силами ( $Q_0=1$ ). Так например, для основной системы метода сил на рис. 5.1, перемещение в направлении 1 от единичной силы, приложенной в направлении 1 при условии равенства нулю других сил, определяется следующим образом

$$w|_{\substack{z=0 \\ M_0=0 \\ Q_0=1}} = \delta_{11}^{\text{ц}} = \delta_{55}^{\text{ц}} = \frac{1}{2\beta^3 D_{\text{ц}}} = \frac{S_{\text{ц}}^3}{2D_{\text{ц}}}.$$

Аналогично определяются и другие значения  $\delta_{ij}$  для цилиндрической части оболочки

$$\delta_{12}^{\text{ц}} = \delta_{21}^{\text{ц}} = -\frac{1}{2\beta^2 D_{\text{ц}}} = -\frac{S_{\text{ц}}^2}{2D_{\text{ц}}}$$

$$\delta_{22}^{\text{ц}} = \frac{1}{\beta D_{\text{ц}}} = \frac{S_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}}} \quad (5.22)$$

$$\delta_{55}^{\text{ц}} = \delta_{11}^{\text{ц}}; \delta_{56}^{\text{ц}} = \delta_{65}^{\text{ц}} = \delta_{12}^{\text{ц}}; \delta_{66}^{\text{ц}} = \delta_{22}^{\text{ц}}.$$

### 5.3.3. Определение краевых усилий в цилиндрической оболочке.

Имея выражение для радиальных перемещений в виде (5.19), нетрудно записать зависимости для усилий, возникающих в цилиндрической оболочке, загруженной по краю равномерно распределенными моментами  $M_0$  и поперечными силами  $Q_0$

$$\overline{N}_2 = \frac{Eh_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}} w = \frac{S_{\text{ц}}^3 E h_{\text{ц}}}{2D_{\text{ц}} R_{\text{ц}}} e^{-\beta z} [M_0 (\cos \beta z - \sin \beta z) - Q_0 \sin \beta z] \quad (5.23)$$

$$\overline{M}_1 = -D_{\text{ц}} \frac{d^2 w}{dz^2} = S_{\text{ц}} e^{-\beta z} [M_0 (\cos \beta z + \sin \beta z) - Q_0 \sin \beta z] \quad (5.24)$$

$$\overline{M}_2 = \nu \overline{M}_1; \quad (5.25)$$

$$\overline{Q} = D_{\text{ц}} \frac{d^3 w}{dz^3} = e^{-\beta z} [2M_0 \sin \beta z + Q_0 (\cos \beta z - \sin \beta z)]. \quad (5.26)$$

Таким образом, краевая осесимметричная задача цилиндрической оболочки решена.

## 5.4. Решение краевой задачи для сферической оболочки.

### 5.4.1. Уравнение изгиба сферической оболочки.

Перемещения и усилия в сферической оболочке, загруженной по краю равномерно распределенными моментами и поперечными силами, будут зависеть от типа рассматриваемой сферической оболочки. Сферические оболочки, как известно, подразделяются на пологие и непологие (подъемистые). Условно считают, что к подъемистым относятся те, у которых  $f > d/5$ , где  $f$  – стрела подъема,  $d$  – диаметр основания оболочки. Теоретические исследования сферических оболочек, выполненные различными авторами [1,4,5,7,20], позволили установить более строгий и четкий показатель для разделения сферических купольных покрытий на пологие и подъемистые. К подъемистым или не слишком пологим куполам относятся те, у которых показатель  $\gamma$  определяется выражением

$$\gamma = \frac{d}{\sqrt{2S_c}} \geq 6, \quad (5.27)$$

где  $d$  – диаметр основания купола;  $S_c$  – параметр, характеризующий длину волны затухания краевого эффекта в сферическом куполе

$$S_c = \sqrt[4]{\frac{R_c^2 h_c^2}{3(1-\nu^2)}}, \quad (5.28)$$

здесь  $h_c$  – толщина сферического купола.

Купола, для которых условие (5.27) не выполняется, относятся к пологим сферическим куполам. Купольные сферические покрытия защитных оболочек АЭС, как правило, имеют показатель  $\gamma > 6$ , поэтому

при решении краевой задачи использованы методики расчета для подъемистых куполов.

Точное решение краевой задачи для сферической оболочки является довольно сложным и громоздким в математическом отношении. Задача решается с помощью гипергеометрических рядов, очень медленно сходящихся, причем ряды сходятся тем медленнее, чем больше отношение  $R_c/h_c$ . В связи с этим в инженерной практике целесообразно использование приближенных методик. В [20] показано, что приближенное исследование изгиба тонкой сферической оболочки сводится к решению линейного дифференциального однородного уравнения четвертого порядка

$$\frac{d^4 Q}{d\psi^4} + 4\lambda^4 Q = 0, \quad (5.29)$$

где  $Q$  – поперечная сила,  $\psi$  – текущая угловая координата, изменяющаяся от 0 до  $\alpha$ ;  $\lambda$  – параметр, аналогичный  $\beta$  и определяемый соотношением

$$\lambda = \sqrt[4]{3(1-\nu^2) \left[ \frac{R_c}{h_c} \right]^2}. \quad (5.30)$$

Решение имеет вид, аналогичный (5.12)

$$Q = e^{\lambda\psi} (C_1 \cos \lambda\psi + C_2 \sin \lambda\psi) + e^{-\lambda\psi} (C_3 \cos \lambda\psi + C_4 \sin \lambda\psi) \quad (5.31)$$

Из приведенного выше анализа изгиба цилиндрической оболочки установлено, что перемещения и усилия при загрузении края равномерно распределенными усилиями быстро уменьшаются с увеличением расстояния от края. В подобных условиях находится и сферическая подъемистая оболочка, в связи с чем из общего решения (5.31) можно принять во внимание лишь одно слагаемое. При этом

удобно перейти на другую текущую угловую координату  $\varphi$  (рис. 5.3). Тогда в общем решении уравнения (5.31) достаточно ограничиться рассмотрением слагаемого, представляющего собой быстро затухающую периодическую функцию

$$Q = e^{-\lambda\varphi} (C_3 \cos \lambda\varphi + C_4 \sin \lambda\varphi). \quad (5.32)$$

В этом выражении угловая координата  $\varphi$  изменяется так же от 0 до  $\alpha$ , но оказывается, как видно из рис. 5.3, по направлению к вершине сферического купола.

### 5.4.2. Определение краевых перемещений и усилий в сферической оболочке.

Рассматривается подъемистый сферический купол с углом подсечки  $\alpha$ , загруженной по краю равномерно распределенными моментами  $M_0$  и поперечными силами  $Q_0$  (рис. 5.3). Краевая задача решается в той же последовательности, как и выше, при рассмотрении цилиндрической оболочки.

Из граничных условий на краю купола в уравнении (5.32) определяются постоянные интегрирования  $C_3$  и  $C_4$ , записывается окончательное выражение для  $Q$ ,  $w$  и  $\theta$ , а затем определяются перемещения  $\delta_{ij}$  от единичных моментов  $M_0$  и сил  $Q_0$ . Для основной системы метода сил, представленной на рис. 5.1 выражения для  $\delta_{ij}$  принимают вид

$$\begin{aligned}\delta_{33}^c &= \frac{S_c^3}{2D_c} \sin^2 \alpha; \\ \delta_{34}^c &= \delta_{43}^c = \frac{S_c^2}{2D_c} \sin \alpha; \\ \delta_{44}^c &= \frac{S_c}{D_c},\end{aligned}\tag{5.33}$$

где  $D_c$  – жесткость сферической оболочки при изгибе, определяется выражением

$$D_c = \frac{Eh_c^3}{12(1-\nu^2)}.\tag{5.34}$$

Зависимости для определения усилий в сферическом подъемистом куполе при решении краевой задачи принимают вид

$$\overline{N}_1 = e^{-\lambda\varphi} \left[ \frac{2}{S_c} M_0 \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \lambda\varphi - \sqrt{2} Q_0 \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \alpha \cos \left( \frac{\pi}{4} + \lambda\varphi \right) \right] \quad (5.35)$$

$$\overline{N}_2 = -e^{-\lambda\varphi} \frac{2R_c}{S_c} \left[ \frac{\sqrt{2}}{S_c} M_0 \sin \left( \lambda\varphi - \frac{\pi}{4} \right) - Q_0 \sin \alpha \cos \lambda\varphi \right] \quad (5.36)$$

$$\overline{M}_1 = e^{-\lambda\varphi} \left[ \sqrt{2} M_0 \sin \left( \lambda\varphi + \frac{\pi}{4} \right) + S_c Q_0 \sin \alpha \sin \lambda\varphi \right] \quad (5.37)$$

$$\overline{M}_2 = \nu \overline{M}_1 \quad (5.38)$$

$$\overline{Q} = e^{-\lambda\varphi} \left[ \frac{2}{S_c} M_0 \sin \lambda\varphi - \sqrt{2} Q_0 \cos \left( \frac{\pi}{4} + \lambda\varphi \right) \right] \quad (5.39)$$

Таким образом, краевая задача для сферической оболочки также решена.

## 5.5. Решение задачи для кольцевого элемента

Сопрягающий элемент сферической и цилиндрической частей оболочки в зависимости от требуемой степени точности в процедуре построения решения может рассматриваться в нескольких вариантах:

1) Абсолютно жесткое кольцо, предполагающее жесткое защемление в нем цилиндрической части и сферического купола.

2) Жесткое кольцо, для которого допускается не учитывать изгибные деформации.

3) Кольцо, для которого изгибные деформации принимаются во внимание.

4) Кольцевой элемент, как короткая цилиндрическая оболочка, либо толстостенная, либо тонкая.

Решение на основе первого варианта строится довольно просто, но, как показывает опыт, дает значительные погрешности.

Использование третьего и четвертого вариантов приводит к достаточно точному результату, но существенно усложняет решение задачи.

В инженерных расчетах сопрягающий кольцевой элемент с достаточной степенью точности можно рассматривать как жесткое кольцо прямоугольного поперечного сечения, изгибными деформациями которого можно пренебречь, т.е. использовать второй вариант из перечисленных выше. В настоящем пособии именно этот подход положен в основу построения решения. В таком случае перемещения кольца складываются из поступательного перемещения и поворота сечения кольца как жесткого целого. Необходимые геометрические размеры кольца представлены на рис.5.1., 5.4.

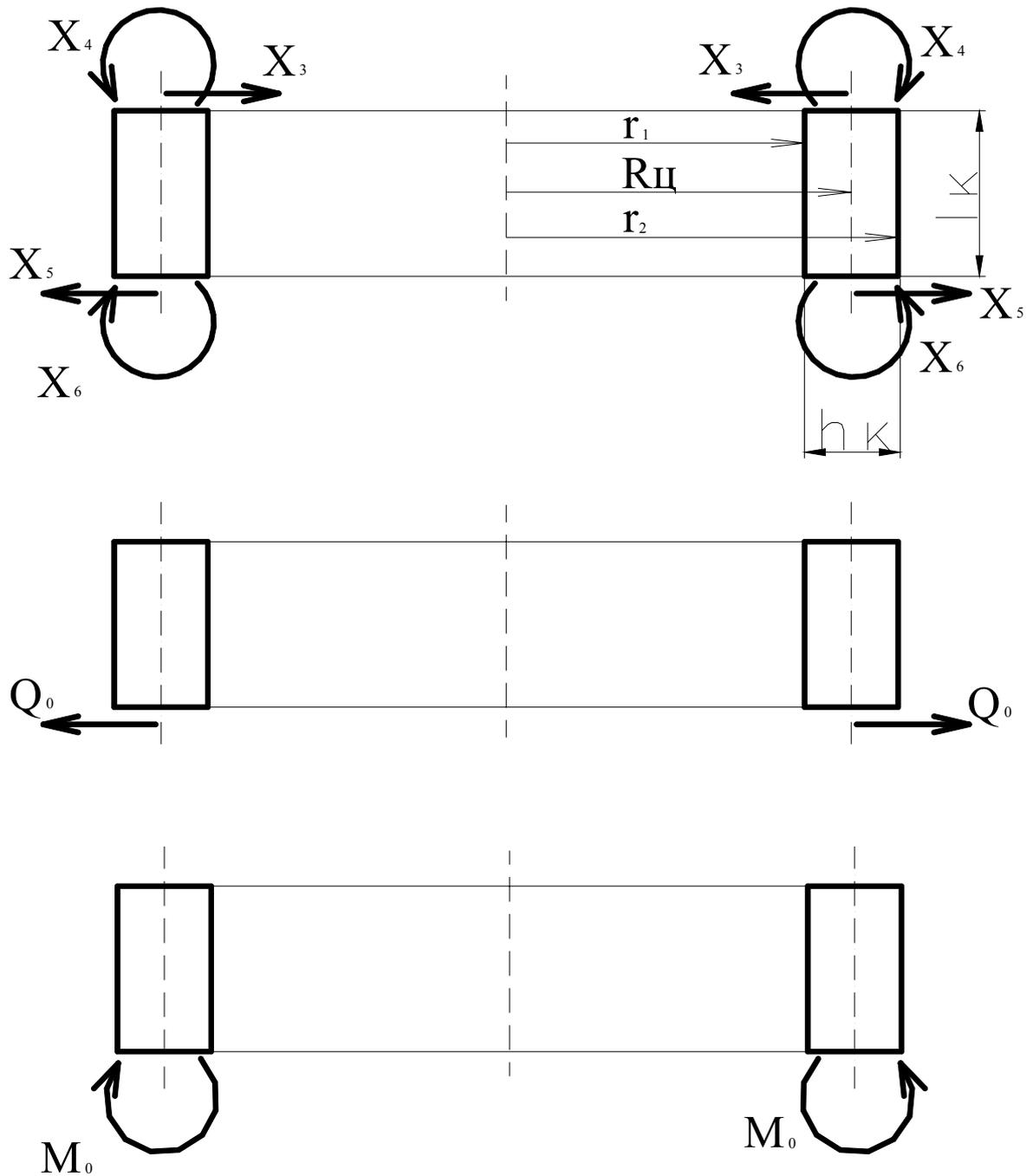


Рис. 5.4. К решению краевой задачи для кольцевого элемента

### 5.5.1. Определение перемещений в кольце от внутреннего избыточного давления

При действии внутреннего избыточного давления  $p$  в свободном кольце, так же, как и в свободной цилиндрической оболочке возникают только радиальные перемещения  $\Delta R_k = w$ . Используя методику, изложенную в п.5.2. для цилиндрической оболочки, можно записать для кольцевого элемента

$$w = \varepsilon_2 R_k = \frac{\sigma_2}{E} R_k = \frac{p R_k^2}{E h_k l_k} = \frac{p (r_2 + r_1)^2}{4 E h_k l_k}$$

здесь  $\sigma_2 = N_2 / F_k = N_2 / h_k l_k$ ,  $N_2 = p R_k$ ,  $R_k = (r_2 + r_1) / 2$ .

