

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

На правах рукописи

УДК 624.044:539.376

ХАМРОКУЛОВ УЛУГБЕК ДАМИРОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СВОДОВ ОБОЛОЧЕК С
УЧЕТОМ НЕУПРУГИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

Специальность – 5А580201 – «Строительство зданий и сооружений»

ДИССЕРТАЦИЯ

Для получения академической степени магистра

**Научные руководители:
доктор технических наук,
профессор Раззоков С.Р.
к.т.н, доцент Матниязов Б.И.**

САМАРКАНД – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1-глава. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ РАСЧЁТА СВОДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА	9
1. Напряжённо-деформированное состояние свода оболочки с учетом неупругих свойств материала	9
2. Анализ данных о совместной работе опорного контура и свода оболочки.....	17
3. Цель и задачи исследования	17
2-глава. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СВОДОВ ОБОЛОЧЕК И КОНТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	19
1. Задачи исследований.....	19
2. Методика экспериментальных исследований.....	19
3. Конструкция модели, изготовление полигональных сводов оболочки. .	23
4. Методика и результаты моделирования напряженно - деформированного состояния полигональных сводов оболочек.....	24
5. Результаты исследования полигональных сводов оболочек при кратковременном нагружении	24
6. Выводы по второй главе	30
3-глава. РАСЧЁТ СВОДОВ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОГО КОНТУРА	32
1. Основные допущения и предпосылки	32
2. Деформированное состояние материала при кратковременном нагружении.....	32
3. Вывод системы разрешающих уравнений свода оболочек.....	32
4. Расчетная оценка работы натурального свода оболочек по результатам экспериментальных исследований.....	32
5. Рекомендации для реализации результатов исследований проектные технично-экономические достижения от реализации сводчатых оболочек.....	79
6. Выводы по третьей главе	84
Основные выводы	866
Список литературы	Ошибка! Закладка не определена.8

ВВЕДЕНИЕ

Конструктивные формы современных общественных зданий и инженерных сооружений разработано достаточно широко: от ажурных сетчатых конструкций телевизионных башен до современных оболочечных конструкций. Выбор формы зданий или сооружений определяется многими факторам: их назначением, условиями работы и даже методами расчета. Среди всевозможных конструктивных решений выделяются тонкостенные оболочечные пространственные системы. Сводчатые оболочки способны выдержать самые разнообразные виды статических и сейсмических нагрузок, обеспечивают изоляция от окружающей среды, и при этом они самые выгодные в отношении массы. Выигрыш в массе – важный фактор в строительстве, особенно, в сейсмических и резко - континентальных районах с сухим жарким климатом. С древнейших времен известны куполообразные и криволинейные своды покрытий. Об этом, свидетельствуют исторические памятники Центральной Азии до традиционных строительных сооружениях замена массивного плоского перекрытия или покрытия, опирающегося на большое количество колони, легкой без опорной современной оболочкой из железобетона, метала и пластина дает не только экономия материала, но и простор для внутренней компоновки. Среди большинства типов большепролетных покрытий, наибольшее распространение получили в последнее время оболочки очерченные по единой геометрической поверхности.

Актуальность и обоснованность диссертационие темы.

Потребность экономного расхода строительных материалов при проектировании, возведении и обеспечение эксплуатационных качеств в процессе эксплуатации зданий и сооружений, становится необходимым условием развития строительного комплекса Республики Узбекистан на современном этапе. Данная проблема находится в зоне особого внимания Правительства Республики Узбекистан: Указ «О мерах по дальнейшему

совершенствованию архитектуры и градостроительства в Узбекистане» от 20 апреля 2000 года; постановление Президента №1111-847 от 29 апреля 2008 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности проектных организаций». Кроме того, в качестве одного из комплексных мероприятий программы по преодолению Мирового финансового экономического кризиса в условия Узбекистана И.А.Каримов называет сокращение энергоемкости продукции и бережное использование природных и энергетических ресурсов во всех сферах жизни и деятельности страны.

Именно, поэтому следует по новому взглянуть на стадии расчета, проектирования зданий и сооружений, а также технологические процессы изготовления строительных изделий и конструкции с необходимым снижением материалоемкости и энергетической потребности. Проведенный анализ проектирования и строительства различных общественных здания (зрительные, спортивные сооружения и др.), а также некоторых видов инженерных сооружений с применением сводчатых оболочек покрытий показал, что их применение обеспечивает наименьший объем сооружений, присущую им легкость, рациональность форм в сочетании с высокой прочностью, экономичностью расхода материалов и затрат труда на возведение. Вследствие высокой архитектурной выразительности, сводчатых оболочечные конструкции являются одним из перспективных типов покрытий для придания городам Центральной Азии современного облика, наряду с всемирно известными уникальными сооружениями, являющимся памятники архитектуры востока. В связи с этим, совершенствования традиционных пространственных конструкций позволяет наиболее эффективно решать проблему снижения материалоемкости конструкции с расширением индустриальной базы капитального строительства Республики Узбекистан, приобретает важное экономическое значение. Развитие инженерных методов расчета эффективно - конструированных сводов оболочек покрытий разработка и

исследование их конструктивных решений является актуальной и практически важной задачей.

Степень изученности проблемы. На основе результатов экспериментально-теоретических исследований учеными разработаны методы расчета оболочек различных видов геометрической поверхности в упругой и неупругой стадии работы. Что касается теории и методов расчета сводов оболочек, покрытий работающих совместно с эффективно созданным предварительно напряженным опорным контуром, как пространственной системы, практические методы их расчета разрабатываются только в последнее время.

Своды оболочках под воздействием внешних нагрузок, меньших критических значений и интенсивного температурно-влажностного воздействия, при условиях эксплуатации происходит существенное изменение напряженно-деформированного состояния, что в некоторый (критический) момент времени может привести конструкции к потере устойчивости.

Для повышения эксплуатационных качеств с применением рациональных - конструированных решений сводчатых оболочек, покрытий получение достоверной картины поведения этих конструкций покрытий при различных видах эксплуатационных нагрузок, требуют специального исследования, включающие и вопросы развитие практических методов расчета прочности и устойчивости с учетом специфических особенностей материала конструкции.

Целью настоящей работы являются проведение обзора и анализа экспериментально-теоретических исследований и методов расчета прочности и устойчивости сводчатых оболочек больших пролетов. Выполнение численного эксперимента с оценкой их напряженно деформированного состояния, несущей способности, прочности и устойчивости.

Объектом исследования являются разработанные

конструктивные решения, методы построения разрешающих уравнений для оценки напряженно-деформированного состояния сводчатых оболочек больших пролетов.

Предметом исследования являются анализ предложений по проектированию и расчету сводчатых оболочек покрытий с учетом специфических особенностей конструктивных решений. Полученные результаты исследований по оценке несущей способности и деформативности этих конструкций.

Методы исследования. В диссертации применены теоретические и экспериментальные методы исследования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- полученные результаты теоретических исследований сводчатых оболочек с учетом не упругих свойств материала при кратковременном нагружении;

- выявленные особенности напряженно-деформированного состояния отмеченных конструкций при статическом нагружении;

- уточненный метод построения разрешающих уравнений для оценки напряженно-деформированного состояния сводчатых оболочек покрытий с учетом конструктивных особенностей.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований конструктивных решений сводчатых оболочек покрытий.

- предложенный уточненный метод расчета напряженно - деформированного состояния сводчатых оболочек покрытий,

- предложения по проектированию и расчету сводчатых оболочек больших пролетов. Результаты численного эксперимента и анализа полученных результатов.

Достоверность научных положений и выводов.

Расчетные предпосылки и принятые законы деформирования основаны на обширных экспериментальных данных. Принятые расчетные

схемы отражают специфику поведения конструкций и их элементов, учитывают конструктивные особенности оболочечных систем при кратковременных статических нагрузениях. Расчетные зависимости, полученные в результате строгого решения задач в соответствии с принятыми предпосылками, основаны на обширных экспериментальных данных. Достаточная точность расчетной методики подтверждена при выполнении численных экспериментов.

Научная и практическая значимость результатов исследований.

Результаты исследований расширяют представления о напряженно-деформированном состоянии сводчатых оболочек покрытий при кратковременном статическом нагружении и создают предпосылки для их более широкого применения при расчете на прочность и деформативность таких конструкций.

Практическая ценность. Результаты выполненных исследований будут применены при проектировании натурального сводчатого покрытия общественных зданий с большими пролетами до и более 100 м и оценки их несущей способности, деформативности и экономической эффективности этих конструкций.

Реализация работы. Работа выполнена на научно - производственной лаборатории «Пространственные конструкции, сейсмостойкость зданий и сооружений» Самаркандского Государственного архитектурно - строительного института им М.Улугбека, в соответствии с программой тематики НИР Министерства Высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан и программой Государственного комитета науки и технологии **по шифру ИТД -16.023.**

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось:

- на научно-технических конференциях СамГАСИ (2011-2013 г.);
- на научно-технических семинарах кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» СамГАСИ (2011-2013 г.);
- на международной научно-технической конференции

«Промышленное и гражданское строительство в современных условиях
Москва, МГСУ (март, 2013г).

- на международной конференции СамГАСИ «Современные
проблемы строительных материалов и конструкций» (апрель 2013г.).

- на научную сессию по «пространственным конструкциям» Москва,
НИИЖБ, (май 2013г.).

Содержание работы:

Во введении обоснована актуальность темы, сформирована цель работы. Изложены основные положения, которые составляют научную новизну диссертационной работы.

В первой главе приведен обзор технической литературы и выполнен анализ исследований, посвященных изучению напряженно-деформированного состояния сводчатых оболочек из конструкционных материалов в области не упругих стадиях работ. Рассмотрены методы расчета прочности и устойчивости сводчатых оболочек покрытий. На основе проведенного анализа сформулирована цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований сводчатых оболочек положительной гауссовой кривизны при статическом загрузении.

Приведена расчетная оценка натуральных сводчатых оболочек по результатам вычислительных и экспериментальных исследований.

В третьей главе приведены основные допущения и предпосылки, полученных систем разрешающих уравнений сводчатых оболочек покрытий с большими пролетами при кратковременном загрузении. Сделаны предложения к расчету сводчатых оболочек покрытий с учетом особенностей конструктивных решений.

Приводиться общие выводы по диссертации.

1-глава. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ РАСЧЁТА СВОДЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

1. Напряжённо-деформированное состояние свода оболочки с учетом неупругих свойств материала

Среди многочисленных современных пространственных систем наиболее примечательными по праву считаются оболочки двоякой кривизны, которые являются выражением кардинальной идеи архитектурной конструкции: «какова форма, такова несущая способность». Действительно, тонкий стальной лист, опертый по краям, прогибается при незначительном нажатии рукой. Тот же лист, превращенный в свод, свободно несет вес человека. Так, с изменением формы, повышается несущая способность. Эта идея для разных материалов и видов нагружения используется в конструкциях самым различным способом.

К настоящему времени построены оболочки многих типов. Одна из распространенных форм оболочек, выполняемых в железобетоне, дереве, металле и других материалах - эллиптический параболоид. Эта форма особенно ценна для архитектуры. Внимание проектировщиков к оболочкам свода было привлечено линейчатостью их поверхности, что значительно упрощает изготовление опалубки и армирование конструкции; возможностью разрезки на отдельные однотипные сборные элементы; разнообразием архитектурных форм, их выразительностью. Эти неотъемлемые неоспоримые преимущества сводов перед оболочками других видов, дающие значительный экономический эффект, делают их одним из прогрессивных типов оболочек. Диапазон использования свода весьма широк. Как тонкостенные оболочки своды применяют для покрытий, перекрытий, фундаментов, панелей стен в различных зданиях и сооружениях - общественных (трибуны стадионов, рынки, универсальные залы, вокзалы, рестораны), промышленных (фабрики, склады, гаражи), а также в малых архитектурных формах (навесы, павильоны, беседки).

Эллиптический параболоид как геометрическая форма известен в математике с XVII в. В архитектуре свод впервые появился в средней Азии в X-XIII в веках качестве каменных сводов общественных зданий различного назначения, сохранившихся как памятниках архитектуры на сегодняшний день.