Радиальные перемещения краев кольца представляют собой перемещения в свободном кольце в направлении 3 (или 5) от действия давления  $p$ . Таким образом,

$$\Delta_{3,p}^k = -w = -\frac{p (r_2 + r_1)^2}{4 E h_k l_k}; \quad \Delta_{5,p}^k = -\Delta_{3,p}^k \quad (5.40)$$

Знаки в зависимостях (5.40) расставлены в соответствии с направлениями  $X_3$  и  $X_5$  для кольца в основной системе метода сил на рис.5.4,а.

Углы поворота краев свободного кольца при действии давления  $p$  отсутствуют, т.е. перемещения в направлениях 4 и 6 применяются равными нулю

$$\Delta_{4,p}^k = \Delta_{6,p}^k = 0. \quad (5.41)$$

### 5.5.2. Определение перемещений в кольце при решении краевой задачи

Для определения краевых перемещений необходимо к краям свободного кольца поочередно приложить равномерно – распределенные по окружности единичные поперечные силы  $Q_0$  и единичные моменты  $M_0$  (рис.5.4,б и 5.4,в) [1,4,5,20]. Для схемы на рис. 5.4,б нетрудно показать, что перемещение верхнего и нижнего краев кольца определяются зависимостями

$$w_B \Big|_{\substack{Q_0=1 \\ M_0=0}} = -\frac{2R_K^2}{Eh_K l_K}; \quad w_H \Big|_{\substack{Q_0=1 \\ M_0=0}} = \frac{4R_K^2}{Eh_K l_K}.$$

Угол поворота кольца как жесткого целого

$$\theta \Big|_{\substack{Q_0=1 \\ M_0=0}} = \frac{w_H - w_B}{l_K} = \frac{6R_K^2}{Eh_K l_K^2}.$$

Для схемы на рис. 5.4,в зависимости для перемещения верха и низа кольца примут вид

$$w_B \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = -\frac{6R_K^2}{Eh_K l_K^2}; \quad w_H \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = \frac{6R_K^2}{Eh_K l_K^2}.$$

Угол поворота

$$\theta \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = \frac{w_H - w_B}{l_K} = \frac{12R_K^2}{Eh_K l_K^3}.$$

При выводе этих формул использовались следующие выражения для геометрических характеристик сечения кольца:

$F_K = h_K l_K$  - площадь поперечного сечения;

$I_K = h_K l_K^3 / 12$  - момент инерции сечения;

$w_{K \max} = h_K l_K^2 / 6$  – момент сопротивления сечения.

Предложенные зависимости используются для определения искомых перемещений кольца, необходимых при построении системы канонических уравнений метода сил (5.1). Знаки перемещений

определяются направлений усилий  $X_3, X_4, X_5, X_6$ , принятыми в основной системе на рис. 5.1.

$$\begin{aligned}
 \delta_{33}^k &= w_H \Big|_{\substack{Q_0=1 \\ M_0=0}} = \frac{(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k}; & \delta_{34}^k &= -w_H \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = -\frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; \\
 \delta_{35}^k &= w_B \Big|_{\substack{Q_0=1 \\ M_0=0}} = \frac{(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k}; & \delta_{36}^k &= w_B \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = \frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; \\
 \delta_{44}^k &= \theta \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = \frac{3(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k^3}; & \delta_{45}^k &= -\theta \Big|_{\substack{Q_0=1 \\ M_0=0}} = -\frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; \\
 \delta_{46}^k &= -\theta \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = -\frac{3(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k^3}; & \delta_{55}^k &= w_H \Big|_{\substack{Q_0=1 \\ M_0=0}} = \frac{(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k}; \\
 \delta_{56}^k &= w_H \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = \frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; & \delta_{66}^k &= \theta \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = \frac{3(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k^3}; \\
 \delta_{43}^k &= \delta_{34}^k; & \delta_{53}^k &= \delta_{35}^k; & \delta_{63}^k &= \delta_{36}^k; \\
 \delta_{54}^k &= \delta_{45}^k; & \delta_{64}^k &= \delta_{46}^k; & \delta_{65}^k &= \delta_{56}^k
 \end{aligned} \tag{5.42}$$

Зависимости (5.42) записаны с учетом равенства

$$R_k = (r_2 + r_1)/2.$$

## 5.6. Построение решения при действии внутреннего избыточного давления

Геометрические размеры и основная система метода сил для рассматриваемой оболочки показаны ранее на рис. 5.1. Система канонических уравнений метода сил также построена ранее в п.5.1, и имеет вид (5.1).

Купольная часть оболочки удовлетворяет условиям подъемистости, цилиндрическая часть относится к категории длинных цилиндрических оболочек, а кольцевая балка жесткости рассматривается как жесткое кольцо прямоугольного поперечного сечения. В таком случае систему уравнений (5.1) в соответствии с выделенными блоками можно записать в виде двух независимых уравнений с двумя и четырьмя неизвестными

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1,p} = 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2,p} = 0; \end{cases} \quad (5.43)$$

$$\begin{cases} \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \delta_{35}X_5 + \delta_{36}X_6 + \Delta_{3,p} = 0 \\ \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \delta_{45}X_5 + \delta_{46}X_6 + \Delta_{4,p} = 0 \\ \delta_{53}X_3 + \delta_{54}X_4 + \delta_{55}X_5 + \delta_{56}X_6 + \Delta_{5,p} = 0 \\ \delta_{63}X_3 + \delta_{64}X_4 + \delta_{65}X_5 + \delta_{66}X_6 + \Delta_{6,p} = 0. \end{cases} \quad (5.44)$$

Коэффициенты канонических уравнений  $\delta_{ij}$  и свободные члены  $\Delta_{i,p}$  для системы уравнений (5.43) определяются следующим образом

$$\delta_{11} = \delta_{11}^u + \delta_{11}^d; \quad \delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{12}^u + \delta_{12}^d; \quad \delta_{22} = \delta_{22}^u + \delta_{22}^d,$$

где  $\delta_{ij}^d$  — перемещение днища оболочки от единичных  $X_1$  и  $X_2$ ; при условии жесткого защемления цилиндрической части в днище принимаются  $\delta_{ij}^d = 0$ ; по этой же причине  $\Delta_{i,p}^d = 0$ . Тогда окончательно в соответствии с (5.7) и (5.22)

$$\delta_{11} = \delta_{11}^u = \frac{S_u^3}{2D_u}; \quad \delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{12}^u = -\frac{S_u^2}{2D_u};$$

$$\delta_{22} = \delta_{22}^u = \frac{S_u}{D_u};$$

$$\Delta_{1,p} = \Delta_{1,p}^u = -\frac{pR_u^2}{Eh_u} \left(1 - \frac{v}{2}\right); \quad \Delta_{2,p} = 0. \quad (5.45)$$

Коэффициенты канонических уравнений  $\delta_{ij}$  и свободные члены  $\Delta_{i,p}$  для системы уравнений (5.44), учитывая (5.7), (5.8), (5.22) и (5.33) определяться следующими выражениями

$$\delta_{33} = \delta_{33}^c + \delta_{33}^k = \frac{S_c^3}{2D_c} \sin^2 \alpha + \frac{(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k};$$

$$\delta_{34} = \delta_{34}^c + \delta_{34}^k = \frac{S_c^2}{2D_c} \sin \alpha - \frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; \quad \delta_{43} = \delta_{34};$$

$$\delta_{35} = \delta_{35}^k = \frac{(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k}; \quad \delta_{53} = \delta_{35};$$

$$\delta_{36} = \delta_{36}^k = \frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; \quad \delta_{63} = \delta_{36};$$

$$\delta_{44} = \delta_{44}^c + \delta_{44}^k = \frac{S_c}{D_c} + \frac{3(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k^3};$$

$$\delta_{45} = \delta_{45}^k = -\frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; \quad \delta_{54} = \delta_{45};$$

$$\delta_{46} = \delta_{46}^k = \frac{3(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k^3}; \quad \delta_{64} = \delta_{46};$$

$$\delta_{55} = \delta_{55}^u + \delta_{55}^k = \frac{S_u^3}{2D_u} + \frac{(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k};$$

$$\delta_{56} = \delta_{56}^u + \delta_{56}^k = -\frac{S_u^2}{2D_u} + \frac{3(r_2 + r_1)^2}{2Eh_k l_k^2}; \quad \delta_{65} = \delta_{56};$$

$$\begin{aligned}\delta_{66} &= \delta_{66}^u + \delta_{66}^k = \frac{S_u}{D_c} + \frac{3(r_2 + r_1)^2}{Eh_k l_k^3}; \\ \Delta_{3,p} &= \Delta_{3,p}^c + \Delta_{3,p}^k = \frac{pR_c^2}{2Eh_c} \sin \alpha (1 - \nu) - \frac{p(r_2 + r_1)^2}{4Eh_k l_k}; \\ \Delta_{4,p} &= \Delta_{6,p} = 0; \\ \Delta_{5,p} &= \Delta_{5,p}^u + \Delta_{5,p}^k = -\frac{pR_u^2}{Eh_u} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) + \frac{p(r_2 + r_1)^2}{4Eh_k l_k}.\end{aligned}\quad (5.46)$$

После определения коэффициентов  $\delta_{ij}$  и свободных членов  $\Delta_{i,p}$  решаются системы уравнений (5.43), (5.44) и находятся неизвестные краевые силы  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$ . Краевые усилия определяются с использованием зависимостей (5.23) – (5.26) в следующей последовательности:

1. Нижний край цилиндрической части; координата  $z$  изменяется снизу вверх от 0 до  $l_u$ . Зависимости для краевых усилий в этом случае примут вид

$$\overline{N}_2 = \frac{2R_u}{S_u} e^{-\beta z} [X_2 (\cos \beta z - \sin \beta z) - X_1 \cos \beta z]; \quad (5.47)$$

$$\overline{M}_1 = S_u e^{-\beta z} [X_2 (\cos \beta z + \sin \beta z) - X_1 \sin \beta z]; \quad (5.48)$$

$$\overline{M}_2 = \nu \overline{M}_1; \quad (5.49)$$

$$\overline{Q} = e^{-\beta z} \left[ X_2 \frac{2}{S_u} \sin \beta z + X_1 (\cos \beta z - \sin \beta z) \right]; \quad (5.50)$$

2. Верхний край цилиндрической части; координата  $z$  изменяется также от 0 до  $l_u$ , но откладывается сверху вниз. Зависимости для краевых усилий имеет тот же вид, но в них вместо усилия  $X_2$  подставляется усилие  $X_6$ , а вместо усилия  $X_1$  – усилие  $X_5$ .

Результаты расчетов удобно представить в табличном виде. В таблице 5.1 (в качестве примера) принято, что  $z$  изменяется от 0 до 20

м. При подсчете тригонометрических функций их изменяющиеся аргументы  $\beta z$  подставляются в радианах.