Первым сооружением из железобетона в форме свода считается двух консольный навес с вылетом консоли 12,5 м, построенный в 1933г. французским инженером Б. Лафайем. Оболочка толщиной 5 см. составлена из четырех скрученных параллелограммов. В 1936г. свод как конструктивный элемент исследуется математически (Ф. Эмон и Б. Лафай). Эти работы, а также выдвинутые ими идеи сочетания сводов в покрытиях сыграли большую роль в развитии архитектуры зданий из оболочек и пробудили интерес зодчих к оболочкам, в частности к сводам.

По мнению многих авторов (Ю. Йодике, К. Зигель.Ш. Гюм и др.), Ф. Эмон и Б. Лафай были первыми, предложившими использовать свод в качестве покрытия. Однако, не умаляя заслуг этих исследователей, следует отметить, что еще в 1928 г. задолго до опубликования их работ советский инженер Г. М. Макарова получила патент на изобретение покрытий в виде сочетаний эллиптических параболоидов. Оболочки покрытия, известные впоследствии как «зонтообразные» и «шиповые», которые составлены по принципу, описанному Г. М. Макаровой, стали широко применяться в промышленном строительстве.

В 1924 г. итальянский инженер Д. Барони применил «щипцовые» оболочки для покрытия литейной мастерской и завода Альфа-Ромео в Милане. Первая оболочка зонтообразной формы из железобетона также возведена Д.Барони. В 1938 г. им выполнено покрытие рынка в Казерте и завода в Ферраре. Примененные зонтообразные оболочки оказались экономичными и были запатентованы как «система Барони».

Ряд эффективных оболочек в форме свода разработан чешским инженером профессором К. Грубаном. В 1945-1949 гг. такими оболочками

были покрыты фабрики в Нове Место, Простейнове и многие другие.

С 1950 г. разворачивается деятельность одного из талантливейших строителей оболочек— мексиканского инженера-архитектора Ф. Канделы. Излюбленной формой оболочек Ф. Канделы является свод. Им построено большое число промышленных и гражданских зданий с применением гипаров-оболочек всевозможных форм. Эти сооружения — яркий пример использования богатейших архитектурных и конструктивных возможностей свода. В 1951 г. Ф. Кандела разработал систему «перевернутый зонт» — воронкообразную оболочку, идею которой выдвинул Ф. Эмон в 1936 г. Оболочка состоит из четырех элементов, имеет плоский контур и одну точку опоры. При такой компоновке оболочки распор воспринимается контуром, что позволяет обходиться без вспомогательных устройств для его восприятия (затяжек, массивных бортовых элементов). Экономичность и простота изготовления оболочки этого типа сделала ее популярной. Оболочка подобного типа применена для покрытий кассового зала аэровокзала в Мемфисе.

США (40 зонтов каждый размером 12 X 13,2 м покрывают площадь помещения 100 X 20 м), инструментального завода в Бедфорде (Англия). Многие из построенных Ф. Канделой сводов оболочек, например ресторан в Ксочимилко, церковь В. Милагроза обрели всемирную известность. Они поражают богатством и оригинальностью форм, тектоничностью.

Творчество Ф. Канделы продолжает оказывать большое влияние на развитие архитектуры оболочек. Оно привлекло к себе внимание многих современных архитекторов, с успехом применивших своды для создания таких значительных произведений, как зал конгрессов в Шицуока, Япония (арх. К. Танге); ресторан в Лонг Бич, США (архитекторы Раймонд и Радо, инженеры Вейдлингер, Сальвадоре) павильон «Филиппис» в Брюсселе (арх. Ле Корбюзье) гимнастический зал олимпийского комплекса в Токио (арх. Йошинобу) и др.

К настоящему времени построено большое количество зданий с

применением сводов оболочек, выполненных в железобетоне, дереве и других материалах. Анализ последних позволяет определить некоторые закономерности их архитектурно - конструктивного развития, в частности взаимосвязь функционального назначения здания, его размеров и формы покрытия, поиски новых форм и рационального синтеза материалов. Размеры выполненных оболочек в основном небольшие по сравнению, например, с Бортовыми конструкциями. Чаще всего такие оболочки имеют пролеты от 9 до 40 м. Сорокалетний опыт возведения сводов - оболочек показал возможности каждого из наиболее распространенных типов оболочек. Например, самая крупная цельная оболочка в форме свода — покрытие зала универсального назначения в Людвигсхафене пролетом 57 X 57 м. Крупнейшая оболочка «щипцовой» формы размером 76 X 58 м покрывает отель в Бродмуре (СИТА). Среди сводов зонтообразной формы крупнейшими являются оболочки покрытия трибун ипподрома размером 35 X 18 м в Колумбусе (СИТА)

В России своды применяют главным образом в промышленном строительстве. Первые своды - оболочки (сборные железобетонные) разработаны Промстройпроектом в 1958 г. Инициаторы их разработки и авторы конструкций – инж. М. И. Рубинчик и арх. А. М. Рогозинский. Разработанные Ленинградским Промстройпроектом, железобетонные оболочки щипцовой формы, использованы для покрытий промышленных зданий в Черногорске, Абакане. Свод щипцовой формы размером 30x30 м запроектирован для гаража на 300 автомобилей в Ачинске. Составная оболочка из четырех сводов применена для покрытия рынка в Туле. Имеется проект павильона «Строительство» на ВДНХ (Россия), покрытие которого размером в плане 120 x 120 м состоит из четырех сводов. В 60-х годах в Баку построены три оболочки: вертолетная станция – воронкообразная оболочка размером 20 x 20 м, толщиной 6 см; шахматный павильон — деревянная составная оболочка.

В Ташкенте в 1970 годах своды – оболочки размерами 18 x 18 м

применен в строительстве покрытия главного корпуса национального Университета. В Намангане построен кафе пролетом 24 x 24 м из трех сводов пролетом 20 м. Это пока первые шаги в освоении сводов – оболочек в нашей стране. В последнее время, зодчие все чаще и чаще обращаются к оболочкам в форме сводов, примененных для промышленных и гражданских зданий.

2. Анализ данных о совместной работе опорного контура и свода оболочки

Теоретические исследования оболочек положительной и отрицательной гауссовой кривизны в виде сводов, как и оболочек первоначально сводились к разработке методов их расчета по безмоментной теории. Такой упрощенный расчет в практике проектирования монолитных железобетонных сводов применялся зарубежом довольно длительное время в сочетании с корректировкой результатов расчета для приконтурных зон оболочки на основании опыта проектирования и общих соображений конструктивного характера.

Уравнения равновесия безмоментной теории для непологих оболочек на прямоугольном плане в декартовой системе координат были выведены А. Пухером [4] в тридцатых годах. Из этих уравнений весьма просто получают уравнения для пологих оболочек, в том числе для пологих прямоугольных сводов. Эта теория подробно изложена в русском переводе в монографии В. Флюгге. [5]

Уместно отметить, что в последние годы А. Р. Ржанициним [6] подобная форма составления уравнений в декартовых координатах, отнесенных к плану основания оболочки, была построена для моментной теории непологих оболочек. Для пологих сводов развитие безмоментной теории было дано в работах Р. Рейсснера. [7] К. Тостера, [8] где дополнительно были рассмотрены различные схемы приложения нагрузок.

Занимаясь в широких масштабах проектированием этих

оригинальных оболочек, Ф. Кандела [9] разработал простые формулы для расчета по безмоментной теории сводов на прямоугольных планах. По аналогии с расчетами оболочек положительной гауссовой кривизны Чонко [9] для определения моментов дополнил безмоментную теорию уравнениями простого краевого эффекта.

Однако для сводов с прямолинейными краями, совпадающими с асимптотическими линиями поверхности сводного параболоида, подобная теория неприменима, поскольку моментное напряжение медленно затухает по мере удаления от края, и для таких оболочек, как показано в монографии А. Л. Гольденвейзера [10], применима теория оборонного краевого эффекта или моментная теория пологих оболочек, которая используется в настоящей работе.

Вопрос о допустимости применения безмоментной теории к расчету сводов привлекал к себе внимание ряда исследователей. На недостатки этой теории применительно к данному типу оболочек указывали Дюддек, П. Л. Пастернак [11] С. Четти и Х. Тоттенхэм. [9] В последней работе справедливо отмечались недостатки безмоментной теории, однако при рассмотрении конкретных задач принимались нулевые значения прогибов по контуре оболочки, что противоречит условиям применимости безмоментной теории, поскольку нельзя в этой теории накладывать ограничения на тангенциальные связи.

Последующее развитие методов расчета сводов за рубежом заключалось в разработке их расчета как упругих систем по моментной теории, при этом эти исследования в основном затрагивали класс пологих оболочек. Здесь широко использовались уравнения пологих оболочек, аналогичные уравнениям смешанного метода В. З. Власова [12]. Несколько более точные уравнения, предложенные В. Бонгардом [13] как показали С. Четти и Х. Тоттенхэм [9] приводят к незначительным поправкам (порядка 5%). В работе задача расчета сводов по моментной теории решалась в перемещениях, при этом три соответствующих уравнения равновесия

решались на основе сочетания методов Канторовича и Галеркина [14].

Дюддек [15] сводил задачу расчета к построению одного разрешающего уравнения четвертого порядка в комплексной форме, которое решалось методом Мориса-Леви. Анализируя результаты расчетов, автор показал, что напряженно-деформированное состояние свода существенно ухудшается, если на контуре возникнут тангенциальные перемещения. Некоторые авторы исследовали напряженное состояние сводов при малореальных граничных условиях, когда сдвигающие усилия на контуре принимались равными нулю.

Дайаратн и Герстл [16] рассмотрели задачу устойчивости упругих сводов, используя для ее решения вариационный метод Ритца. Анализируя результаты расчетов, авторы приходят к выводу о том, что в таких оболочках к моменту потери устойчивости могут развиваться значительные прогибы, имеющие нелинейный характер.

Теоретические исследования, связанные с разработкой методов расчета сводов по моментной теории, начинают развиваться в начале шестидесятых годов, когда стали разрабатываться конструктивные решения сборных железобетонных оболочек покрытий. В это время благодаря совместной работе ЦНИИСК им. Кучеренко и Московского Промстройпроекта появляются первые конструктивные решения покрытий из сборных сводов.

Одной из первых работ в области расчета сводов на основе моментной технической теории была работа И. Е. Милейковского и М. И. Рубинчика [17], в которой уравнения пологих оболочек смешанного метода В. З. Власова решались применительно к сводам с помощью процедуры Бубнова — Галеркина. Было разработано решение для прямоугольной в плане оболочки с шарнирным опиранием по контуру, которое является традиционным для оболочек положительной гауссовой кривизны и когда расчет выполняется в двойных тригонометрических. Было показано, что для сводов недостаточно ограничиваться только

одними Тригонометрическими рядами. Это решены подробно изложено в научно-техническом отчете ЦНИИСК за 1963 г. «Практические методы расчета пологих оболочек отрицательной кривизны прямоугольным планом при различных граничных условиях»

В монографии А. А. Назарова [18] изложен метод расчета прямоугольных сводов на основе построения одного разрешающего уравнения восьмого порядка относительно одной разрешающей функции перемещений. Решение этого уравнения выполняется, с помощью двойных или одинарных тригонометрических рядов. Следует однако, отметить, что такое построение решения пригодно лишь для определенного вида граничных условий, когда по всему контуру или на двух параллельных краях предполагается отсутствие связей, воспринимающих сдвигающие усилия, что (как уже отмечалось) является малореальным при проектировании оболочек.

Расчет сводов при более сложных граничных условиях был рассмотрен В. И. Ишаковым [14] который построил решение уравнений пологих оболочек смешанного метода в виде суммы одинарных по каждому направлению тригонометрических рядов.

Все вышеперечисленные исследования сводов по моментной теории касались расчета только отдельно стоящих, изолированных оболочек. Впервые расчет систем из четырех сводов был изложен в 1964 г. в научно-техническом отчете ЦНИИСК, им. Кучеренко «Методы расчета оболочек отрицательной кривизны с квадратным планом на основные виды нагрузок»; результаты этого отчета были опубликован в отдельной статье.

В 1966 -1968 гг. В.П. Абовским и И.П. Самольяновым были опубликованы работы [19, 20] по расчету сводов, у которых уравнения пологих оболочек решались в конечных разностях. Были рассмотрены как отдельно стоящие оболочки, так система из них и составлены расчетные таблицы, однако в них для систем из четырех оболочек не учтены дискретное расположение коньковых балок по линиям контакта оболочек

и податливость затяжек воспринимающих распор, что несколько искажает картину напряженно-деформированного состояния оболочек.