Окончательное решение задачи для цилиндрической части оболочки определяется, как отмечалось, суммированием усилий безмоментного напряженного состояния (5.3) и найденных усилий краевого эффекта

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{pR_{\text{ц}}}{2}; \\ N_2 &= pR_{\text{ц}} + \overline{N}_2; \\ M_1 &= \overline{M}_1; \\ M_2 &= \overline{M}_2; \\ Q &= \overline{Q}. \end{aligned} \quad (5.51)$$

3. Нижний край сферической части; угловая координата  $\varphi$  изменяются от 0 до  $\alpha$  и откладываются в сторону вершины. Зависимости для краевых усилий в этом случае примут вид:

$$\overline{N}_1 = e^{-\lambda\varphi} \left[ \frac{2}{S_c} X_4 \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \lambda\varphi - \sqrt{2} X_3 \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \alpha \cos \left( \frac{\pi}{4} + \lambda\varphi \right) \right]; \quad (5.52)$$

$$\overline{N}_2 = -e^{-\lambda\varphi} \frac{2R_c}{S_c} \left[ \frac{\sqrt{2}}{S_c} X_4 \sin \left( \lambda\varphi - \frac{\pi}{4} \right) - X_3 \sin \alpha \cos \lambda\varphi \right]; \quad (5.53)$$

$$\overline{M}_1 = e^{-\lambda\varphi} \left[ \sqrt{2} X_4 \sin \left( \lambda\varphi + \frac{\pi}{4} \right) + S_c X_3 \sin \alpha \sin \lambda\varphi \right]; \quad (5.54)$$

$$\overline{M}_2 = \nu \overline{M}_1;$$

(5.55)

$$\overline{Q} = e^{-\lambda\varphi} \left[ \frac{2}{S_c} X_4 \sin \lambda\varphi - \sqrt{2} X_3 \cos \left( \frac{\pi}{4} + \lambda\varphi \right) \right]; \quad (5.56)$$

Таблица 5.1

		$Z, м$								
		0	1	2	3	4	6	10	20	
Усилия										
$\beta z$										
$e^{-\beta z}$										
$\cos \beta z - \sin \beta z$										
$\cos \beta z + \sin \beta z$										
Снизу вверх	$N_2$									
	$M_1$									
	$M_2$									
	$Q$									
Сверху вниз	$N_2$									
	$M_1$									
	$M_2$									
	$Q$									

Результаты расчетов также представляются в табличной форме. Например, для  $\varphi$ , изменяющегося от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  таблица может иметь следующий вид (таблица 5.2).

Окончательное решение для сферической части оболочки находится также в виде суммы двух решений: безмоментное напряженное состояние (5.4) и краевой эффект

$$N_1 = \frac{pR_c}{2} + \overline{N}_1;$$

$$N_2 = \frac{pR_c}{2} + \overline{N}_2;$$

$$M_1 = \overline{M}_1; \quad Q = \overline{Q}. \quad (5.57)$$

На рис. 5.5 показаны эпюры усилий в рассматриваемой оболочке при действии внутреннего избыточного давления.

Таблица 5.2

$\varphi$ , град(рад) усилия	0° (0)	10° (0,174)	20° (0,350)	30° (0,524)	60° (1,047)	90° (1,571)
$\lambda\varphi$						
$e^{-\lambda\varphi}$						
$\text{ctg}(\alpha-\varphi)$						
$\sin\lambda\varphi$						
$\cos\lambda\varphi$						
$\cos(\pi/4+\lambda\varphi)$						
$\sin(\pi/4\lambda+\varphi)$						
$\sin(\lambda\varphi-\pi/4)$						
$N_1$						
$N_2$						
$M_1$						
$M_2$						
$Q$						

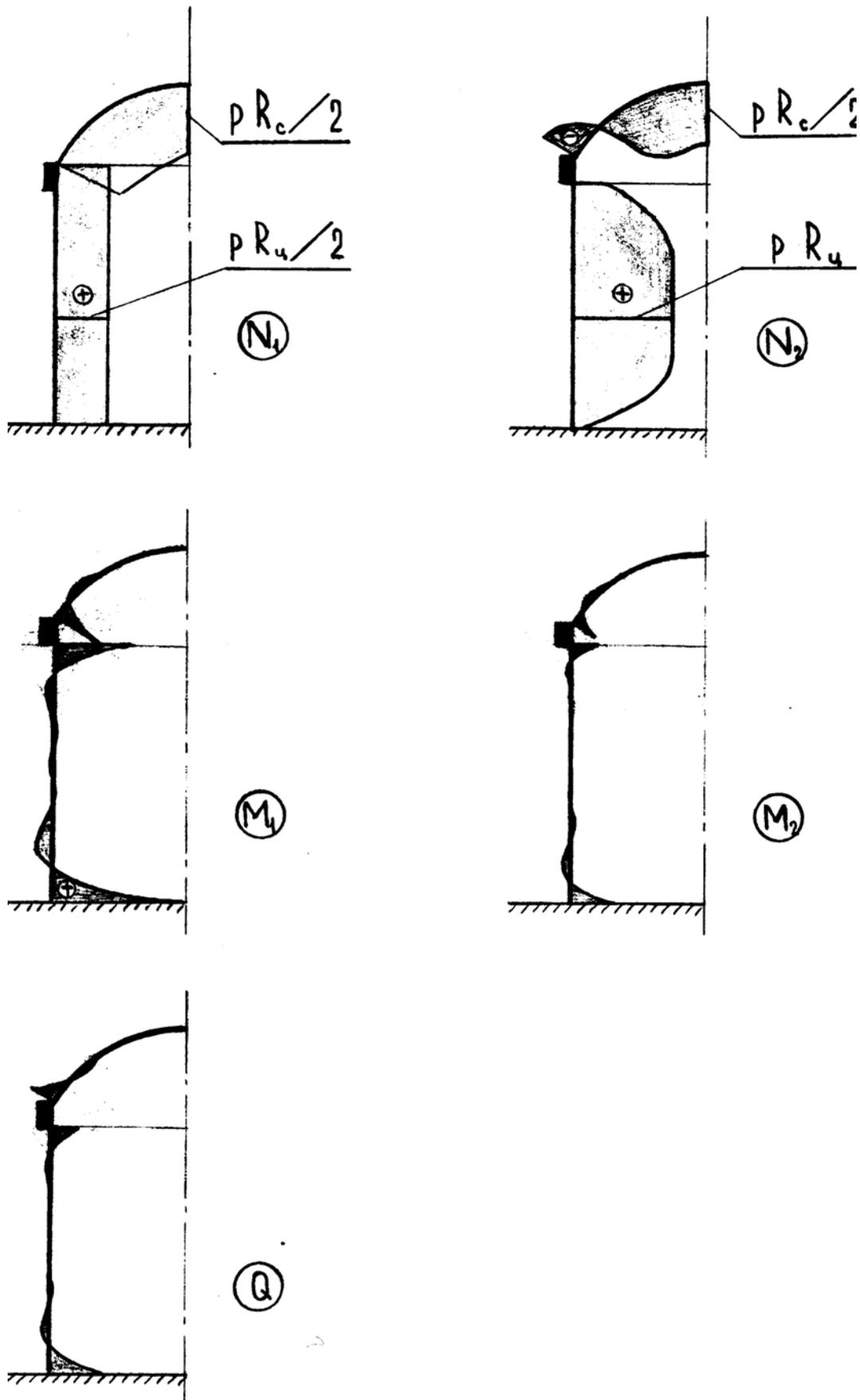


Рис. 5.5. Эпюры внутренних усилий в защитной оболочке при действии избыточного давления

## 5.7. Построение решения для защитной оболочки без кольцевой балки жесткости

Оболочка представляется состоящей из цилиндрической части радиуса  $R_c$  и толщины  $h_c$ , и сферической части радиуса  $R_c$  и толщины  $h_c$ . Основная система метода сил для такой оболочки показана на рис. 5.6. Система канонических уравнений в общем случае имеет вид

$$\begin{Bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{14} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{24} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} & \delta_{34} \\ \delta_{41} & \delta_{42} & \delta_{43} & \delta_{44} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta_{1,p} \\ \Delta_{2,p} \\ \Delta_{3,p} \\ \Delta_{4,p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.58)$$

Угол подсечки  $\alpha$  сферической части принимается удовлетворяющим условиям ее отнесения к категории подъемистых. В данном случае для простоты построения решения целесообразно принять  $\alpha=90^\circ$ , т.е. купольное покрытие рассматривать как полусферическую оболочку, для которой  $R_c=R_c$ .

Цилиндрическая часть рассматривается удовлетворяющей введенному понятию длиной цилиндрической оболочки.

Учитывая выше изложенное, систему уравнений (5.58) в соответствии с выделенными блоками можно записать в виде двух независимых уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1,p} = 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2,p} = 0; \end{cases} \quad (5.59)$$

$$\begin{cases} \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \Delta_{3,p} = 0 \\ \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \Delta_{4,p} = 0. \end{cases} \quad (5.60)$$

Коэффициенты канонических уравнений  $\delta_{ij}$  и свободные члены  $\Delta_{i,p}$  для системы уравнений (5.59) определяются по зависимостям в п.5.6 (см. формулы 5.45).

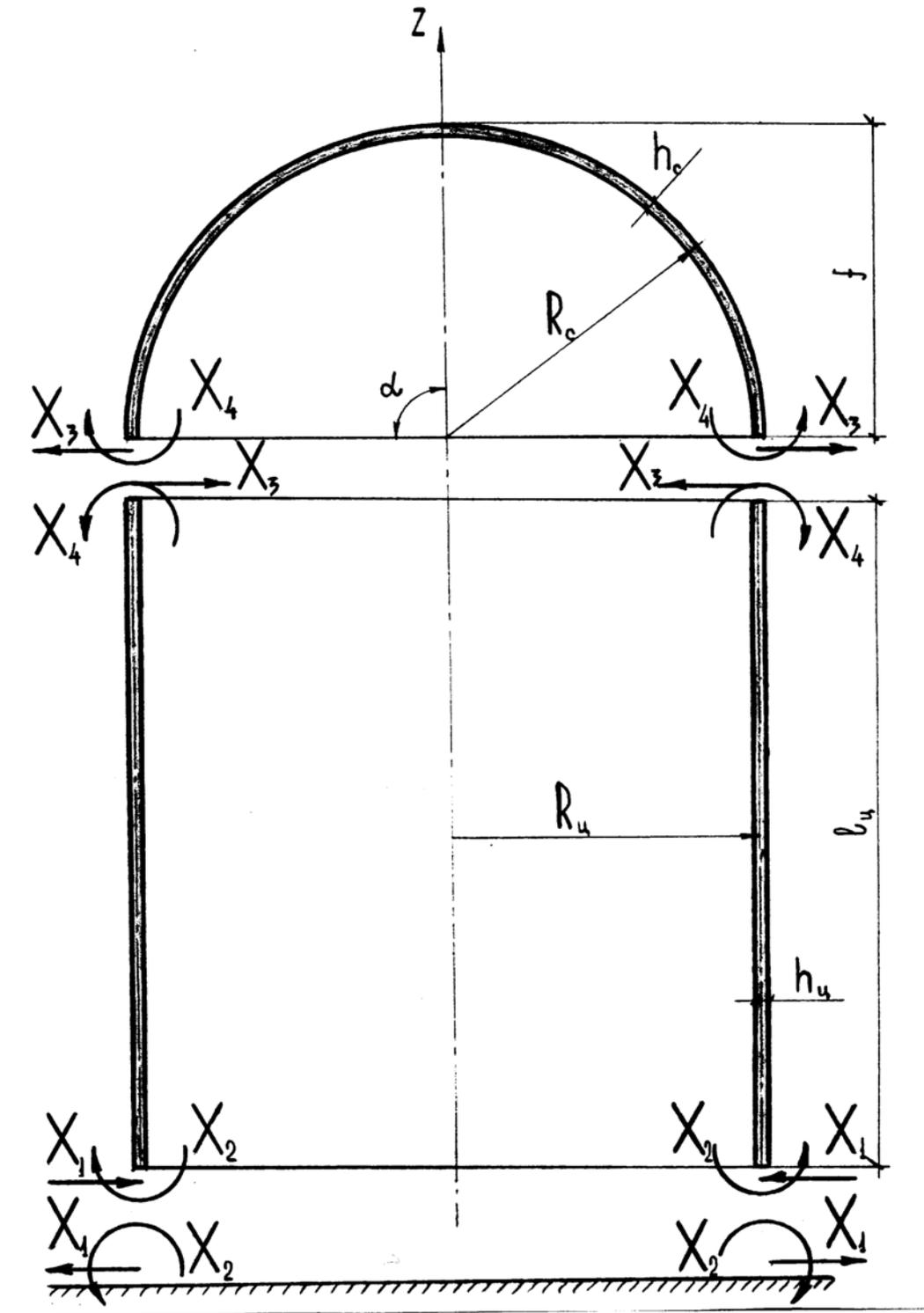


Рис. 5.6. Основная система метода сил и геометрические параметры оболочки без кольцевой балки жесткости

Коэффициенты  $\delta_{ij}$  и  $\Delta_{i,p}$  для системы уравнений (5.60) определяются из выражений

$$\delta_{33} = \delta_{33}^u + \delta_{33}^c = \frac{S_u^3}{2D_u} + \frac{S_c^3}{2D_c} \sin^2 \alpha;$$

$$\delta_{34} = \delta_{43} = \delta_{34}^u + \delta_{34}^c = -\frac{S_u^2}{2D_u} + \frac{S_c^2}{2D_c} \sin \alpha;$$

$$\delta_{44} = \delta_{44}^u + \delta_{44}^c = \frac{S_u}{D_u} + \frac{S_c}{D_c};$$

$$\Delta_{3,p} = \Delta_{3,p}^u + \Delta_{3,p}^c = -\frac{pR_u^2}{Eh_u} \left(1 - \nu/2\right) + \frac{pR_c^2 \sin \alpha}{2Eh_c} (1 - \nu);$$

$$\Delta_{4,p} = 0. \quad (5.61)$$

После подсчета коэффициентов  $\delta_{ij}$  и свободных членов  $\Delta_{i,p}$  решаются системы уравнений (5.59) и (5.60), и определяются неизвестные краевые усилия  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ . Далее, для определения краевых усилий используются зависимости (5.23) – (5.26). Задача решается в следующей последовательности:

- 1) Нижний край цилиндрической части; зависимости для усилий краевого эффекта имеют тот же вид, что и в п. 5.6 (формулы 5.47 – 5.50).
- 2) Верхний край цилиндрической части; зависимости для усилий краевого эффекта имеют тот же вид, но в них вместо  $X_1$  подставляется  $X_3$ , а вместо  $X_2$  –  $X_4$ .