В. М. Никиреевым [21] уравнения смешанного метода пологих оболочек решались с помощью так называемого метода Папковича—Галеркина путем задания с точностью до неопределенных коэффициентов выражения для функции напряжений в виде двойного ряда, а вид функции прогибов определялся из интегрирования уравнения неразрывности деформаций; при этом произвольные функции интегрирования совместно с функциями, входящими в двойные ряды, подчинялись условию удовлетворения всем или только тангенциальным граничным условиям. После этого неопределенные коэффициенты находилась методом Галеркина из уравнения равновесия. В качестве варианта изложена обратная схема решения уравнений смешанного метода путем задания с точностью до неопределенных коэффициентов функции прогибов. Подобные схемы решения были применены и к расчету систем их четырех оболочек, однако при этом не была учтена специфика сопряжения их между собой под углом, что для таких оболочек может существенно изменить картину фактического напряженного состояния.

Среди других работ уместно отметить исследования, выполнение А. О. Рассказовым [22].

Наряду с теоретическими исследованиями имеется ряд экспериментальных исследований работы оболочек покрытий в виде сводов.

3. Цель и задачи исследования

Предлагаемая работа посвящена развитию инженерного метода

расчета и конструирования сборно-монолитных тонкостенных железобетонных сводных оболочек покрытий.

Основная задача, настоящей диссертационной работы, заключается в следующем:

1. Разработка конструктивных решений сборно-монолитных сводов оболочек изготавливаемых методом прогиба.

2. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сборно-монолитной сводов оболочки на модели и из сборных панелей.

3. Исследование напряженно-деформированного состояния модели сборно-монолитной сводов оболочки на всех стадиях работы вплоть до разрушения.

4. Развитие методика расчета сочлененной сборно-монолитной сводов оболочки с учетом неупругих свойств материала.

5. Расчет сочлененных сборно-монолитных сводов оболочек в неупругой стадии, сравнение опытных и расчетных данных, оценка их несущей способности.

6. Разработка предложений по использованию сборно-монолитных свод оболочек при различных архитектурно-планировочных решениях.

2-глава. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СВОДОВ ОБОЛОЧЕК И КОНТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1. Задачи исследований

Экспериментально-теоретическое исследование проводилось с целью:

-изучения напряженно-деформированного состояния сводов оболочек при статическом равномерно-распределенном нагружении:

выявления характера деформирования, развития трещин сводов оболочек при различных уровнях статического нагружения;

- оценки прочности, жесткости сводов оболочек покрытий.

- разработки предложений по усовершенствованию исследованных конструктивных решений тонких сводов - оболочек покрытий.

2. Методика и результаты экспериментальных исследований

В настоящее время ни одно сложные ответственные особенно предназначенные для широкого применения здание и сооружение не возводится без предварительного испытания на моделях. Методы испытания, масштаб моделей и их число зависят от задачи исследования. Оценка прочности, жесткости и трещиностойкости сводов оболочек покрытий при кратковременном нагружении производилась по рекомендациям, приведенным в работах [23]. Необходимо отметить, что особенности поведения конструкций (как сборно-монолитных, так и монолитных) в условиях кратковременных нагружении представляет собой малоизученную область.

В работе использовались результаты экспериментальных исследований проведенной на моделях в масштабе М 1:20 Ж.С. Раззоковым. На этих конструкциях решались конкретные задачи, а именно

- проектирование оболочек, работающих в эксплуатационных условиях, и разработка рекомендаций для широкого внедрения этих

конструкций покрытий в строительство.

Характеристики исследованных типов оболочек и их моделей приведены в таблице. 2.1

3. Конструкция модели, изготовление полигональных сводов оболочки.

Размеры моделей сводов оболочке принимались исходя из возможности их изготовления, при сохранении подобия изучаемых конструкций, задач статических испытаний для получения достаточно надежных опытных параметров с использованием существующих приборов и аппаратуры, а также условий передачи внешней нагрузки на поверхность оболочки и размещения приборов. Вследствие этого масштабы моделей были приняты не менее 1:20.

Модель гладкой полигональной своды оболочки положительной гауссовой кривизны пролетом 1,8 м образована из шести составляющих оболочек с круговой поверхностью переноса. Стрела подъема в середине пролета оболочки принималась равной 0,26 м, а контурных арок - 0,09 м (рис. 2.1, табл. 2.2).

Толщина поля оболочки равна 5 мм, а в контурных и при опорных зонах увеличивалась до 7 мм. Меридиональные и контурные ребра арок принимались размером 14x26 мм.

Поля модели оболочки армировали одним слоем сварной сетки с ячейками 25x25 мм из проволоки диаметром 0,6 мм. Вдоль контура и над меридиональными ребрами оболочки укладывался второй слой сетки. Меридиональные ребра и контурные арки армировались каркасами из стали класса Вр-I диаметром 3 мм. Поперечные стержни устанавливались в при опорных зонах и в середине каркаса с шагом соответственно 25 и 50 мм. Контурные арки оснащались стальными затяжками из арматуры диаметром 6 мм класса А-III.

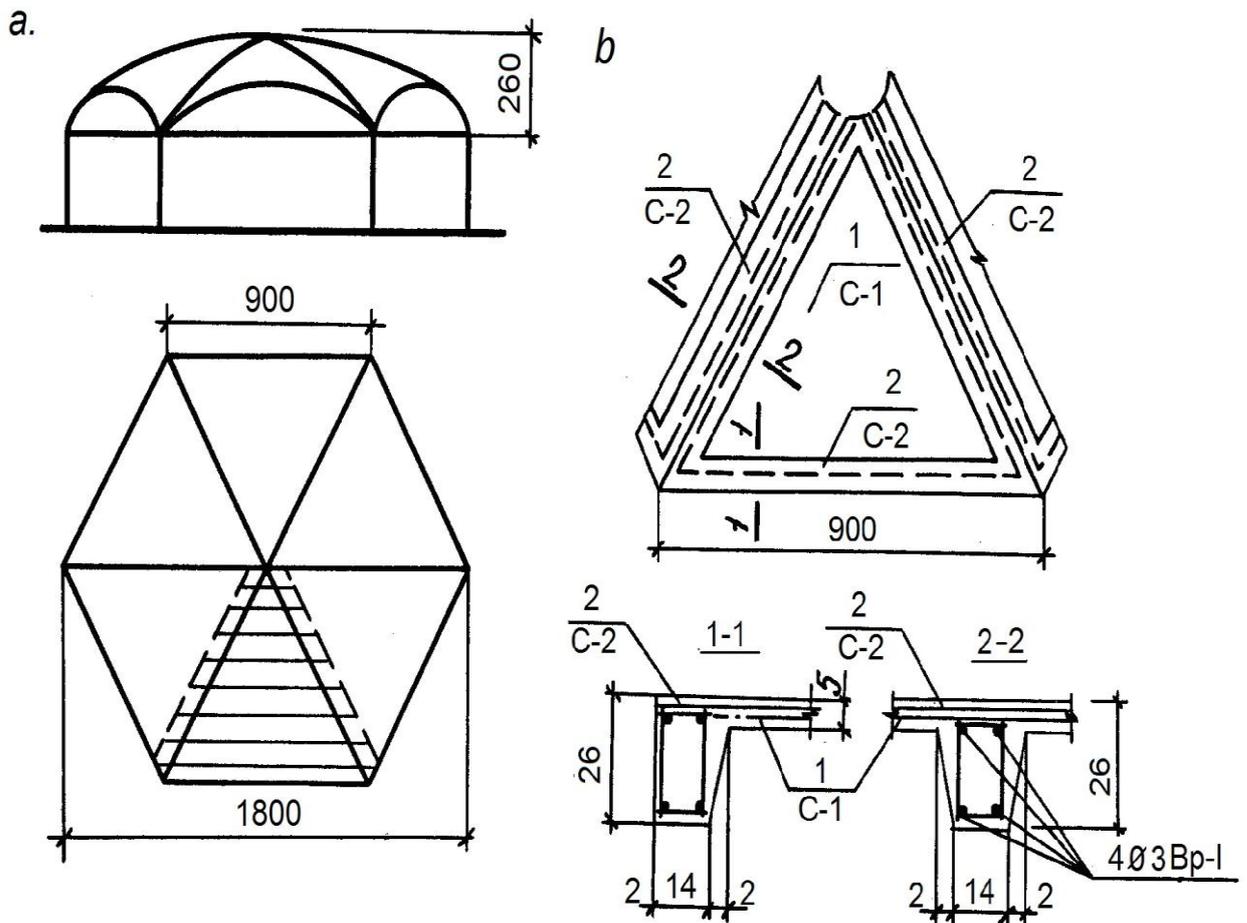


Рис. 2.1 Армирование моделей полигональной свод оболочки М-1
 а, б полигональные и сектор оболочки положительной гауссовой
 кривизны; 1-сетчатое армирование поля оболочек; 2-то же при контурных
 и угловых зон.

Механические характеристики арматурных сталей принятых для
 моделей М – 1 приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Характеристики экспериментально исследуемых моделей сводов оболочек.

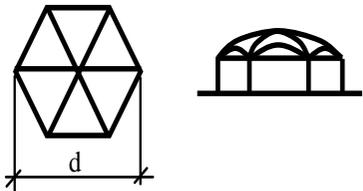
№ п.п.	Исследуемые оболочки, маркировка элементов	Эскиз	Масштаб размеры в плане	Назначение
1	Полигональный свод положительной гауссовой кривизны М-1		М1:20 d=18 м	Изучение напряженно деформированного состояния при кратковременных нагрузках. Оценка прочности, жесткости и трещиностойкости при статической нагрузке. Выявление схемы и характер разрушения сводов оболочек.

Таблица 2.2.

Механические характеристики арматурных сталей

№ п.п.	Исследуемые модели оболочки	Размер, м	Плита оболочки					Контурный элемент оболочки				
			Класс	Ø мм	A _s см ²	σ _y МПа	σ _u МПа	Класс	Ø мм	A _s см ²	σ _y МПа	σ _u МПа
1	Полигональный свод положительной гауссовой кривизны	d=1,8М	А-І	0,6	0,00283	255	317	Вр-І	3	0,071	–	587
								А-ІІІ	6	0,283	444	650

4. Методика и результаты моделирования напряженно - деформированного состояния полигональных свод оболочек.

Расчетные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются и правильно отражают действительное напряженно-деформированное состояние своды оболочек с различными контурными условиями. Для оценки работы своды оболочек в работе анализируются проблемы подобия и моделирования напряженного состояния в условиях равномерно распределенных нагрузок. Теории подобия и моделирования посвящены труды В. А. Веникова, А.А.Гухмана, М.В.Кирпичева, Л.И.Седова, работы П.М.Алабужева, В.Б.Геронимуса, Д.В.Монахенко, В.Н.Мостаченко, А.Г.Назарова, Д.А.Питлюка, В.М.Прошко, Б.Л.Крайтермана и др. Теоретические и практические вопросы развития методов испытания *моделей*, в частности тензометрии, содержатся в работах, Н.Н.Попова, Н.Н.Аистова, К.С. Абдурашидова, Б.И. Матниязова, А.К.Прейса, Н.И.Пригоровского, С.В.Плевкова, С.Р.Раззакова, К.И.Рузиева, Г.К. Хайдукова, В.А.Михайлова. М.Г. Родионова, М.Ропоаха, Е.Финка, В.В. Шугаева и др. Вопросы моделирования напряженного состояния своды оболочек рассматривались автором на основе механического подобия деформируемых систем. В процессе испытаний определены перемещения и деформации в модели, получены *условия* подобия и формулы перехода от модели к натурной конструкции.