Результаты расчета при ручном счете удобно представить в табличной форме (таблица имеет тот же вид, как и таблица 5.1 в п.5.6).

Для окончательного решения задачи и построения эпюр усилий используются зависимости (5.51).

- 3) Нижний край сферической части; угловая координата  $\varphi$  откладывается в сторону вершины купола и изменяется от 0 до  $\alpha$ . Зависимости для определения краевых усилий имеет вид (5.52) – (5.56).

Окончательное решение задачи получается при использовании зависимостей (5.57). При ручном счете удобно вести в табличной форме (таблица 5.2, п.5.6).

На рис. 5.7 для оболочки без кольцевой балки жесткости приведен пример построения эпюр усилий.

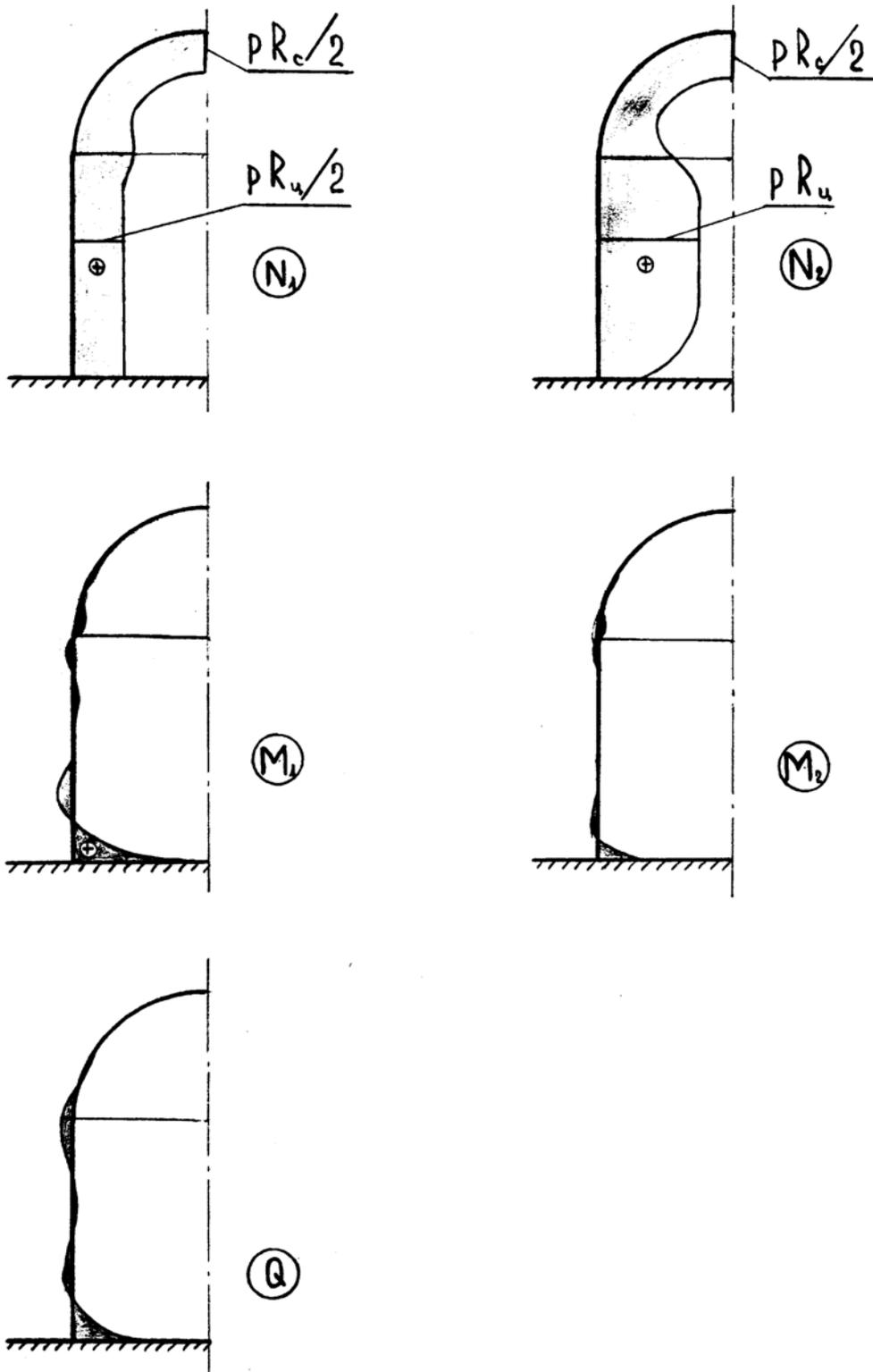


Рис. 5.7. Эпюры внутренних усилий в защитной оболочке без кольцевой балки жесткости при действии внутреннего избыточного давления

## **6. Напряженно-деформированное состояние защитных оболочек при температурных воздействиях**

### **6.1. Общие положения**

При решении задачи напряженно-деформированного состояния защитных оболочек от воздействия температуры считаются справедливыми принятые в п.5 гипотезы. Кроме того, температурное воздействие рассматривается как статическое, соответствующее установившемуся тепловому потоку, т.е. решается стационарная задача термоупругости.

Изменение внутренней  $t_v$  и наружной  $t_n$  температур возможно по высоте в пределах выделенных частей оболочки: цилиндрической, сферической и кольцевой балки жесткости. Модуль деформаций  $E$  и коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha$  материала допускается принимать независимыми от температуры. Следует также отметить, что под внутренней и наружной подразумеваются температуры на внутренней и наружной поверхностях соответственно, получаемые из теплофизического расчета по заданным температурам среды внутри и снаружи оболочки.

Распределение температуры по толщине стенок оболочки принимается линейным. Линейный закон изменения температуры, линейная связь между деформациями и напряжениями позволяют для упрощения расчетов пользоваться сложением и вычитанием эпюр изменения температуры, а также деформаций, напряжений и усилий, соответствующих этим эпюрам. Заданная линейная температурная эпюра представляется в виде суммы двух составляющих: равномерной, равной  $t_{cp}=0,5 \cdot (t_v+t_n)$ , и неравномерной (знакопеременной), равной  $\Delta t=0,5 \cdot (t_v-t_n)$  (рис.6.1).

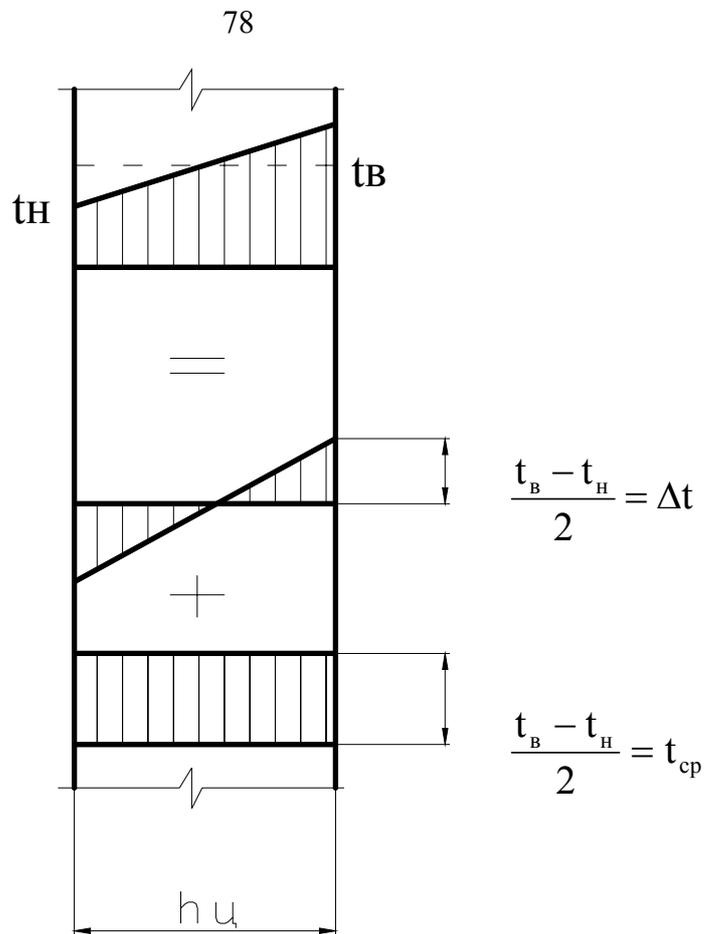


Рис. 6.1. Распределение температуры по толщине стенки цилиндрической оболочки и разложение эпюры температуры на две составляющие

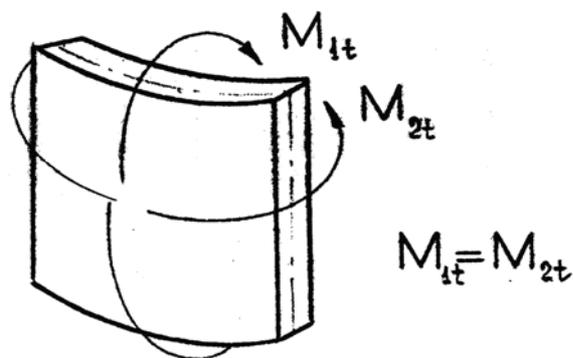


Рис. 6.2. Меридиональные и кольцевые температурные изгибающие моменты при  $t_B > t_H$

В таком случае, окончательное распределение усилий в элементах оболочки складывается при решении двух задач:

1. задачи об определении усилий при равномерном разогреве на величину  $t_{cp}$ ;
2. задачи об определении усилий при знакопеременной эпюре температуры  $\Delta t$ .

При решении первой и второй задач можно воспользоваться методикой, разработанной ранее для определения усилий в элементах оболочки от действия внутреннего избыточного давления.

Тогда при решении первой задачи окончательный результат складывается из усилий от равномерного разогрева каждого элемента оболочки (цилиндра, купола, кольца) как свободного и краевых усилий в этих же элементах, но только при действии  $t_{cp}$ .

При решении второй задачи окончательный результат – есть сумма усилий от неравномерного разогрева каждого элемента оболочки как свободного и краевых усилий, но только при учете  $\Delta t$ .

Для решения этих задач составляется основная система метода сил в виде на рис.5.1 и система канонических уравнений в виде (5.1).

$$\begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{14} & \delta_{15} & \delta_{16} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{24} & \delta_{25} & \delta_{26} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} & \delta_{34} & \delta_{35} & \delta_{36} \\ \delta_{41} & \delta_{42} & \delta_{43} & \delta_{44} & \delta_{45} & \delta_{46} \\ \delta_{51} & \delta_{52} & \delta_{53} & \delta_{54} & \delta_{55} & \delta_{56} \\ \delta_{61} & \delta_{62} & \delta_{63} & \delta_{64} & \delta_{65} & \delta_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_{1,t} \\ \Delta_{2,t} \\ \Delta_{3,t} \\ \Delta_{4,t} \\ \Delta_{5,t} \\ \Delta_{6,t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Как видно, в системе уравнений (6.1) коэффициенты  $\delta_{ij}$  остаются прежними, меняются лишь свободные члены  $\Delta_{i,t}$ . При условии отнесения купольной части к подъемистым куполам, а цилиндрической части к длинным цилиндрическим оболочкам, систему уравнений в

соответствии с выделенными блоками также можно представить в виде двух – с двумя и четырьмя неизвестными:

$$\begin{cases} \delta_{11} \cdot X_1 + \delta_{12} \cdot X_2 + \Delta_{1,t} = 0 \\ \delta_{21} \cdot X_1 + \delta_{22} \cdot X_2 + \Delta_{2,t} = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

$$\begin{cases} \delta_{33} \cdot X_3 + \delta_{34} \cdot X_4 + \delta_{35} \cdot X_5 + \delta_{36} \cdot X_6 + \Delta_{3,t} = 0 \\ \delta_{43} \cdot X_3 + \delta_{44} \cdot X_4 + \delta_{45} \cdot X_5 + \delta_{46} \cdot X_6 + \Delta_{4,t} = 0 \\ \delta_{53} \cdot X_3 + \delta_{54} \cdot X_4 + \delta_{55} \cdot X_5 + \delta_{56} \cdot X_6 + \Delta_{5,t} = 0 \\ \delta_{63} \cdot X_3 + \delta_{64} \cdot X_4 + \delta_{65} \cdot X_5 + \delta_{66} \cdot X_6 + \Delta_{6,t} = 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

Таким образом, при решении каждой из двух поставленных задач предстоит определить только свободные члены  $\Delta_{i,t}$ . Целесообразно определить их сначала для случая действия знакопеременной эпюры температуры  $\Delta t$ . В этом случае, как отмечено выше, необходимо рассмотреть свободные цилиндр, купол и кольцо при действии  $\Delta t$ , а затем определить усилия в этих элементах от краевых сил  $X_i$ , полученных при решении системы уравнений (6.1). Нахождение усилий в элементах оболочки, как свободных при действии  $\Delta t$ , связано с решением задачи об их изгибе от неравномерного разогрева.