В качестве примера рассматривалась конструктивная схема покрытия в виде, полигональных свод оболочки с контурными брусками дискретно опертыми на контурные конструкции (модель № 1). Условия подобия модели и натуре изучались при действии равномерно распределенных нагрузок для безмоментного и моментного напряженного состояния. Условия подобия получены на основании анализа уравнений связи (уравнений равновесия, граничных условий, предельных условий по напряжениям и т.п.), в которые введены масштабные преобразования, т.е. произведена линейная подстановка типа $A_n = C_A \Phi_m$, где A_n - значение

рассматриваемой величины в натуре, Φ_m - значение соответствующей величины в модели, C_A - масштаб рассматриваемой величины. Из условия инвариантности этих уравнений к масштабным преобразованиям получена связь между искомыми масштабами. Для определения условий подобия моментного напряженного состояния использована система разрешающих уравнений теории пологих оболочек В.З.Власова. В соответствии с изложенной в диссертации методикой определены масштабы (константы) подобия:

$$\begin{aligned}
 C_\sigma &= \frac{C_l C_q}{C_t}; \text{ – напряжение,} & C_N &= C_\sigma C_t = C_q C_l; \text{ – усилия,} \\
 C_M &= C_q C_l^2; \text{ – изгибающий момент,} & C_w &= \frac{C_q C_l^4}{C_E C_t^9}; \text{ – прогиб;} \\
 C_u &= C_v = \frac{C_q C_l^2}{C_E C_t}; \text{ – перемещение} & &
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

С учетом этих зависимостей получена связь между величинами модели и натуре. Анализ условий подобия показал, что в первом приближении можно ограничиться полученными на основе моделирования данными, но прибегая к расчету конструкции. Возможность такого подхода показана на примере моделирования железобетонной своды оболочки с шарнирно-подвижными краями. Вычисленные по теории подобия усилия и перемещения в натуре сопоставлены с соответствующими величинами в реальной конструкции, полученными из расчета системы методом конечных элементов. Сравнение показало, что расхождение их максимальных значений не превышает 10-20% и лежит в пределах точности эксперимента и разброса показателей одинаковых образцов, выполненных в натуральных размерах.

5. Результаты исследования полигональных сводов оболочек при кратковременном нагружении

Экспериментальные исследования проводились на гладких моделях

полигональных свод оболочек положительной и отрицательной гауссовой кривизны с шестиугольными планами пролетам 1,8 м. Конструкция моделей, способы их изготовления, методика исследований и физико-механические свойства материала приведены выше.

Модель - оболочки положительной гауссовой кривизны (М-1) испытывалась на кратковременную равномерно распределенную нагрузку. (использовались результаты эксперимента Раззокова Ж.С.)

В начале загрузки до уровня 0,2 от расчетной разрушающей нагрузки, ступень нагрузки за этап принималась равной 0,4 кН/м². В дальнейшем она увеличилась до 1,6 кН/м² с выдержкой в каждом этапе до 45 мин.

Характер изменения прогибов полигональной своды оболочки положительной гауссовой кривизны в зависимости от нагрузки при разных этапах загрузки приведен на рис. 2.2 а. Результаты испытаний показали, что оболочки работали линейно только на начальных этапах загрузки, с увеличением нагрузок в рассматриваемых оболочках наблюдалась явно выраженная нелинейность. Основными определяющими факторами нелинейности являлись скорость и уровень загрузок. Для полигональной своды оболочки нелинейность деформирования была более существенной. На графиках (рис. 2.2) изображено также поведение покрытия в характерных точках, расположенных в середине пролета, где соединяются меридиональные ребра оболочки и в середине полей отдельных элементов оболочки в зависимости от стадии ее работы с трещинами и без трещин. Переход из одной стадии в другую характеризуется ярко выраженной нелинейностью работы конструкции, связанной с постоянным падением жесткостей элементов оболочки за счет развития неупругих деформаций бетона.

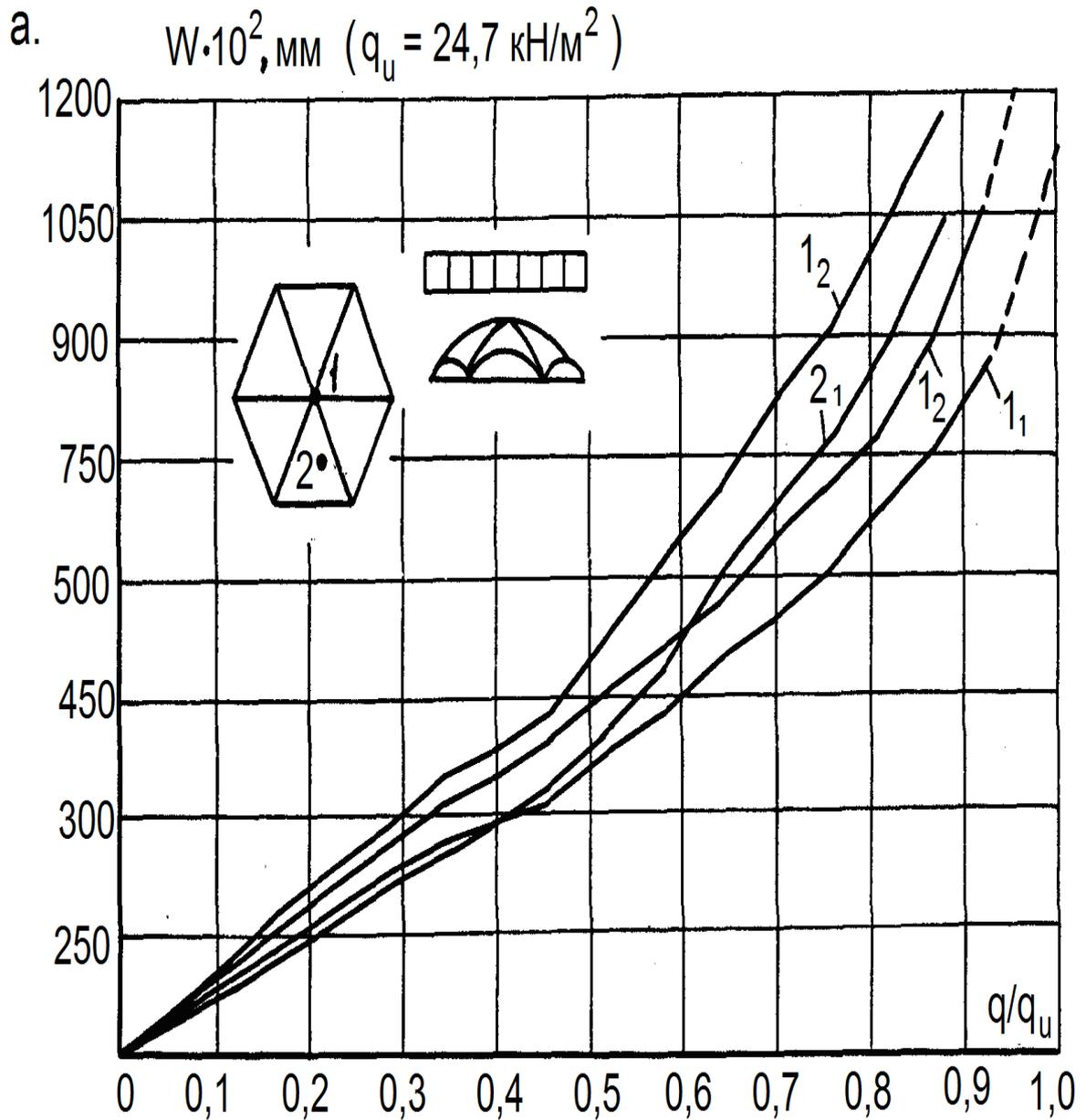


Рис. 2.2. График – зависимости прогибов от нагрузки (для точек 1, 2) в моделях полигональных свод оболочек положительной (а) гауссовой кривизны: $1_1, 2_1$ – при продолжительности выдержки нагрузки 10 мин.; $1_2, 2_2$ – то же 45 мин.

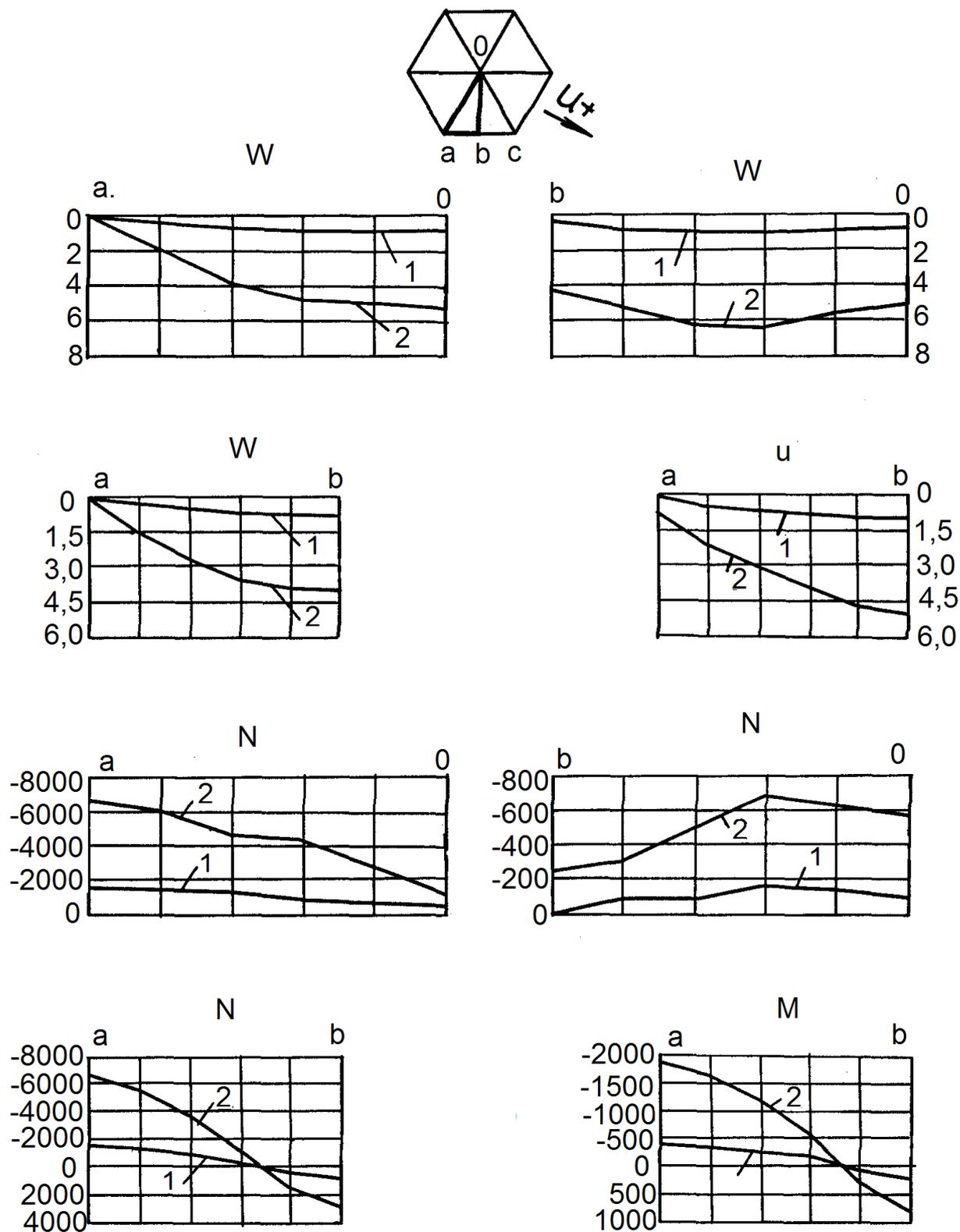


Рис. 2.3. Эпюры прогибов W (мм), нормальных сил N (Н, H/cm) и изгибающих моментов M (Н.см) от нагрузки $3,2 \text{ кН/м}^2$ (1) и 16 кН/м^2 (2) в полигональной свод оболочке положительной гауссовой кривизны.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полигональной свод оболочки положительной гауссовой кривизны [24,25,26]. Эпюры прогибов, горизонтальных перемещений, нормальных усилий и изгибающих моментов по меридиональным рёбрам, по главным осям поля оболочки и контурным аркам от равномерно распределенной нагрузки, равной 3,2 и 16 кН/м², приведены на рис. 2.2 - (сеч. а-о, в-о и а-в). Максимальные прогибы от указанных нагрузок для середины пролета оболочки наблюдались в местах соединения всех меридиональных ребер составили соответственно 1 и 5,4 мм, или 1/1800 и 1/333 пролета, максимальные прогибы для поля оболочки 1,2 и 6,4 мм, или 1/1500 и 1/281 пролета, прогибы в контурных арках при нагрузке 3,2 и 16 кН/м² - 0,75 и 4,05 мм, или 1/2400 и 1/444 пролета. Они были значительно меньше прогибов в меридиональных ребрах. Максимальные горизонтальные перемещения оболочки наблюдались в середине пролета контурной арки, направленной кнаружи оболочки и равнялись соответственно 1,05 и 5,1 мм.

Постоянно ступенчатое загрузеение оболочки с выдержкой в каждом этапе позволило проследить характер образования и раскрытия трещин как меридиональных и контурных ребрах, так и в поле оболочки. При загрузеении нагрузкой 8 кН/м² в нижней части меридиональных ребер появились трещины с шириной раскрытия 0,05 мм, с увеличением нагрузки наблюдались трещины вдоль радиальных арок. При нагрузке 16 кН/м² ширина раскрытия трещин в меридиональных ребрах достигла 0,45 мм.

Если в начальных этапах загрузеения интенсивного трещинообразования в оболочке не наблюдалось, то с достижением нагрузки 14,4 кН/м² трещины раскрывались параллельно к меридиональным ребрам вблизи угловых зон. Ширина их раскрытия 0,20-0,30 мм. Дальнейшее увеличение нагрузки привело к образованию новой сети диагональных трещин в угловых зонах оболочки. Результаты

испытаний показали, что угловые зоны оболочки влияли интенсивно на действие главных сжимающих и растягивающих усилий. Оболочка в меридиональном и кольцевом направлениях испытывает внецентренное сжатие, при этом наблюдается более интенсивная работа в кольцевом направлении. Нормальные силы и изгибающие моменты увеличивались вблизи середины пролета оболочки. Эпюры изгибающих моментов имели знакопеременный характер, изменяя знак только у элементов контура. В зонах сопряжения отдельных секторов оболочки образовались небольшие участки, подвергающиеся действию незначительных по величине отрицательных изгибающих моментов. В связи с интенсивным сжатием в значительной части пролета меридиональных ребер явление краевого эффекта для полигональной оболочки положительной гауссовой кривизны выражалось несущественно. Это подтверждалось тем, что прогибы меридиональных ребер оболочки были значительно меньше прогибов, средней зоны поля оболочки, состоящей из отдельных секторов.

Значительное внецентренное сжатие меридиональных ребер свидетельствует об их эффективном включении в работу полигональной оболочки, что приводит к разгрузке контурной её арки. Сравнение работы контурных арок этих оболочек с контурными диафрагмами составных оболочек и боковыми элементами положительной гауссовой кривизны с квадратным планом, показало, что очень малая часть контурной арки испытывает растягивающие усилия в середине ее пролета. Кроме того, растягивающие усилия и изгибающие моменты по абсолютной величине были существенно меньше при одинаковых пролетах и внешней нагрузке. Следовательно, контурные элементы и поля исследуемых оболочек работают в более благоприятных условиях. После загрузки оболочки до $21,6 \text{ кН/м}^2$ или уровнем $0,874$ от кратковременной разрушающей нагрузки осуществлялась ее разгрузка. Остаточные прогибы в середине пролета оболочки и середине пролета сдельных секторов оболочки составили соответственно $2,27$ и $2,73$ мм, что $1,5$ раза меньше, чем в составной оболочке с

боковыми элементами положительной кривизны. В дальнейшем оболочка испытывалась до разрушения с выдержкой нагрузки на этапах по 10 мин.

Разрушение оболочки произошло при нагрузке $24,7 \text{ кН/м}^2$, и достижении предела текучести в затяжках контурных арок. Это вызвало разрушение опорных узлов, где соединялись меридиональные ребра и контурные арки. Значительные повреждения получили меридиональные ребра оболочки. По характеру разрушения оболочки видно, что при достаточной жесткости затяжек контурных арок поля секторальных оболочек могут разрушаться с образованием отдельных вмятин. В данном случае поля секторальных оболочек остались не разрушенными, хотя по траекториям образованных трещин сохранялась возможность их разрушения с образованием вмятины в середине пролета и в угловых зонах, а также возможность, обрушения всего поля сектора оболочки.

6. Выводы по второй главе

1. На основе проведенных экспериментальных исследований разработана и развита метод моделирования железобетонных тонкостенных пространственных конструкции полигональных свод оболочек покрытий.

2. На железобетонных модель выполненных в масштабе 1:20 проанализирован напряженно-деформированное состояния свод оболочки при действия распределенной вертикальной нагрузки. Исследована работы оболочек как в линейный так и в нелинейный области деформирования.

3. Экспериментально выявлены высокая трещиностойкость и жесткость исследуемых сводчатых оболочек. Прогиб центральной части оболочки при нагрузке $3,2 \text{ кН/м}^2$ соответствующей полной нормативной нагрузке на натурную конструкции составила 1,0 мм или $1/1800$ пролета.

4. Экспериментально подтверждена существенное влияние наличия контурных арок на статическую работу свод оболочек. Выявлены характерные особенности деформирования оболочка при наличие

меридиональных ребер. При этом наличие меридиональных ребер в сводах - оболочек приводит к значительное увеличение жесткости 1,8... 2,5 раза.

5. Экспериментально обоснована в процессе исследования предельной стадии поведения конструкции о формирования и развития радиально -кольцевой схемы излома полигональных свод оболочки.

6. Экспериментально выявлена высокая несущая способность исследованных оболочек с контурными арками. Разрушающая нагрузка превысила расчетную нагрузку на натурную конструкцию в 3 раз.

Выявлено также возможность разрушения оболочки по одному из опорных сечений.

3-глава. РАСЧЕТ СВОДОВ ОБОЛОЧЕК С УЧЁТОМ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОГО КОНТУРА

1. Основные допущения и предпосылки

1. Рассмотрим тонкую полигональную свод оболочку, у которой отношение толщины h минимальному размеру оболочек l_1 удовлетворяет условию $h < l_1/20$, а отношение пролета к стреле подъема оболочки не превышает 5.

2. Постоянная и временная нагрузки осесимметричны.

3. Оболочка армирована взаимно пересекающимися стержнями образующими верхний и нижний сетки.

4. Разрезка оболочки на сборные элементы осуществляется по образующим и направляющим взаимно перпендикулярным.

5. Оболочка опирается по всему периметру на контурные диафрагмы. Если диафрагма опирается в отдельных точках на колонны, то должно предусматриваться специальное конструктивное мероприятие.

6. Поверхность оболочки могут быть гладкой или иметь перелом поверхности в местах продольных и поперечных ребер жесткости, который вызывает дополнительный изгибающий момент в направлении дуги равный

$$M_x = N_k e_1 \quad \text{где } e_1 = r_0 (1 - \cos (\varphi_0/2))$$

В этом случае учитывается дополнительный момент в приконтурных зонах, вызванный переломом поверхности.

7. Оболочка может иметь некоторое отклонение от реальной исходной геометрической формы в виде начальных прогибов (несовершенств) $\omega_0(z)$ различного вида.

2. Деформированное состояние материала при кратковременном загружение.

Развитие неупругих деформаций и структурных изменений бетона

эксплуатируемых железобетонных конструкциях приводит к снижению начальной прочности к моменту нагружения.

Проведенные многочисленные экспериментально-теоретические исследования показали, что при статическом нагружении коэффициент длительной прочности бетона зависит в основном от возраста бетона к моменту нагружений, длительности нагружения и прочности бетона в момент нагружения.

На основе статического анализа результатов исследований [27] бетонов класса В10-В80, нагруженных в возрасте более 300 суток при длительности наблюдений 2200 суток, этот коэффициент изменялся в пределах 0,767-0,936. При этом коэффициент длительной прочности с увеличением прочности бетонов повышался.

Для конструкций, эксплуатируемых в благоприятных условиях, для нарастания прочности бетонов (загруженные в молодом возрасте и эксплуатируемые в нормальных температурно-влажностных условиях) отрицательные влияния фактора длительного нагружения будут незначительны. Для конструкций, эксплуатируемых в условиях сухого и жаркого климата, отрицательное влияние фактора длительного нагружения будет ощутимым.

В результате статистической обработки опытных данных для бетонов класса В10-В80 получено выражение по определению предельной сжимаемости бетона в виде [27]:

$$\varepsilon_{\text{вн}} = \frac{2R_{\text{вп}} + 95}{K_3 K_4 \cdot 10^5} \quad (3.1)$$

$K_3 = 0,73$ - для мелко зернистого бетона,

$K_4 = 0,90$ - подвергнутой тепловой обработке.

Относительная деформация бетона с учетом предельных величин (3.1) определяется по выражению [28]:

$$\varepsilon_{\text{в}} = \frac{1}{E_{\text{в}}} \sigma_{\text{в}}^{\text{К}} \quad (3.2)$$

Опытные параметры вычисляются по формулам.

$$K=1 + m;$$

$$m = \frac{m_u}{0.8R_{вп}} \left(\sigma_B - 0,2R_{вп} \right);$$

$$m_u = \frac{\ln(\epsilon_{бу} E_B)}{0.8R_{вп}} - 1;$$

при $\sigma = 0,2 R_{bn}$, $K = 1$;

при $\sigma = R_{bn}$, $K = 1 + m_u$.

В выражении (3.2) модуль упругости тяжелых бетонов с учетом влияния климатических условий определяется по формуле [27]:

$$E_B = \frac{58700B}{25 + B} K_w K_t \quad (3.3)$$

где, K_w , K_t - коэффициенты, учитывающие влияние влажности и температуры окружающей среды (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значение коэффициентов K_w , и K_t

Влажность W, %	10	20	30	40	50	60	70
Коэффициент K_w	0,85	0,875	0,900	0,925	0,950	0,975	1,00
Температура, T, °C	10	20	30	40	50	60	-
Коэффициент K_t	1,05	1,00	0,95	0,875	0,800	0,700	-

3. Вывод системы разрешающих уравнений свода оболочек.

Уравнения теории пологих оболочек в декартовых координатах.

Принятая схема координат, усилий и перемещений и положительные их направления приведены на рис. 3.1. Наиболее распространенным оболочкам относятся пологие оболочки, у которых отношение стрелы подъема к меньшему пролету не превышает

$$f^0/l_{\text{мин}} \leq 1/5.$$

В пологих оболочках внутренняя геометрия срединной поверхности отождествляется с геометрией плоскости.

Квадрат линейного элемента определяется выражением

$$ds^2 = dx^2 + dy^2. \quad (3.4)$$

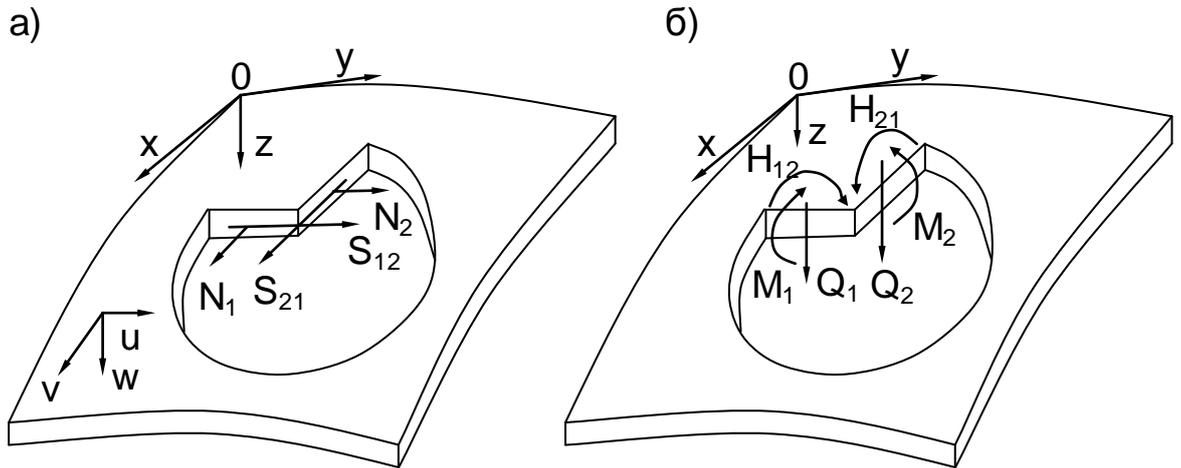


Рис. 3.1 Элемент оболочки и действующие на него усилия и моменты.

Кривизны и радиусы кривизны поверхности оболочки до деформации изгиба представляется в виде

$$k_1 = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}; \quad k_2 = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}; \quad r_1 = \frac{1}{k_1}; \quad r_2 = \frac{1}{k_2}; \quad (3.5)$$

кручения $k_{12} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x};$

$z = z(x, y)$ – уравнение срединной поверхности оболочки.