## 6.2. Задача об изгибе элементов оболочки от неравномерного нагрева

Цилиндрическая часть. Рассматривается замкнутая цилиндрическая оболочка с постоянной толщиной стенок  $h_{ц}$  и радиусом срединной поверхности  $R_{ц}$ . По условиям решения задачи оболочка должна быть свободной, т.е. ее края должны иметь полную свободу перемещений. Однако, картину распределения усилий для такой оболочки сразу получить сложно. В связи с этим вводится промежуточный этап решения задачи, на котором предполагается, что края той же оболочки жестко защемлены от поворота в положении, при котором она была до нагрева. В таком случае при линейном изменении температуры по толщине стенки напряженное состояние эквивалентно случаю воздействия на каждый параллелепипед размером  $1 \times 1 \times h_{ц}$ , вырезанный из оболочки двумя сечениями по образующим и двумя радиальными сечениями, статически неопределимых изгибающих моментов: меридионального  $M_{1t}^0$  и кольцевого  $M_{2t}^0$ , причем  $M_{1t}^0 = M_{2t}^0$  (рис.6.2). Учитывая, что оболочка нагревается изнутри ( $t_2 > t_1$ ), изгибающие моменты  $M_{1t}^0$  и  $M_{2t}^0$  направлены так, что они вызывают сжатие внутренних и растяжение наружных волокон.

Подробное описание такой задачи приведено в ряде литературных источников [1, 4, 14, 20] и в данном пособии не рассматривается. Зависимости для определения  $M_{1t}^0$  и  $M_{2t}^0$  даются без вывода:

$$M_{1t}^0 = M_{2t}^0 = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h_{ц}^2}{6 \cdot (1 - \nu)} \quad (6.4)$$

Таким образом, в цилиндрической оболочке с краями, жестко защемленными от поворота, при действии  $\Delta t$  по всей высоте возникают моменты заделки, определяемые формулой (6.4).

Для того, чтобы перейти от заземленной по краям оболочки к оболочке со свободными краями, следует ликвидировать условия заземления, т.е. снять моменты заделки. Например, для  $M_{1t}^0$  к краям оболочки следует приложить моменты, равные по величине  $M_{1t}^0$ , но с обратным знаком.

Как видно из рис.6.3, результирующая эпюра усилий  $M_{1t}^0$  тогда представляется как сумма двух эпюр:

- постоянной по длине образующей при действии температурного момента  $M_{1t}^0$ ;
- быстро изменяющейся по длине образующей при действии момента  $M_{1t}^0$ , имеющей характер краевого эффекта.

Построение закона изменения момента  $M_{1t}^*$  уже описано ранее в п.п.5.3.2 и 5.3.3 при исследовании краевого эффекта на основе решения задачи об изгибе цилиндрической оболочки краевыми моментами и поперечными силами. Используя зависимость (5.19) для перемещения  $w$  и схему на рис.5.2, можно записать в данном случае:

$$M_{1t}^* \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=M_{1t}^0}} = -D_{\text{II}} \cdot \frac{d^2 \cdot w}{d \cdot z^2} = e^{-\beta z} \cdot M_{1t}^0 \cdot (\cos \beta z + \sin \beta z)$$

Тогда

$$M_{1t} = -M_{1t}^0 + M_{1t}^0 \cdot e^{-\beta z} \cdot (\cos \beta z + \sin \beta z) = M_{1t}^0 \cdot [e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z)]$$

Рассуждая аналогично, можно получить решение для усилий  $M_{2t}$ ,  $N_{2t}$ ,  $Q_t$ :

$$\begin{aligned} M_{2t} &= M_{2t}^0 \cdot [ve^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z) - 1] \\ N_{2t} &= M_{2t}^0 \cdot \frac{2R_{\text{II}}}{S_{\text{II}}^2} \cdot e^{-\beta z} \cdot (\cos \beta z - \sin \beta z) \\ Q_t &= M_{1t}^0 \cdot \frac{2}{S_{\text{II}}} \cdot e^{-\beta z} \cdot \sin \beta z \end{aligned} \quad (6.5)$$

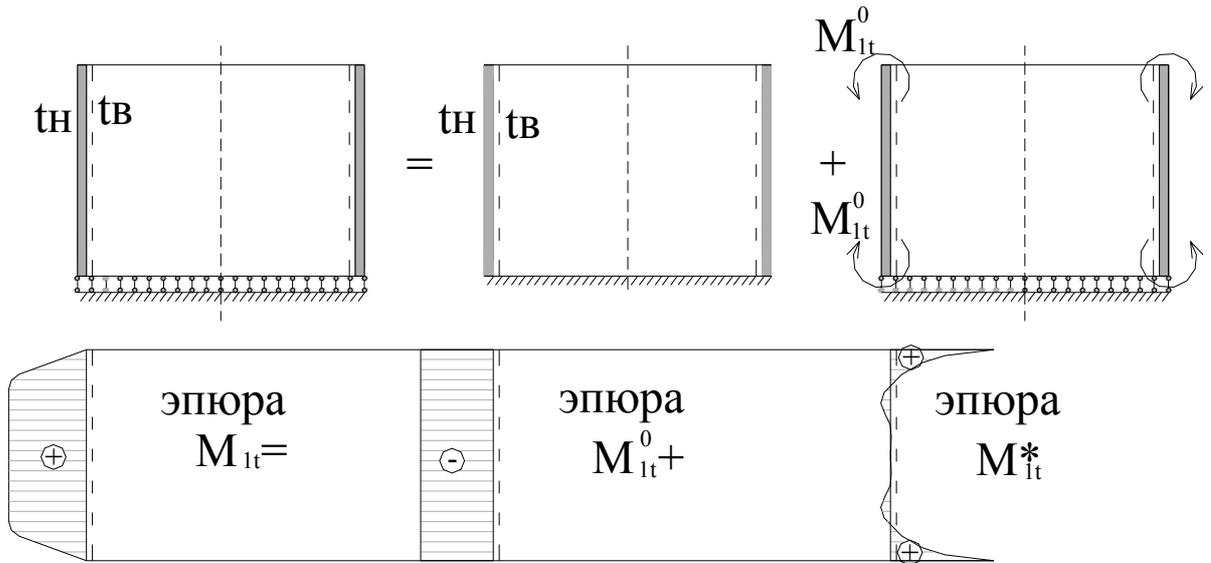


Рис. 6.3. К решению задачи об изгибе цилиндрической оболочки при  
неравномерном нагреве

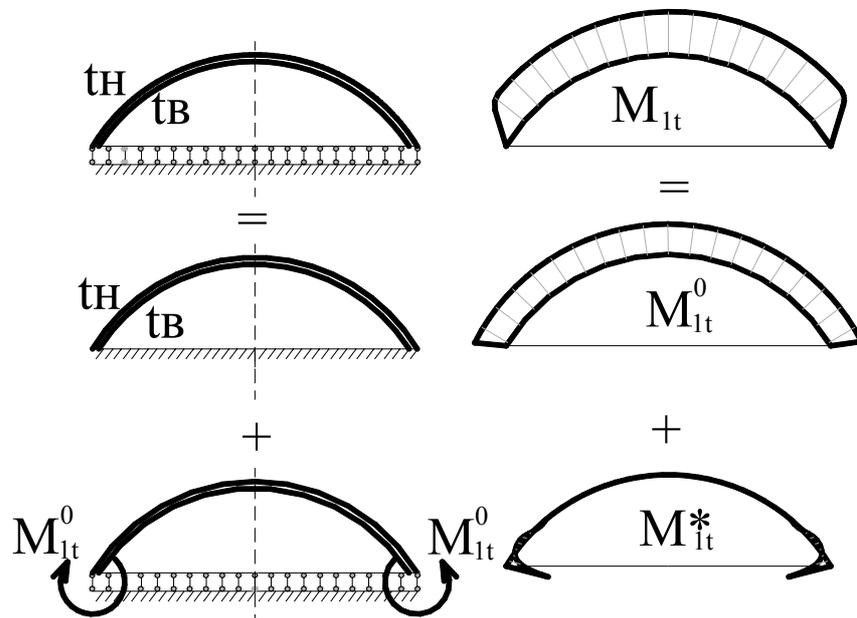


Рис. 6.4. К решению задачи об изгибе сферической оболочки при  
неравномерном нагреве

Ввиду отсутствия стеснения деформаций свободного цилиндра в меридиональном направлении при действии  $\Delta t$ , усилия  $N_{1t}$  не возникают, т.е.  $N_{1t}=0$ .

Таким образом, задача о неравномерном нагреве свободного цилиндра при действии знакопеременной составляющей эпюры температуры  $\Delta t$  решена.

Сферическая часть. Рассматривается сферический подъемистый купол постоянной толщины  $h_c$  радиусом срединной поверхности  $R_c$  с углом подсечки  $\alpha$ , края которого имеют полную свободу перемещений. Купол подвержен действию знакопеременной составляющей эпюры температуры  $\Delta t$ . По аналогии с рассмотренной цилиндрической оболочкой эпюра распределения усилий для свободного купола при действии  $\Delta t$  может быть получена также в виде суммы двух эпюр. Например, для меридионального направления в сфере эта сумма принимает вид (рис.6.4):

$$M_{1t} = M_{1t}^0 + M_{1t}^*, \quad \text{где}$$

$M_{1t}^0$  – температурный изгибающий момент в сферическом куполе в меридиональном направлении при условии, что края купола жестко закреплены от поворота; момент  $M_{1t}^0$  определяется по зависимости, аналогичной (6.4):

$$M_{1t}^0 = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h_c^2}{6 \cdot (1 - \nu)}; \quad (6.6)$$

здесь величина  $\Delta t = 0,5 \cdot (t_b - t_n)$  в общем случае в пределах сферической части может отличаться от определяемой ранее для цилиндра;

$M_{1t}^*$  – изгибающий момент в сферическом куполе, возникающий при действии моментов  $M_{1t}^0$ , приложенных к его краям с обратным знаком для снятия условий заделки.

Используя решение, полученное ранее в п.5.4.2 (рис.5.3) при исследовании краевого эффекта в сферической оболочке, можно, опуская промежуточные преобразования, записать:

$$M_{1t} \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=1}} = M_{1t}^0 \cdot \left[ \sqrt{2} e^{-\lambda\varphi} \cdot \sin\left(\lambda\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right]$$

Аналогично определяются усилия  $M_{2t}$ ,  $N_{1t}$ ,  $N_{2t}$ ,  $Q_t$ :

$$\begin{aligned} M_{2t} &= M_{2t}^0 \cdot \left[ \nu \sqrt{2} \cdot e^{-\lambda\varphi} \cdot \sin\left(\lambda\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right] \\ N_{1t} &= -M_{1t}^0 \cdot \frac{2}{S_c} \cdot e^{-\lambda\varphi} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \lambda\varphi \\ N_{2t} &= -M_{1t}^0 \cdot 2\sqrt{2} \cdot \frac{R_c}{S_c} \cdot e^{-\lambda\varphi} \cdot \sin\left(\lambda\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \\ Q_t &= M_{1t}^0 \cdot \frac{2}{S_c} \cdot e^{-\lambda\varphi} \cdot \sin \lambda\varphi \end{aligned} \quad (6.7)$$

Таким образом, можно отметить, что в рамках принятых допущений задача о неравномерном нагреве свободного сферического купола при действии  $\Delta t$  решена.

Кольцевая балка жесткости. По условиям решения задачи кольцевая балка жесткости представляется как жесткое кольцо, изгибные деформации которого не учитываются. В таком случае усилий в свободном кольце не возникает, т.е. для кольца при действии составляющей  $\Delta t$  в рамках принятых допущений принимается, что  $M_{1t} = M_{2t} = N_{1t} = N_{2t} = Q_t = 0$ .

### 6.3. Определение перемещений в элементах оболочки от неравномерного нагрева

Цилиндрическая часть. Определяются перемещения  $\Delta_{i,t}^u$  в свободном цилиндре от неравномерного нагрева  $\Delta t$  в направлениях 1 и 5 – линейные перемещения краев ( $\Delta_{1,t}^u = \Delta_{5,t}^u$ ) и в направлениях 2 и 6 – углы поворота краев ( $\Delta_{2,t}^u = \Delta_{6,t}^u$ ). Для их определения используются зависимости (5.20) и (5.21) из п.5.3.2. При решении данной задачи максимальные прогиб  $w$  и угол поворота  $\theta$  краев от изгиба возникают, как отмечалось, при приложении к краям оболочки равномерно распределенных моментов  $M_{1t}^0$ , т.е. при условии  $Q_0=0$  и  $M_0 = M_{1t}^0$ . Тогда:

$$w \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=M_{1t}^0}} = \Delta_{1,t}^u = -\frac{M_{1t}^0 \cdot \beta}{2\beta^3 \cdot D_{ц}} = -M_{1t}^0 \cdot |\delta_{12}^u| \quad (6.8)$$

$$\theta \Big|_{\substack{Q_0=0 \\ M_0=M_{1t}^0}} = \Delta_{2,t}^u = \frac{2M_{1t}^0 \cdot \beta}{2\beta^2 \cdot D_{ц}} = M_{1t}^0 \cdot |\delta_{22}^u| \quad (6.9)$$

Сферическая часть. Определяются перемещения  $\Delta_{i,t}^c$  в свободном сферическом куполе в направлении 3 – линейные перемещения  $\Delta_{3,t}^c$  и в направлении 4 – угол поворота  $\Delta_{4,t}^c$  при действии  $\Delta t$ . По аналогии с решением для цилиндрической оболочки можно записать:

$$\Delta_{3,t}^c = M_{1t}^0 \cdot |\delta_{34}^c| ; \quad \Delta_{4,t}^c = M_{1t}^0 \cdot |\delta_{44}^c| \quad (6.10)$$

В этих выражениях  $M_{1t}^0$  – температурный момент в сферическом куполе, определяемый формулой (6.6).