Гауссовы и средние кривизны выражается:

$$K = k_1 k_2; \quad H_0 = \frac{k_1 + k_2}{2}. \quad (3.6)$$

Если пологая оболочка очерчена по произвольной поверхности, то главные кривизны k_1 и k_2 (при $k_{12} = 0$). В.З. Власов рекомендует [29] приближенно принимать постоянными, когда они вдоль координатных линий нигде не меняют знака. В последующих формулах k_1 ; k_2 и k_{12} полагаются постоянными.

Уравнения равновесия не в линиях главных кривизн:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S_{21}}{\partial y} - k_1 Q_1 - k_{12} Q_2 + p_1 = 0; \\
 & \frac{\partial S_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} - k_2 Q_2 - k_{12} Q_1 + p_2 = 0; \\
 & k_1 N_1 + k_2 N_2 + k_{12}(S_{12} + S_{21}) + \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + q = 0 \\
 & \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial H_{21}}{\partial y} - Q_1 = 0; \\
 & \frac{\partial H_{12}}{\partial x} + \frac{\partial M_2}{\partial y} - Q_2 = 0; \\
 & S_{12} - S_{21} + k_1 H_{12} - k_2 H_{21} - k_{12}(M_2 + M_1) = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

После исключения четвертого и пятого уравнений, система первых пяти уравнений (3.7) сводится к трем:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S_{21}}{\partial y} - k_1 \left(\frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial H_{21}}{\partial y} \right) - k_{12} \left(\frac{\partial M_2}{\partial y} - \frac{\partial H_{12}}{\partial x} \right) + p_1 = 0; \\
 & \frac{\partial S_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} - k_2 \left(\frac{\partial M_2}{\partial y} - \frac{\partial H_{12}}{\partial x} \right) - k_{12} \left(\frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial H_{21}}{\partial y} \right) + p_2 = 0; \\
 & k_1 N_1 + k_2 N_2 + k_{12}(S_{12} + S_{21}) + \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial(H_{21} + H_{12})}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} + q = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Зависимости между деформациями и перемещениями:

- деформации удлинения и сдвига срединной поверхности

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x} - k_1 w; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} - k_2 w; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2k_{12} w; \quad (3.9)$$

- деформации изгиба и кручения срединной поверхности

$$\begin{aligned}
 \chi_1 &= \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial u}{\partial x} + k_{12} \left(\frac{3}{2} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial y} \right); \\
 \chi_2 &= \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + k_2 \frac{\partial v}{\partial y} + k_{12} \left(\frac{3}{2} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\
 \chi_{12} &= - \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + k_1 \frac{\partial u}{\partial y} + k_2 \frac{\partial v}{\partial x} + k_{12} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right];
 \end{aligned}$$

Зависимости между усилиями и деформациями принимается в виде:

$$N_1 = C(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2); \quad N_2 = C(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1);$$

$$M_1 = -D(\chi_1 + \nu\chi_2); \quad M_2 = -D(\chi_2 + \nu\chi_1); \quad (3.10)$$

$$S_{12} = \frac{C(1-\nu)}{2} \left\{ \varepsilon_{12} - \frac{2Dk_2}{C} \chi_{12} + \frac{1}{2} k_{12} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{Dk_{12}}{C(1-\nu)} (\chi_1 - \chi_2 + \nu(\chi_2 - \chi_1)) \right\};$$

$$S_{21} = \frac{C(1-\nu)}{2} \left\{ \varepsilon_{12} - \frac{2Dk_2}{C} \chi_{12} + \frac{1}{2} k_{12} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - \frac{Dk_{12}}{C(1-\nu)} (\chi_1 - \chi_2 + \nu(\chi_2 - \chi_1)) \right\};$$

$$H_{12} = -D(1-\nu) \left[\chi_{12} + \frac{1}{2} k_{12} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right];$$

$$H_{21} = -D(1-\nu) \left[\chi_{21} + \frac{1}{2} k_{12} (\varepsilon_2 + \varepsilon_1) \right]; \quad (3.10)$$

Здесь, $C = \frac{E\delta}{1-\nu^2}$ и $D = \frac{EJ}{1-\nu^2}$ - осевая и цилиндрическая жесткость

Выражения для S_{12} ; S_{21} ; H_{12} и H_{21} при подстановке в шестое уравнение системы (3.7) обращают его в тождество.

Уравнения (3.8), выраженные через перемещения с помощью формул (3.9) и (3.13), являются разрешающими уравнениями равновесия метода перемещений, имеют симметричную структуру дифференциальных операторов относительно диагональных членов

$$\left. \begin{aligned} L_{11}u + L_{12}v + L_{13}w + \frac{1}{C}p_1 &= 0; \\ L_{21}u + L_{22}v + L_{23}w + \frac{1}{C}p_2 &= 0; \\ L_{31}u + L_{32}v + L_{33}w - \frac{1}{C}q &= 0; \end{aligned} \right\}; \quad (3.11)$$

Здесь, L_{ji} ($ji=1, 2, 3$) — дифференциальные операторы, имеющие вид:

$$\left. \begin{aligned}
L_{11} &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \\
L_{12} &= \frac{1+\nu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}; \\
L_{22} &= \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{1-\nu}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \\
L_{13} &= -(k_1 + \nu k_1) \frac{\partial}{\partial x} k_{12} (1-\nu) \frac{\partial}{\partial y} + \frac{D}{C} k_1 \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \right. \\
&\quad \left. + 2(1-\nu) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] + \frac{D}{2C} - k_{12} \frac{\partial}{\partial y} \left[(3-\nu) \frac{\partial^2}{\partial y^2} + (1+\nu) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right]; \\
L_{23} &= -(k_2 + \nu k_1) \frac{\partial}{\partial y} - k_{12} (1-\nu) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{D}{C} k_2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \right. \\
&\quad \left. + 2(1-\nu) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] + \frac{D}{2C} k_{12} \frac{\partial}{\partial x} \left[(3-\nu) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + (1+\nu) \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right]; \\
L_{33} &= \frac{D}{C} \nabla^4 + k_1^2 + 2\nu k_1 k_2 + k_2^2 + 2(1-\nu) k_{12}^2; \\
L_{21} &= L_{12}; L_{31} = L_{13}; L_{32} = L_{23}.
\end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

При расчете пологих оболочек по технической теории обычно пользуются уравнениями, пренебрегая в уравнениях (3.7) членами с Q_1 и Q_2 , и членами с H_{12} ; H_{21} ; M_2 и M_1 , содержащими выражения кривизны k_1 ; k_2 и k_{12} ; последнее пренебрежение приводит к парности сдвигающих и крутящих моментов, при этом

$$S_{12} = S_{21} = S \text{ и } H_{12} = H_{21} = H. \quad (3.13)$$

Кроме того, в выражениях деформаций изгиба и кручения (3.9) пренебрегают также членами, содержащими кривизны k_1 , k_2 и k_{12} . В результате уравнения (3.11) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} + p_1 &= 0; \\
\frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} + p_2 &= 0; \\
k_1 N_1 + k_2 N_2 + 2K_{12} S + \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} + q &= 0.
\end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Зависимости (3.9) принимают вид:

$$\chi_1 = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \chi_2 = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \chi_{12} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \quad (3.15)$$

Выражения (3.10) с учетом (3.14) принимают вид:

$$S = \frac{C(1-\nu)}{2} \varepsilon_{12}; \quad (3.16)$$

$$H = -D(1-\nu)\chi_{12}.$$

Выражения операторов (3.12) принимают вид:

$$L_{12} = -(k_1 + \nu k_2) \frac{\partial}{\partial x} - k_{12}(1-\nu) \frac{\partial}{\partial y};$$

$$L_{23} = -(k_2 + \nu k_1) \frac{\partial}{\partial y} - k_{12}(1-\nu) \frac{\partial}{\partial x}. \quad (3.17)$$

Остальные операторы L_{ji} остаются без изменения.

Указанные упрощенные уравнения пологих оболочек обычно используются при расчетах в предположении, что моментное напряженное состояние является быстроизменяющимся и затухающим по мере удаления от края оболочки или иной линии возмущения напряженного состояния [30].

Для оболочек положительной кривизны во всех приведенных уравнениях члены, содержащие кривизну кручения поверхности k_{12} , следует отбросить, при этом для оболочек отрицательной кривизны k_1 и k_2 должны вводиться с разными знаками.

При пользовании упрощенными зависимостями технической теории пологих оболочек и при отсутствии продольных нагрузок p_1 и p_2 наряду с уравнениями (3.11), записанными в перемещениях, пользуются выведенные В.З. Власовым [29] два разрешающих уравнения смешанной формы, относительно двух функций — функции напряжений (рис.3.2) Φ (Н·см) и функции прогиба w (см). Эти уравнения имеют вид:

При этом

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{E\delta} \nabla^2 \nabla^2 \Phi + \nabla_k^2 w &= 0; \\ -\nabla_k^2 \Phi + D \nabla^2 \nabla^2 w &= q; \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \\ \nabla^2 \nabla^2 &= \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}; \\ \nabla_k^2 &= K_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} - 2K_{12} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + K_1 \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

При этом

$$N_1 = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}; \quad N_2 = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}; \quad S = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}; \quad (3.20)$$

Первое из уравнений (3.18) является уравнением неразрывности деформации оболочки, а второе - уравнением равновесия.

Уравнения (3.18) и эквивалентные им уравнения (3.11) при выражении операторов L_{13} и L_{23} по формулам (3.17) и значениях $p_1=p_2=0$ сводятся при некоторых граничных условиях к одному разрешающему уравнению относительно одной разрешающей функции F :

$$\nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 F + C_1 \nabla_k^2 \nabla_k^2 F = \frac{q}{D}, \quad (3.21)$$

где для гладких оболочек

$$C_1 = \frac{E\delta}{D} = \frac{12(1-\nu^2)}{\delta^2} \quad (3.22)$$

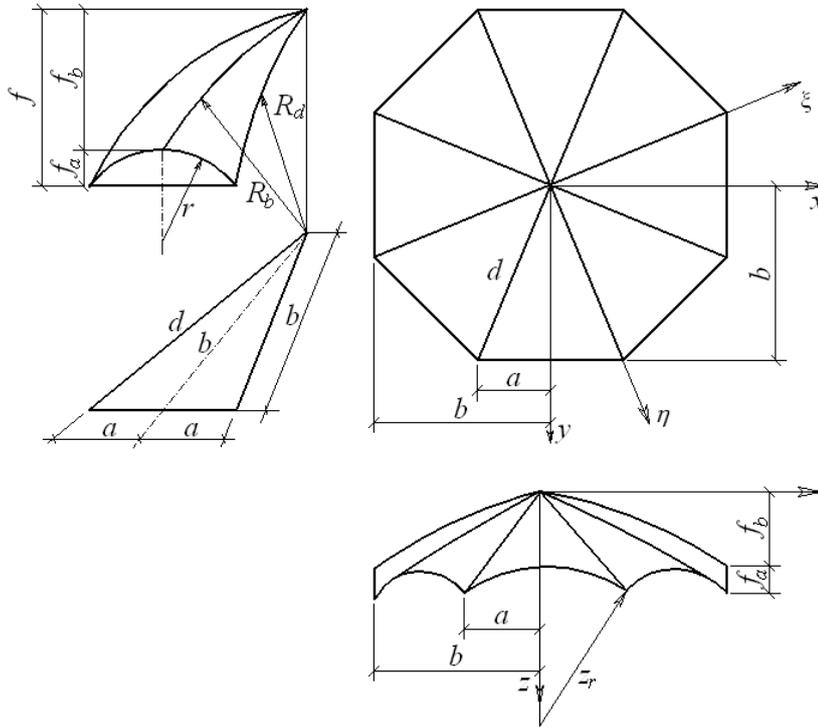


Рис. 3.2. Геометрические параметры оболочки.

При решении систем разрешающих дифференциальных уравнений (3.8) или (3.15), для оболочки, у которой края (например, $x=0$ и $y=0$) свободно висят при постановке граничных условий, пять усилий — изгибающие моменты, крутящие моменты, поперечные, нормальные и сдвигающие усилия — можно свести (по каждому краю) к статически эквивалентным четырем видам усилий [29, 27] — изгибающим моментам, обобщенным поперечным усилиям \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 вида:

$$\bar{Q}_1 = Q_1 - \frac{\partial H_{21}}{\partial y} \quad \text{и} \quad \bar{Q}_2 = Q_2 - \frac{\partial H_{12}}{\partial x} \quad (3.23)$$

нормальным усилиям и обобщенным сдвигающим усилиям вида:

$$\bar{S}_{12} = S_{12} + k_2 H_{12} \quad \text{и} \quad \bar{S}_{21} = S_{21} + k_1 H_{21} \quad (3.24)$$

При пользовании уравнениями (3.14) и отбрасывании в выражениях (3.9) и (3.10) членов с кривизнами k_1 ; k_2 и k_{12} формулы (3.24) записываются в виде:

$$\bar{S}_{12} = \bar{S}_{21} = S \quad (3.25)$$

а формулы (3.14) можно преобразовать к виду:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Q}_1 &= -D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] \\ \bar{Q}_2 &= -D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

При расчете оболочек положительной кривизны в соответствии [29] общее напряженное состояние может быть разложено на безмоментное и напряжение краевого эффекта [31].

Уравнения безмоментной теории и условия ее применения.

Уравнения равновесия (3.14) при $M_1 = M_2 = H = 0$ и вертикальной плавно изменяющейся нагрузке $q(x, y)$ для оболочки рассматриваемого типа:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} &= 0; & \frac{\partial N_2}{\partial y} + \frac{\partial S}{\partial x} &= 0; \\ 2k_{12}S + q &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Усилия через деформации, как и для пологих оболочек положительной кривизны, выражаются формулами (3.10). Деформации через перемещения определяются формулами (3.19), которые при $k_1 = k_2 = 0$ будут:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2k_{12}w. \quad (3.28)$$

Разрешающие уравнения (3.18) для без моментной свода оболочки вырождаются в уравнение:

$$2k_{12} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} = q,$$

которое представляет каноническую форму уравнения гиперболического типа. Без моментное напряженное состояние для данных оболочек реализуется только при определенных граничных условиях. В ряде случаев безмоментная оболочка [29] может иметь перемещения без деформации ее поверхности, т. е. без возникновения внутренних усилий. В таких случаях можно говорить о геометрической изменяемости безмоментной оболочки и

необходимо переходить к расчету по моментной теории.

При отсутствии деформаций перемещения в соответствии с выражениями (3.28) должны удовлетворять уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2k_{12}w = 0. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Из первых двух выражений следует:

$$u = f_1(y); \quad v = f_2(x). \quad (3.30)$$

Расчет по без моментной теории даже в тех случаях, когда оболочка оказывается геометрически неизменяемой, является ориентировочным и может использоваться для предварительных расчетов (поскольку безмоментная теория содержит ряд противоречивых особенностей: независимость сдвигающих усилий от граничных условий, неудовлетворение значениям прогибов на контуре реальным условиям опирания, отсутствие разницы в напряженном состоянии при различных граничных условиях и др.).

Решение уравнения моментной теории вариационным методом перемещений. Исходные уравнения равновесия элемента пологой свода оболочки, очерченной по поверхности эллиптического параболоида (при вертикальной нагрузке), получаются из уравнения (3.8), если в них положить $k_1 = k_2 = 0$ и $p_1 = p_2 = 0$.

При этом три уравнения (3.8) принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S_{21}}{\partial y} + k_{12} \frac{\partial M_2}{\partial y} + k_{12} \frac{\partial H_{12}}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial S_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} + k_{12} \frac{\partial M_2}{\partial x} + k_{12} \frac{\partial H_{12}}{\partial y} = 0; \\ k_{12}(S_{12} + S_{21}) + \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 (H_{12} + H_{21})}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} + q = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

Усилия N_1 , N_2 , S_{12} и S_{21} выражаются через деформации ε_1 , ε_2 и ε_{12} по

формулам (3.10) при $k_1 = k_2=0$, а последние через перемещения по формулам (3.28). Моменты через деформации выражаются по формулам (3.10), которые для рассматриваемой оболочки принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= -D(\chi_1 + \nu\chi_2); & M_2 &= -D(\chi_2 + \nu\chi_1); \\ N &= N_{12} = N_{22} = -D(1-\nu) \left[\chi_{12} + \frac{1}{2}k_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Деформации изгиба χ_1 , χ_2 и χ_{12} выражаются через перемещения по формулам (3.9), которые при $k_1 = k_2 = 0$ принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \chi_1 &= \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_{12} \left(\frac{3}{2} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial y} \right); \\ \chi_2 &= \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + k_{12} \left(\frac{3}{2} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\ \chi_{12} &= - \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + k_{12} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

В инженерных расчетах пользуются упрощенными уравнениями технической теории пологих оболочек, отбрасывая в первых двух уравнениях равновесия (3.31) и в выражениях (3.32) и (3.33) члены с кривизной кручения k_{12} -при этом уравнения (3.31) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} + 2k_{12}S + q &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

где S определяется формулой (3.16)

Расчет рассматриваемых оболочек разделим (рис. 3.3) на две части: определение безмоментного напряженного состояния оболочки и напряженного состояния по теории краевого эффекта.

Задача статического расчета пологой оболочки по безмоментной теории связана с интегрированием, при заданных граничных условиях,

второго дифференциального уравнения системы (3.18) при $\omega=0$. Выпишем его с учетом (3.5)

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + q(x, y) = 0. \quad (3.35)$$

Для рассматриваемых оболочек представляется целесообразным применить общий вариационный метод [32] приведения двумерных задач теории упругости к одномерным, или метод приведения дифференциального уравнения в частных производных к системе линейных дифференциальных уравнений [29]. Этот метод получил значительное развитие в применении к пластинкам с прямоугольным планом [31,32].

Решение отыскивается в виде:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n_i} Y_i(x) \varphi_i(y); \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_i \quad (3.36)$$

где $\varphi_i(y)$ - выбранная система аппроксимирующих функций;

$Y_i(x)$ - искомая функция одного переменного.

Подставляя $\Phi(x, y)$ по формуле (3.36) в уравнение (3.35) умножаем почленно полученное выражение на $Y_i(x)$

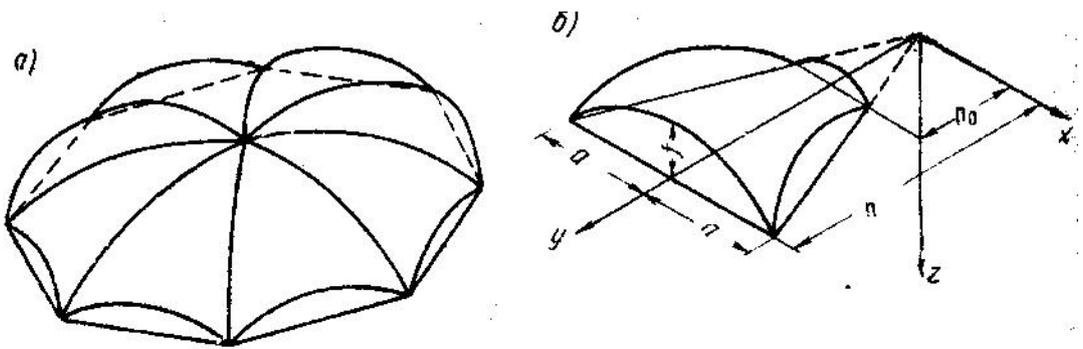


Рис. 3.3. к расчету сводов оболочки с многоугольным планом.

$i = 1, 2, \dots, n_i$, затем производим интегрирование по x в соответствующих пределах. В результате получается система, состоящая из n_i числа обыкновенных дифференциальных уравнений относительно

неизвестных функций Y_1, Y_2, \dots, Y_n .

$$\int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\partial z}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\sum_i y_i \varphi_i \right) \varphi_i dx - 2 \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\sum_i Y_i \varphi_i \right) \varphi_i dx +$$

$$+ \int_{\psi_1}^{\psi_2} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\sum_i Y_i \varphi_i \right) \varphi_i dx + \int_{\psi_1}^{\psi_2} q_{\langle j, y \rangle} \varphi_i dx = 0 \quad (3.37)$$

$$\langle j = 1, 2, \dots, n_i \rangle$$

Коэффициенты уравнений (3.37) являются безразмерными характеристиками. Найденные из решения системы (3.37) функции $Y_i \langle j \rangle$ подставляются в (3.36), после чего входящие в $Y_i \langle j \rangle$ произвольные постоянные определяются из граничных условий. Чем больше удерживается при расчете членов ряда (3.36), тем точнее получается окончательный результат. Поэтому критерием точности будет являться точное решение, если такое имеет место, или построение последующего приближения и сравнение его с результатом предыдущего.

Ввиду отсутствия исследования быстроты сходимости рассматриваемого вариационного метода в применении к решению безмоментных пологих оболочек с непрямоугольным планом погрешность первого приближения остается неизвестной. Оценка точности найденных решений может быть получена путем определения нагрузки, для которой найденное решение было бы точным. Если эта нагрузка найденное решение было бы точным. Если эта нагрузка равна $z_{\langle j, y \rangle}$ то

$$z_{\langle j, y \rangle} = -\frac{\nabla^2 \Phi}{r}.$$

Для оболочки с прямоугольным треугольником в плане имеем:

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{5qr}{16} \left(3 + \frac{x^2}{y^2} \right)$$

и, следовательно, $z_{\langle j, y \rangle}$ изменяется от $15/16q$ вдоль линии $x = 0$

до $20/16q$ вдоль края края $x = \pm y$. Наряду с этой оценкой следует построить по крайней мере два приближения для рассматриваемой задачи и сравнить результаты первого с результатом второго. Решение может быть задано в виде:

$$\Phi(\kappa, y) = Y_1(y)\varphi_1(\kappa, y) + Y_2(y)\varphi_2(\kappa, y) \quad (3.38)$$

Для оболочки с основанием в виде равнобедренного треугольника при тех же граничных условиях принимаем:

$$\varphi_1(\kappa, y) = x^2 - K^2 y^2; \varphi_2(\kappa, y) = \varphi_1(\kappa, y) x^2. \quad (3.39)$$

Система уравнений (3.37) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \int_{-Ky}^{Ky} \nabla^2 \Phi + qr \varphi_1(\kappa, y) dx = 0; \\ \int_{-Ky}^{Ky} \nabla^2 \Phi + qr \varphi_2(\kappa, y) dx = 0; \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Вычисляя для указанных значений $\varphi_1(\kappa, y)$ и $\varphi_2(\kappa, y)$ интегралы и приводя подобные члены, получим для неизвестных функций $Y_1(\psi)$ и $Y_2(\psi)$ систему двух дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{2}{5} K^2 y^2 Y_1'' + 2K^2 y Y_1' + (K^2 - 1) \tilde{Y}_1 \right] + K^2 y^2 \left[\frac{2}{35} K^2 y^2 Y_2'' + \right. \\ \left. + \frac{2}{5} K^2 y Y_2' + \frac{1}{5} (K^2 - 1) \tilde{Y}_2 \right] = \frac{qr}{2}; \\ \left[\frac{2}{35} K^2 y^2 Y_1'' + \frac{2}{5} K^2 y Y_1' + \frac{1}{5} (K^2 - 1) \tilde{Y}_1 \right] + K^2 y^2 \left[\frac{2}{105} K^2 y^2 Y_2'' + \right. \\ \left. + \frac{6}{35} K^2 y Y_2' + \frac{1}{35} (K^2 - 11) \tilde{Y}_2 \right] = \frac{qr}{10}. \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

Решение системы (3.42) складывается из общего решения однородной системы и частного решения:

$$\bar{Y}_1 = \frac{qr}{2(K^2 - 1)}; \quad \bar{Y}_2 = 0. \quad (3.42)$$

Общее решение однородной системы получается с помощью подстановки формулы Эйлера $i = \ln y$. Тогда однородная система примет вид:

$$\left. \begin{aligned} & \left[\frac{2}{5} K^2 y^2 Y_1'' + \frac{8}{5} K^2 y Y_1' + (K^2 - 1) \bar{Y}_1 \right] + K^2 e^{2t} \left[\frac{2}{35} K^2 y^2 Y_2'' + \right. \\ & \left. + \frac{12}{35} K^2 Y_2' + \frac{1}{5} (K^2 - 1) \bar{Y}_2 \right] = 0; \\ & \left[\frac{2}{35} K^2 Y_1'' + \frac{12}{35} K^2 Y_1' + \frac{1}{5} (K^2 - 1) \bar{Y}_1 \right] + K^2 y^{2t} \left[\frac{2}{105} K^2 y^2 Y_2'' + \right. \\ & \left. + \frac{16}{105} K^2 Y_2' + \frac{1}{35} (K^2 - 11) \bar{Y}_2 \right] = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

Решение системы (3.43) ищем в виде:

$$Y_1 = a, e^{(i+2)t}; \quad Y_2 = b_i e^{\lambda_i t}. \quad (3.44)$$

Подставляя (3.44) в (3.43) и сокращая на множитель $e^{(i+2)t}$, получим система уравнение для определения постоянных a_i и b_i .