Кольцевая балка жесткости. Как отмечалось выше, кольцевая балка жесткости рассматривается, как жесткое кольцо, изгибные деформации которого принимаются равными нулю. В связи с этим при действии неравномерного нагрева  $\Delta t$ , вызывающего в свободном кольце только изгиб, линейные перемещения и углы поворота его краев принимают нулевые значения по условию решения задачи:

$$\Delta_{3,t}^k = \Delta_{4,t}^k = \Delta_{5,t}^k = \Delta_{6,t}^k = 0 \quad (6.11)$$

#### 6.4. Построение решения при температурном воздействии

Построение решения при действии знакопеременной составляющей эпюры температуры  $\Delta t$ , как отмечалось выше, представляется в виде суммы полученных решений от изгиба свободных цилиндрической оболочки, сферического купола и кольца и решения для этих же элементов от действия краевых сил  $X_i$ , найденных из уравнений (6.2) и (6.3).

Для определения коэффициентов  $\delta_{ij}$  используются зависимости (5.45), (5.46), а зависимости для определения свободных членов  $\Delta_{i,t}$  при действии только  $\Delta t$  принимают вид:

$$\begin{aligned}\Delta_{1,t} &= \Delta_{1,t}^u + \Delta_{1,t}^d \\ \Delta_{2,t} &= \Delta_{2,t}^u + \Delta_{2,t}^d \\ \Delta_{3,t} &= \Delta_{3,t}^c + \Delta_{3,t}^k \\ \Delta_{4,t} &= \Delta_{4,t}^c + \Delta_{4,t}^k \\ \Delta_{5,t} &= \Delta_{5,t}^u + \Delta_{5,t}^k \\ \Delta_{1,t} &= \Delta_{1,t}^u + \Delta_{1,t}^k\end{aligned}\tag{6.12}$$

После решения уравнений (6.2) и (6.3) определяются краевые неизвестные  $X_i$  и тогда зависимости для определения усилий в элементах оболочки с использованием (6.5) и (6.7) примут вид:

$$\begin{aligned}M_1 &= M_{1t} + \overline{M_1}; \\ M_2 &= M_{2t} + \overline{M_2}; \\ N_1 &= N_{1t} + \overline{N_1}; \\ N_2 &= N_{2t} + \overline{N_2}; \\ Q_1 &= Q_t + \overline{Q}.\end{aligned}\tag{6.13}$$

Как видно, в формулах (6.13) используются выражения (5.23), (5.24), (5.25), (5.26) для усилий  $\bar{M}_1, \bar{M}_2, \bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{Q}$  из п.5.3.3, в которые в данном случае подставляются соответствующие значения  $X_i$ , найденные при решении уравнений (6.2) и (6.3).

Таким образом, можно получить картину распределений усилий в рассматриваемой составной оболочке, но только при действии составляющей температурного воздействия  $\Delta t$ .

Однако, решение не является окончательным, т.к. не учтена вторая составляющая эпюры температуры –  $t_{cp}$ , представляющая собой равномерный нагрев. Строго говоря, учет этой составляющей должен быть осуществлен с использованием рассмотренной выше методики решения температурной задачи в той же последовательности, как и для учета знакопеременной составляющей  $\Delta t$ . Для этого должны быть рассмотрены решения для усилий и перемещений в элементах оболочки, как свободных, при действии  $t_{cp}$ , затем решены уравнения (6.2) и (6.3) и после определения величин  $X_i$  и подстановки их соответствующих значений в выражения (5.23) – (5.26), получены зависимости для усилий в виде, аналогичном (6.13). В таком случае только и может быть найден окончательный результат, как сумма усилий при действии  $\Delta t$  и  $t_{cp}$ .

Вместе с тем, анализируя разработанную последовательность решения задачи при действии равномерной эпюры температуры  $t_{cp}$ , можно заметить, что усилий в элементах оболочки, как свободных, от равномерного нагрева не возникает, т.е.  $M_{1t}=M_{2t}=N_{1t}=N_{2t}=Q=0$ . Краевые усилия  $X_i$  при решение уравнений (6.2) и (6.3), в которых свободные члены  $\Delta_{i,t}$  определены от действия  $t_{cp}$ , как перемещения в свободных элементах оболочки, принимают весьма малые значения.

В связи с этим, методику учета составляющей  $t_{cp}$  можно упростить. Известно, что при равномерном нагреве в элементах

оболочки, как свободных, возникают только радиальные перемещения их краев, а углы поворота равны нулю. Значения перемещений могут быть найдены по формулам [14,21].

$$\begin{aligned}
 \Delta_{1,t}^u &= \Delta_{5,t}^u = -\alpha t_{cp} R_u; \\
 \Delta_{2,t}^u &= \Delta_{6,t}^u = 0; \\
 \Delta_{3,t}^c &= \alpha t_{cp} R_c; \\
 \Delta_{4,t}^c &= 0; \\
 \Delta_{3,t}^k &= -\alpha t_{cp} R_k; \\
 \Delta_{5,t}^k &= \alpha t_{cp} R_k; \\
 \Delta_{4,t}^k &= \Delta_{6,t}^k = 0
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

Знаки в формулах (6.14) принимаются в соответствии с направлениями  $X_i$  в основной системе на рис. 5.1. Далее, считается, что достаточно учесть эти перемещения только при определении окончательных значений свободных членов  $\Delta_{i,t}$ , а значит системы уравнений (6.2) и (6.3) решить один раз. В таком случае, учитывая (6.12) и (6.14), окончательно для оболочки в целом при температурном воздействии  $(\Delta t + t_{cp})$  выражения для  $\Delta_{i,t}$  принимают вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{1,t} &= \Delta_{1,t}^u = -M_{1t}^0 \left| \delta_{12}^u \right| - \alpha t_{cp} R_u; \\
 \Delta_{2,t} &= \Delta_{2,t}^u = M_{1t}^0 \left| \delta_{12}^u \right|; \\
 \Delta_{3,t} &= \Delta_{3,t}^c + \Delta_{3,t}^k = M_{1t}^0 \left| \delta_{34}^c \right| + \alpha t_{cp} R_c - \alpha t_{cp} R_k; \\
 \Delta_{4,t} &= \Delta_{4,t}^c + \Delta_{4,t}^k = M_{1t}^0 \left| \delta_{44}^c \right|; \\
 \Delta_{5,t} &= \Delta_{5,t}^u + \Delta_{5,t}^k = -M_{1t}^0 \left| \delta_{56}^u \right| - \alpha t_{cp} R_u + \alpha t_{cp} R_k; \\
 \Delta_{6,t} &= \Delta_{6,t}^u + \Delta_{6,t}^k = M_{1t}^0 \left| \delta_{66}^u \right|.
 \end{aligned} \tag{6.15}$$

После решения систем уравнений (6.2) и (6.3) с учетом(6.15) определяются неизвестные  $X_i$ , которые далее используются в зависимостях (6.12) для нахождения усилий краевого эффекта  $\bar{M}_1, \bar{M}_2, \bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{Q}$ . Тогда окончательное решение задачи при температурном воздействии осуществляется в следующей последовательности:

1). Нижний край цилиндрической оболочки; координата  $z$  изменяется снизу вверх от 0 до  $l_{ц}$ . Зависимости для усилий примут вид:

$$M_1 = M_{1t}^0 [e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z) - 1] + S_{ц} e^{-\beta z} [X_2 \beta (\cos \beta z + \sin \beta z) - X_1 \sin \beta z]; \quad (6.16)$$

$$M_2 = M_{2t}^0 [v e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z) - 1] + v S_{ц} e^{-\beta z} [X_2 \beta (\cos \beta z + \sin \beta z) - X_1 \sin \beta z]; \quad (6.17)$$

$$N_1 = 0; \quad (6.18)$$

$$N_2 = M_{1t}^0 \frac{2R_{ц}}{S_{ц}^2} e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z) + \frac{2R_{ц}}{S_{ц}} e^{-\beta z} [X_2 \beta (\cos \beta z - \sin \beta z) - X_1 \cos \beta z]; \quad (6.19)$$

$$Q = M_{1t}^0 \frac{2}{S_{ц}} e^{-\beta z} \sin \beta z + e^{-\beta z} \left[ X_2 \frac{2}{S_{ц}} \sin \beta z + X_1 (\cos \beta z - \sin \beta z) \right]. \quad (6.20)$$

2). Верхний край цилиндрической оболочки; координата  $z$  изменяется сверху вниз от 0 до  $l_{ц}$ . Зависимости для усилий имеют тот же вид, но слагаемые от усилий краевого эффекта вместо  $X_1$  подставляется  $X_5$ , а вместо  $X_2$  –  $X_6$ . Результаты расчетов при ручном счете удобно представить в табличной форме. Таблица может иметь тот же вид, что и таблица 5.1 в п.5.6.

3). Нижний край сферической части; угловая координата  $\varphi$  изменяется от 0 до  $\alpha$  и откладывается в сторону вершины купола. Зависимости для усилий примут вид

$$M_1 = M_{1t}^0 \left[ \sqrt{2} e^{-\lambda\varphi} \sin\left(\lambda\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right] + e^{-\lambda\varphi} \left[ \sqrt{2} X_4 \sin\left(\lambda\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + S_c X_3 \sin \alpha \sin \lambda\varphi \right]; \quad (6.21)$$

$$M_2 = M_{2t}^0 \left[ v \sqrt{2} e^{-\lambda\varphi} \sin\left(\lambda\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right] + v e^{-\lambda\varphi} \left[ \sqrt{2} X_4 \sin\left(\lambda\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + S_c X_3 \sin \alpha \sin \lambda\varphi \right]; \quad (6.22)$$

$$N_1 = -M_{1t}^0 \frac{2}{S_c} e^{-\lambda\varphi} \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \lambda\varphi + \\ + e^{-\lambda\varphi} \left[ \frac{2}{S_c} X_4 \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \lambda\varphi - \sqrt{2} X_3 \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi) \sin \alpha \cos\left(\frac{\pi}{4} + \lambda\varphi\right) \right]; \quad (6.23)$$

$$N_2 = -M_{1t}^0 2\sqrt{2} \frac{R_c}{S_c} e^{-\lambda\varphi} \sin\left(\lambda\varphi - \frac{\pi}{4}\right) - \\ - e^{-\lambda\varphi} \frac{2R_c}{S_c} \left[ \frac{\sqrt{2}}{S_c} X_4 \sin\left(\lambda\varphi - \frac{\pi}{4}\right) - X_3 \sin \alpha \cos \lambda\varphi \right]; \quad (6.24)$$

$$Q_t = M_{1t}^0 \frac{2}{S_u} e^{-\lambda\varphi} \sin \lambda\varphi + e^{-\lambda\varphi} \left[ \frac{2}{S_u} X_4 \sin \lambda\varphi - \sqrt{2} X_3 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \lambda\varphi\right) \right] \quad (6.25)$$

При ручном счете результаты расчетов также можно свести в таблицу, имеющую тот же вид, что и таблица 5.2 в п. 5.6.

На рис. 6.5 в качестве примера показан вид эпюр усилий при температурном воздействии, когда  $t_b > t_n$ .

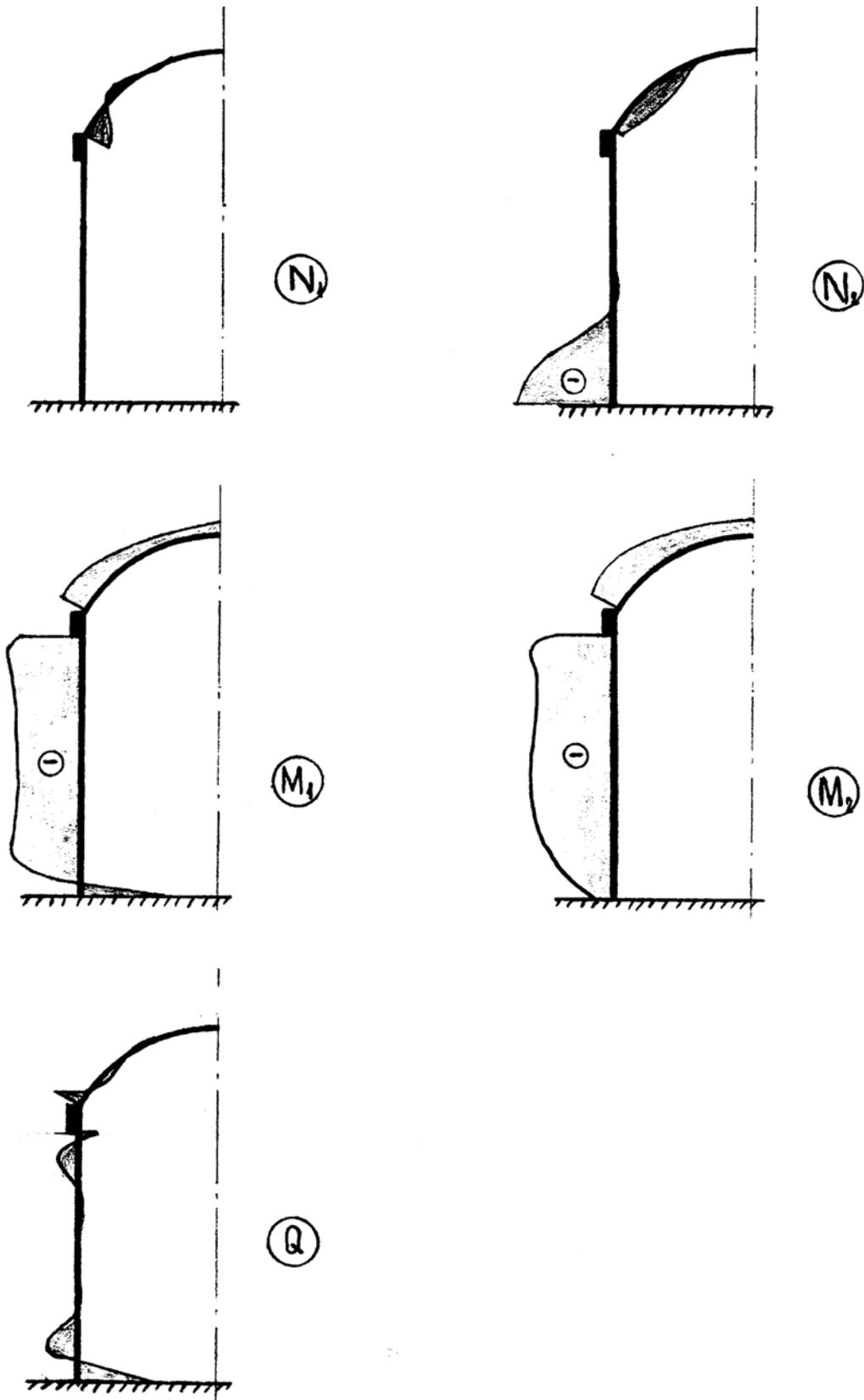


Рис. 6.5. Эпюры внутренних усилий в защитной оболочке при температурном воздействии

## 6.5. Построение решения для оболочки без кольцевой балки жесткости

Рассматривается оболочка с параметрами принятыми в п. 5.7, основная система метода сил для которой имеет тот же вид (рис. 5.6). Система канонических уравнений в этом случае записывается аналогично (5.58).

$$\begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{14} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{24} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} & \delta_{34} \\ \delta_{41} & \delta_{42} & \delta_{43} & \delta_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_{1,t} \\ \Delta_{2,t} \\ \Delta_{3,t} \\ \Delta_{4,t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.26)$$

Рассматривается длинная цилиндрическая оболочка и подъемистый купол, в данном случае в виде полусферы, т.е.  $\alpha=90^\circ$ . При этом  $R_{\text{ц}}=R_{\text{с}}$ .

Система уравнений (6.26) также представляется в соответствии с выделенными блоками в виде двух несвязанных систем уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1,t} = 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2,t} = 0; \end{cases} \quad (6.27)$$

$$\begin{cases} \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \Delta_{3,t} = 0 \\ \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \Delta_{4,t} = 0. \end{cases} \quad (6.28)$$

Коэффициенты канонических уравнений  $\delta_{ij}$  в этом случае определяются также, как и в п. 5.7 при действии внутреннего избыточного давления (зависимости 5.61), а свободные члены  $\Delta_{i,p}$  – по формулам

$$\begin{aligned}\Delta_{1,t} &= \Delta_{1,t}^u = -M_{1t}^0 \left| \delta_{12}^u \right| - \alpha t_{cp} R_{\text{ц}}; \\ \Delta_{2,t} &= \Delta_{2,t}^u = M_{1t}^0 \left| \delta_{22}^u \right|; \\ \Delta_{3,t} &= \Delta_{3,t}^u + \Delta_{3,t}^c = -M_{1t}^0 \left| \delta_{12}^u \right| - \alpha t_{cp} R_{\text{ц}} + M_{1t}^0 \left| \delta_{34}^c \right| + \alpha t_{cp} R_{\text{с}}; \\ \Delta_{4,t} &= \Delta_{4,t}^u + \Delta_{4,t}^c = M_{1t}^0 \left| \delta_{22}^u \right| + M_{1t}^0 \left| \delta_{44}^c \right|;\end{aligned}\quad (6.29)$$

После определения коэффициентов  $\delta_{ij}$  и свободных членов  $\Delta_{i,p}$  решаются системы уравнений (6.27) и (6.28), и определяются неизвестные краевые усилия  $X_i$ . Окончательные усилия в рассматриваемой оболочке определяются в следующей последовательности:

1). Нижний край цилиндрической оболочки; координата  $z$  откладывается снизу вверх и изменяется от 0 до  $l_{\text{ц}}$ . Зависимости для усилий имеют тот же вид, что и в п. 5.6 (зависимости 5.47 – 5.50).

2). Верхний край цилиндрической оболочки; координата  $z$  откладываются сверху вниз и изменяется также от 0 до  $l_{\text{ц}}$ . Зависимости для усилий имеют тот же вид, но в них вместо  $X_5$  подставляется  $X_3$ , а вместо  $X_6$  –  $X_2$ .

3). Нижний край сферического купола; угловая координата  $\varphi$  откладывается в сторону вершины купола и изменяется от 0 до  $\alpha$ . Зависимости для усилий имеют вид (5.52) – (5.56).

При ручном счете и в этом случае подходят таблицы 5.1 и 5.2.

На рис. 6.6. приведен пример построения эпюр усилий в рассматриваемой оболочке, подвергаемой температурному нагреву при  $t_{\text{в}} > t_{\text{н}}$ .

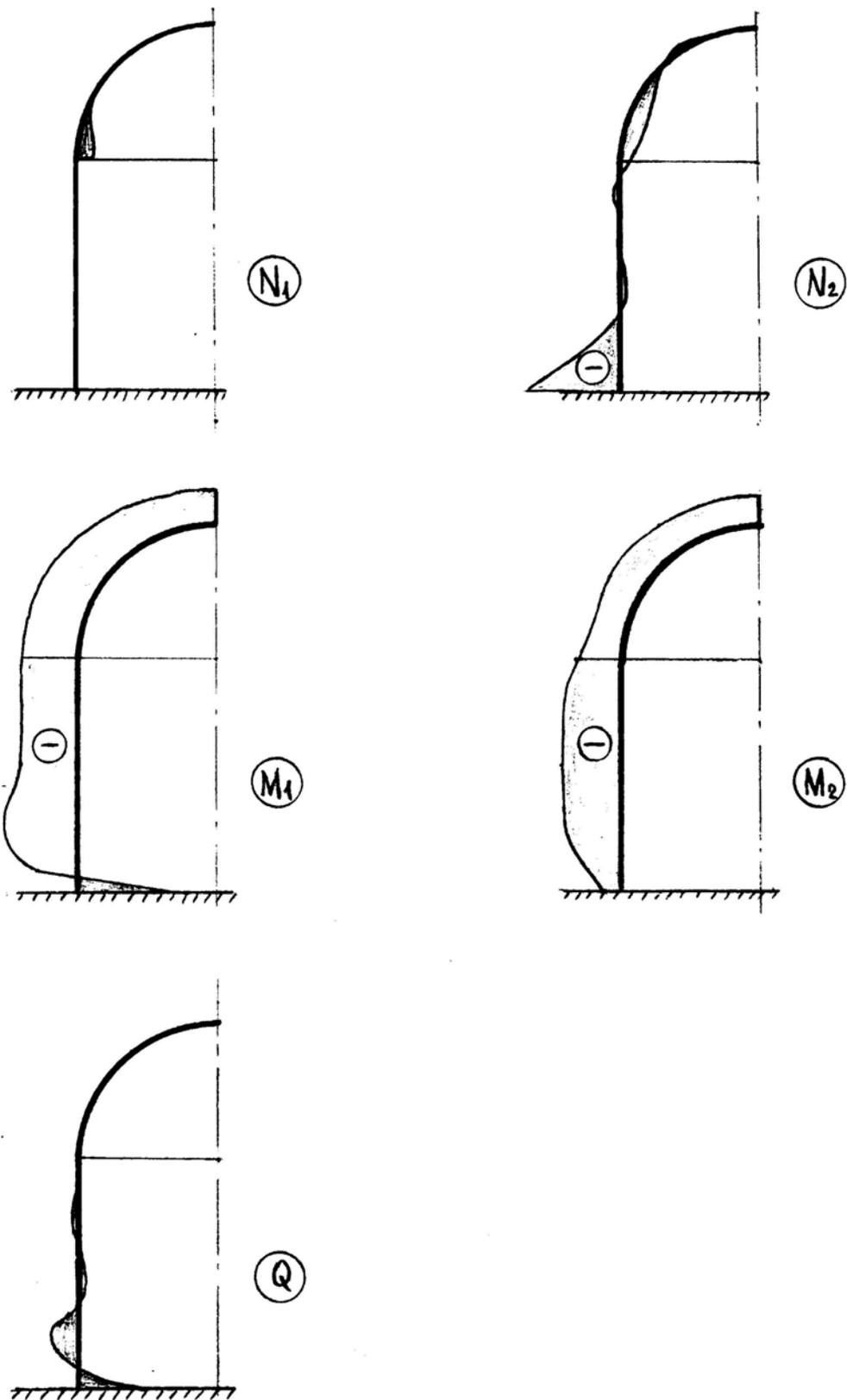


Рис. 6.6. Эпюры внутренних усилий в защитной оболочке без кольцевой балки жесткости при температурном воздействии

## 7. Описание программы расчеты защитной оболочки

Рассмотренная методика расчета защитных оболочек АЭС положена в основу составления программы «SHILD» для IBM-совместимых компьютеров, позволяющая вычислять усилия, возникающие в оболочке при действии внутреннего избыточного давления и температурного перепада на любой стадии прохождения максимальной проектной аварии (МПА). Программа расчета позволяет рассчитать усилия для любых конструктивных решений оболочки, т.е., как при наличии кольцевой балки жесткости, так и без нее. Программа составлена на алгоритмическом языке «С++» с использованием вставок на языке «Ассемблера». При составлении программы применена среда разработки «Boland С++4.5» с подключением транслятора «Turbo Assembler v3.2». Управление программой осуществляется в диалоговом режиме, желательно с применением «мыши». Результаты расчета выводятся на экран в виде графических эпюр усилий, либо, по желанию пользователя, в виде таблиц. Таблицы усилий от заданных воздействий и сами исходные данные могут быть выведены в текстовый файл или распечатаны на принтере.

При запуске программы на экран выводится информационное окно, которое можно погасить нажатием на клавишу «Enter», либо с использованием «мыши» нажатием кнопки при подведении ее на «Ок». Затем программа переходит в режим ввода данных. В соответствующие ячейки вводятся геометрические размеры оболочки, наличие кольцевой балки жесткости и т.п. (рис.7.1,а). Ввод цифровых значений производится с клавиатуры и завершается нажатием на «Enter»; при необходимости соответствующие значения можно оставлять без имени. Изменение состояния ячеек «наличия-отсутствия» (есть/нет балка жесткости и т.п.) осуществляется нажатием клавиши «Пробел» или щелчком «мыши» по переключателю. Перемещаться по ячейкам можно

а) Программа расчета защитных оболочек  
1996 г.

Выход

- Данные
- Результат
- Геометрия
- Нагрузки
- Коэффициенты

Внутренний диаметр цилиндра, м	40
Высота цилиндра, м	50
Толщина стенки цилиндра, м	1.8
Угол подседки, град.	40
Толщина стенки купола, м	1
Балка жесткости	<input checked="" type="checkbox"/>
Высота балки, м	5
Толщина балки, м	4
Внутренний радиус, м	20

б) Программа расчета защитных оболочек  
1996 г.

Выход

- Данные
- Результат
- Геометрия
- Нагрузки
- Коэффициенты

Учет собственного веса	<input checked="" type="checkbox"/>
Учет внутреннего давления	<input checked="" type="checkbox"/>
Давление, $\text{тс/м}^2$	40
Учет температурного воздействия	<input checked="" type="checkbox"/>
Температура внутри цилиндра, $^{\circ}\text{C}$	80
Температура снаружи цилиндра, $^{\circ}\text{C}$	10
Температура внутри купола, $^{\circ}\text{C}$	80
Температура снаружи купола, $^{\circ}\text{C}$	-20
Температура внутри балки жесткости, $^{\circ}\text{C}$	80
Температура снаружи балки жесткости, $^{\circ}\text{C}$	10

в) Программа расчета защитных оболочек  
1996 г.

Выход

- Данные
- Результат
- Геометрия
- Нагрузки
- Коэффициенты

Количество точек для цилиндра	20
Количество точек для сферы	20
Объемная вес бетона, $\text{тс/м}^3$	2.4
Модуль деформации E, $\text{тс/м}^2$	3300000
Коэффициент Пуассона	0.2
Коэффициент температурного расширения	$1.1e-05$

Рис. 7.1. Информационные окна режима ввода исходных данных

либо с помощью клавиш управления курсором, либо с помощью «мыши». После этого осуществляется выбор требуется воздействий (собственный вес, внутреннее избыточное давление, температура) и ввод их численных значений аналогичным образом (рис. 7.1, б), а затем – ввод необходимых коэффициентов (рис. 7.1, в). Переключение между этими тремя режимами осуществляется либо автоматически в процессе ввода данных, либо нажатием на соответствующую каждой кнопке ключевую клавишу, подсвеченную на надписи кнопки красным цветом.

После ввода данных программа переключается в режим расчета, который при числе расчетных точек порядка нескольких сотен проходит за время менее секунды и сопровождается выводом соответствующих сообщений о ходе расчета, после чего включается режим вывода данных.

Вывод данных на экран может осуществляться как в табличной форме (рис.7.2.), так и в графической, в виде эпюр (рис.7.3). Выбор соответствующего режима, а также выбор требуемой эпюры, воздействия или части оболочки производится также нажатием на необходимые кнопки либо «мышью», либо с использованием ключевых клавиш.

При просмотре эпюр можно уточнить численное значение в требуемой точке, нажав правую кнопку «мыши» в этой точке. Для таблиц значения, полностью не отображенные в ячейке, выделяются желтым цветом, при необходимости их также можно уточнить нажатием правой кнопки «мыши». «Прокрутка» больших таблиц по экрану может осуществляться клавишами управления курсором, «прокрутка» на страницу – «Pg Up», «Pg Down».

Для вывода полученных результатов предоставляется возможность выбора имени файла и порта печатающего устройства. Выведены могут

быть результаты расчета и исходные данные как

**Программа расчета  
защитных оболочек**  
1996 г.

**Выход**

**Данные**  
Результат

**Графика**  
Таблицы

**Вывод**

**Воздействие**  
Давление

**Цилиндр**  
Купол

Внутреннее избыточное давление						
Цилиндрическая часть						
№	Коорд	M1, тс·м	M2, тс·м	N1, тс	N2, тс	Q, тс
1	0	262.1951	52.43902	412	82.39885	-137.3973
2	2.631	17.81458	3.562916	412	300.1148	-53.19791
3	5.263	-52.2335	-10.4467	412	605.0739	-6.594487
4	7.894	-44.93566	-8.987132	412	786.4033	8.289895
5	10.52	-21.6429	-4.32858	412	850.0309	8.078801
6	13.15	-5.437313	-1.087463	412	853.6454	4.164849
7	15.78	1.25851	0.251702	412	840.4094	1.185021
8	18.42	2.376279	0.4752559	412	829.1866	-0.134595
9	21.05	1.548525	0.309705	412	823.6832	-0.390678
10	23.68	0.5496631	0.1099326	412	822.049	-0.218241
11	26.31	-0.221914	-0.044382	412	822.1377	0.0368306
12	28.94	-0.899627	-0.179925	412	823.3097	0.2137656
13	31.57	-1.430144	-0.286028	412	826.4483	0.1302198
14	34.21	-0.967914	-0.193582	412	832.7651	-0.550431
15	36.84	2.477727	0.4955454	412	840.7771	-2.192768
16	39.47	11.32434	2.264867	412	840.8114	-4.518259
17	42.10	24.93311	4.986622	412	809.209	-5.160497
18	44.73	31.69674	6.339348	412	711.8572	2.083556
19	47.36	-1.53176	-0.306351	412	537.9349	26.90075
20	50	-130.5697	-26.11395	412	389.6696	74.44522

**Программа расчета  
защитных оболочек**  
1996 г.

**Выход**

**Данные**  
Результат

**Графика**  
Таблицы

**Вывод**

**Воздействие**  
Давление

**Цилиндр**  
Купол

Внутреннее избыточное давление						
Купольная часть						
№	Коорд	M1, тс·м	M2, тс·м	N1, тс	N2, тс	Q, тс
1	0	108.231	21.6462	584.7994	313.2665	73.31017
2	2.105	59.82001	11.964	595.7654	325.1794	49.07182
3	4.210	24.96382	4.992764	607.2712	367.4751	29.4785
4	6.315	1.895132	0.3790264	618.103	422.7048	14.78122
5	8.421	-11.73413	-2.346826	627.5175	479.2713	4.577633
6	10.52	-18.34684	-3.669368	635.1512	530.2798	-1.869581
7	12.63	-20.13803	-4.027606	640.9236	572.3429	-5.409961
8	14.73	-18.92435	-3.784871	644.9472	604.4922	-6.863172
9	16.84	-16.09895	-3.21979	647.4504	627.2747	-6.939703
10	18.94	-12.65259	-2.530517	648.716	642.0578	-6.206971
11	21.05	-9.231058	-1.846212	649.0367	650.5327	-5.085628
12	23.15	-6.207184	-1.241437	648.6848	654.3895	-3.863854
13	25.26	-3.753264	-0.750652	647.8943	655.1283	-2.720507
14	27.36	-1.905673	-0.381134	646.8518	653.971	-1.750827
15	29.47	-0.617658	-0.123531	645.6938	651.8404	-0.990759
16	31.57	0.2006427	0.0401285	644.5044	649.3825	-0.437730
17	33.68	0.8541038	0.1308208	643.305	647.0094	-0.067057
18	35.78	0.8445825	0.1689165	641.9958	644.9515	0.1560409
19	37.89	0.8607742	0.1721548	639.9023	643.3073	0.2683208
20	40	0.7955536	0.1591107	627.653	642.2883	0.3014023

Рис. 7.2. Пример вывода результатов в табличной форме

вместе, так и по отдельности (рис.7.3). Управление и выбор осуществляются аналогично предыдущим режимам.

В любой момент возможно переключение из одного режима в другой (для изменения исходных данных, нагрузок и т.п.).

Выход из программы осуществляется в любой момент нажатием на соответствующую кнопку, либо на клавишу «F10».

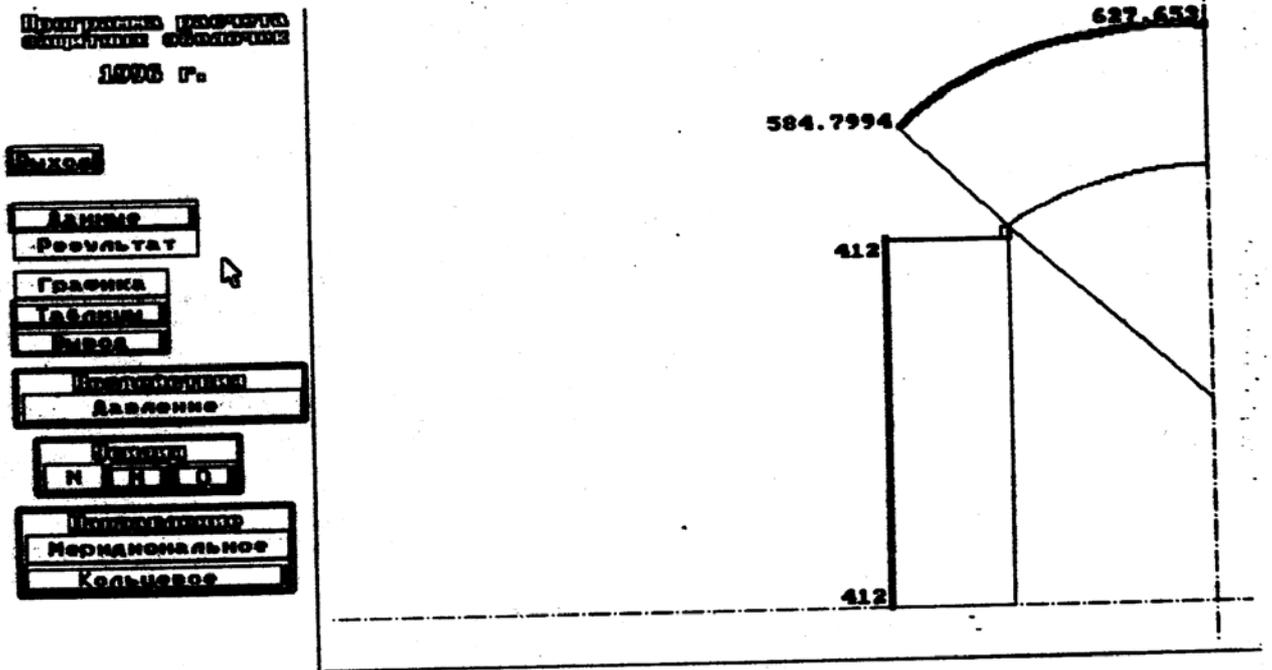


Рис. 7.3. Пример вывода результатов в графической форме

Программа расчета  
сферических оболочек  
1996 г.

**Выход**

**Данные**  
Результат

**Графика**  
Таблица  
Ввод

**Выход :**

Вывод в файл	<input type="checkbox"/>	Имя файла	обф. txt
Вывод на принтер	<input type="checkbox"/>	Принтер	РПМ
Исходные данные	<input type="checkbox"/>		
Результаты расчета	<input type="checkbox"/>		

**OK**

Рис. 7.4. Информационное окно режима вывода результатов

## **Литература**

1. Байков В.Н. и др. Железобетонные конструкции. Специальный курс. – М.: Стройиздат, 1981
2. Гольденвейзер А.Л. Теория тонких упругих оболочек. – М.: Наука, 1979
3. Дубровский В.Б., Гришин Ю.Н., Колтун О.В. О выборе конструкции защитной оболочки энергетического ядерного реактора. – «Энергетическое строительство за рубежом», 1974, №5, с.7-12
4. Железобетонные конструкции. Специальный курс/ П.Л. Пастернак, К.К. Антонов, С.А. Дмитриев и др. – М.: Стройиздат, 1961
5. Железобетонные защитные оболочки АЭС / Г.К. Хайдуков, Л.А. Коробов, О.К. Назарьев и др. – М.: Атомиздат, 1978
6. Защитная оболочка АЭС из преднапряженного железобетона / П.М. Свердлов, А.К. Беяничев, С.Л. Блохин и др. «Бетон и железобетон», 1976, №3, с.32-36
7. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. – М.: Высшая школа, 1987
8. Михайлов О.В. Железобетонные защитные оболочки реакторного отделения АЭС. – «Энергетическое строительство за рубежом», 1972, №5, с.12-21
9. Михайлов О.В. Современное состояние строительства железобетонных защитных оболочек ядерных реакторов АЭС. – «Энергетическое строительство за рубежом», 1973, №5, с.3-9
10. Михайлов О.В., Михайлов В.В. Основные положения проектирования железобетонных защитных оболочек атомных электростанций. - «Энергетическое строительство за рубежом», 1974, №5, с.7-12

11. Николаев Ю.Б. Строительные конструкции атомных электростанций: Учебное пособие. / Моск. Инж.-стр. ин-т – М.: МИСИ, 1986
12. Николаев Ю.Б., Богопольский В.Г. Развитие конструктивных решений защитных оболочек АЭС. - «Энергетическое строительство за рубежом», №1, с.7-10
13. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз, 1963
14. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. / НИИЖБ Госстроя СССР – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989
15. Прочность, устойчивость, колебания / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко, т.2. М.: Машиностроение. 1968
16. Семчук П.П., Соколов В.А., Сорока И.И. Проектирование защитных оболочек АЭС: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию / Одесск. Инж.-стр. ин-т – Одесса: ОИСИ, 1988
17. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1989
18. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. – М.: Стройиздат, 1987
19. Строительство атомных электростанций / Под ред. В.Б. Дубровского. – М.: Энергия, 1987
20. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Физматгиз, 1963
21. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – 8-е изд. – М.: Наука, 1979
22. Филин А.П. Элементы теории оболочек. – Л.: Стройиздат, 1975
23. Чернина В.С. Статика тонкостенных оболочек вращения. – М.: Наука, 1968

## Оглавление

<i>Введение</i> .....	2
<i>1. Назначение, общие сведения</i> .....	6
<i>2. Классификация защитных оболочек</i> .....	9
<i>3. Обзор и основные конструктивные решения защитных оболочек</i> .....	13
3.1. Стальные оболочки – СТ.....	13
3.2. Сталежелезобетонные оболочки – СТЖБ .....	23
3.3. Железобетонные оболочки – ЖБ.....	26
<i>4. Общий перечень нагрузок и воздействий на защитные оболочки</i> .....	38
<i>5. Напряженно-деформированное состояние защитных оболочек при действии внутреннего давления</i> .....	41
5.1. Общие положения .....	42
5.2. Безмоментное напряженное состояние .....	46
5.3. Решение краевой задачи для цилиндрической оболочки .....	49
5.3.1. Уравнение изгиба цилиндрической оболочки .....	49
5.3.2. Определение краевых перемещений в цилиндрической оболочке.....	51
5.3.3. Определение краевых усилий в цилиндрической оболочке.....	54
5.4. Решение краевой задачи для сферической оболочки. ....	55
5.4.1. Уравнение изгиба сферической оболочки. ....	55
5.4.2. Определение краевых перемещений и усилий в сферической оболочке.....	58
5.5. Решение задачи для кольцевого элемента .....	60
5.5.1. Определение перемещений в кольце от внутреннего избыточного давления.....	62
5.5.2. Определение перемещений в кольце при решении краевой задачи .....	63
5.6. Построение решения при действии внутреннего избыточного давления.....	65
5.7. Построение решения для защитной оболочки без кольцевой балки жесткости .	72
<i>6. Напряженно-деформированное состояние защитных оболочек при температурных воздействиях</i> .....	77
6.1. Общие положения .....	77
6.2. Задача об изгибе элементов оболочки от неравномерного нагрева .....	81
6.3. Определение перемещений в элементах оболочки от неравномерного нагрева .	86
6.4. Построение решения при температурном воздействии.....	88

6.5. Построение решения для оболочки без кольцевой балки жесткости .....	94
<i>Литература</i> .....	<i>103</i>