Так как для неизвестных a_i и b_i мы должны получить решение, отличное от нуля, то должен равняться нулю определитель

$$\begin{vmatrix} \left[\frac{2}{5} K^2 \left(\frac{2}{5} + 2 \right) + \frac{8}{5} K^2 \left(\frac{2}{5} + 2 \right) + (K^2 - 1) \right]; \\ K^2 \left[\frac{2}{35} K^2 \lambda^2 + \frac{12}{35} K^2 \lambda + \frac{1}{5} (K^2 - 1) \right]; \\ \left[\frac{2}{35} K^2 \left(\frac{2}{5} + 2 \right) + \frac{12}{35} K^2 \left(\frac{2}{5} + 2 \right) + \frac{1}{5} (K^2 - 1) \right]; \\ K^2 \left[\frac{2}{105} K^2 \lambda^2 + \frac{16}{105} K^2 \lambda + \frac{1}{35} (K^2 - 11) \right] \end{vmatrix} = 0. \quad (3.45)$$

Получим уравнение 4-й степени относительно λ . Задавая различные K , мы получаем решения для разных типов оболочек. Зависимость между четырьмя произвольными постоянными a_i и b_i находим, подставляя в систему уравнений (3.43) найденные значения λ .

Рассмотрим оболочку для случая $K = \operatorname{tg} 22^{\circ} 30' = 0,414$ т.е. $2\gamma = 45^{\circ}$. Из этих оболочек может быть образован пологий восьмиугольный зонтичный свод оболочек (см. рис. 3.3) с краевыми элементами, не воспринимающими нормальные усилия (хотя с этим методом может быть произведен расчет и при других граничных условиях).

Раскрывая (3.45) при заданном K , получаем

$$\lambda^4 + 16\lambda^3 - 384\lambda^2 - 3640\lambda + 26,8 = 0. \quad (3.46)$$

Первые два корня находятся графически или подбором:

$$\lambda_1 = 0,0073; \lambda_2 = 6,78.$$

$$\lambda^2 + 22,7\lambda + 537,88 = 0;$$

$$\lambda_{3,4} = -11,39 \pm 20,19i.$$

Общее решение однородной системы имеет вид:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1 y^{2,0073} + a_2 y^{8,78} + y^{-0,39} \left[a_3 \cos 20,19 \ln y + a_4 \sin 20,19 \ln y \right]; \\ Y_2 &= b_1 y^{0,0073} + b_2 y^{8,78} + y^{-11,39} \left[b_3 \cos 20,19 \ln y + b_4 \sin 20,19 \ln y \right]. \end{aligned} \quad (3.47)$$

Учитывая, что $\Phi(\xi, y)$ должна быть конечной величиной при $y = 0$ принимаем $a_3 = a_4 = b_3 = b_4 = 0$. Зависимость между a_1 и b_1 , a_2 и b_2 находим, подставляя соответствующие значения λ в систему (3.43). Присоединяя частое решение (3.42), получаем

$$\begin{aligned} \Phi(\xi, y) = & \left(a_1 y^{2,0073} + a_2 y^{8,78} - 0,603qr \left(\xi^2 - 0,171y^2 \right) - \right. \\ & \left. - 0,176a_1 y^{0,0073} + 128a_2 y^{6,78} \left(\xi^4 - 0,171x^2 y^2 \right) \right) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Находя a_1 и a_2 из граничного условия: $N_y = 0$ при $y = h$ и пренебрегая величиной $y^{0,0073}$ по сравнению с другими y , входящими в формулу (3.48), имеем:

$$\begin{aligned} \Phi(\xi, y) = & 0,603qr \left\{ \left[\left(\frac{y}{h} \right)^{2,0073} - 0,0014 \left(\frac{y}{h} \right)^{8,78} - 1 \right] \left(\xi^2 - 0,171y^2 \right) \right. \\ & \left. + 0,179 \frac{y^{6,78}}{h^{8,78}} \left(\xi^4 - 0,171x^2 y^2 \right) \right\}; \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$S_{xy} = -0,603qr \left(4,014 \frac{y^{1,0073}}{h^{2,0073}} x - 0,56 \frac{y^{5,78}}{h^{8,78}} x + 4,85 \frac{y^{5,78}}{h^{8,78}} x^3 \right). \quad (3.50)$$

Для той же оболочки в первом приближении получаем:

$$\Phi(\xi, y) = 0,603qr \left[\left(\frac{y}{h} \right)^{2,012} - 1 \right] \left(\xi^2 - 0,171y^2 \right); \quad (3.51)$$

$$S_{xy} = -0,603qr \frac{y^{1,012}}{h^{2,012}} 4,024x. \quad (3.52)$$

Графики сдвигающих усилий S_{xy} на краю $y = h$, найденные для первого и второго приближения. Решение для второго приближения отличается от первого на 7 – 10,5%. Оценка точности рассматриваемого метода может быть также проведена сравнением с известными решениями, полученными для других типов оболочек.

Краевой эффект в пологих сводах оболочках с непрямоугольным планом. Исходим из уравнений смешанного метода моментной теории пологих оболочек (3.18), которые для сферических свода оболочек принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{E\delta} \nabla^2 \nabla^2 \Phi - \frac{1}{r} \nabla^2 \omega &= 0; \\ D \nabla^2 \nabla^2 \omega - \frac{1}{r} \nabla^2 \Phi &= q. \end{aligned} \right\} \quad (3.53)$$

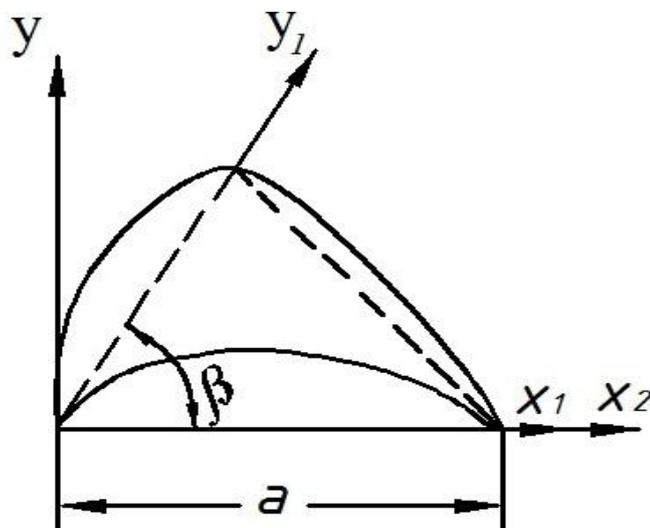


Рис.3.4 К учету влияния краевого эффекта

Для определения изгибающих моментов, действующих в направлениях, параллельных краям оболочки (направления армирования), в угловых зонах представляется целесообразным записать уравнения (3.53) для рассматриваемых оболочек в косоугольной системе координата (рис.3.4). Связь между новыми координатами и старыми выразится формулами:

$$y_1 = \frac{y}{\sin \beta}; x_1 = x - y \operatorname{ctg} \beta, \quad (3.53)$$

где β - угол между осями x_1 и y_1 . Уравнения (3.53) в новой системе координат примут вид:

$$\left. \begin{aligned}
& \frac{1}{E\delta \sin^4 \beta} \left[\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2(1 + 2\cos^2 \beta) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial y_1^2} - 4\cos \beta \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial y_1} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y_1^2} \right) + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y_1^4} \right] + \frac{1}{r \sin^2 \beta} \left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} + 2\cos \beta \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1 \partial y_1} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y_1^2} \right] = 0; \\
& \frac{D}{\sin^4 \beta} \left[\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2(1 + 2\cos^2 \beta) \frac{\partial^4 \omega}{\partial x_1^2 \partial y_1^2} - 4\cos \beta \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial y_1} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y_1^2} \right) + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y_1^4} \right] - \frac{1}{r \sin^2 \beta} \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - 2\cos \beta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial y_1} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y_1^2} \right] = q.
\end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

При переходе от системы уравнений (3.54) к уравнению краевого эффекта считаем, что у края оболочки $x_1 = 0$ моменты, прогибы, усилия являются функциями только ординаты x_1 . Тогда уравнения (3.54) преобразуются к виду:

$$\left. \begin{aligned}
& \frac{r}{E\delta \sin^4 \beta} \cdot \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial x_1^2} = 0; \\
& \frac{Dr}{\sin^4 \beta} \cdot \frac{\partial^4 \omega}{\partial x_1^4} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} = qr \sin^2 \beta.
\end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

Если ввести новую функцию так, чтобы согласно первому из уравнений (3.55) определились через эту функцию по формулам:

$$\omega = \frac{d^4}{dx_1^4}; \quad \Phi = -\frac{E\delta \sin^2 \beta}{r} \cdot \frac{d^2}{dx_1^2};$$

То второе уравнение (3.55) примет следующий вид:

$$\frac{d^8 F}{dx_1^8} + \frac{E\delta \sin^4 \beta}{Dr^2} \cdot \frac{d^4 F}{dx_1^4} = \frac{q}{D} \sin^4 \beta; \quad (3.56)$$

Заменив теперь в уравнении (3.56) на получим

$$\frac{d^4 \omega}{dx_1^4} + \frac{E\delta \sin^4 \beta}{Dr^2} \omega = \frac{q}{D} \sin^4 \beta. \quad (3.57)$$

Уравнение (3.57) является известным уравнением краевого эффекта круговой замкнутой цилиндрической оболочки, решение которого будет:

$$\omega = \frac{qr^4}{E\delta} + e^{-\lambda x_1} \left[C_1 \cos \lambda x_1 + C_2 \sin \lambda x_1 \right] + e^{\lambda x_1} \left[C_3 \cos \lambda x_1 + C_4 \sin \lambda x_1 \right] \quad (3.58)$$

где

$$\lambda = \frac{\sin \beta}{\sqrt{rq}} \sqrt[4]{3(-\mu^2)}$$

Принимая для железобетонных оболочек коэффициент Пуассона $\mu = 0,21$ получим.

$$\lambda = \frac{\sin \beta}{0,768\sqrt{rq}} \quad (3.59)$$

Пренебрегаем граничными условиями на противоположном крае и не учитываем два последних слагаемых в формуле (3.68). В результате

$$\omega = \frac{qr^2}{E\delta} + e^{-\lambda x_1} \left[C_1 \cos \lambda x_1 + C_2 \sin \lambda x_1 \right] \quad (3.60)$$

При определении величин изгибающих моментов следует оценивать, какую часть полной нагрузки на оболочку составляет нагрузка в формуле (3.60) приходящая на моментное напряженное состояние.

При $\lambda \geq \frac{6 \div 8}{a}$ где a - пролет оболочки (см. рис. 3.3), ширина зоны затухания краевого эффекта не превышает $0,5 a$ и, следовательно, исключается возможность наложения изгибающих моментов, действующих в противоположной при контурной зоне. Учитывая формулу (3.59), имеем

$$\frac{\sin \beta}{0,768\sqrt{rq}} \geq \frac{6 \div 8}{a} \quad (3.61)$$

Неравенство (3.61) устанавливает связь между r , δ и a при определенных значениях β и определяет предел применимости

безмоментной теории к рассматриваемым оболочкам. Кроме того, формула (3.59) устанавливает также размер угловой зоны в оболочке, позволяющей пользоваться решением (3.60).

Произвольные постоянные C_1 и C_2 могут быть определены при разнообразных граничных условиях на контуре. Рассмотрим случай шарнирного опирания:

$$\text{при } x_1 = 0; \quad \omega = 0; \quad M_{x_1} = 0;$$

$$\text{получаем } C_2 = 0; \quad C_1 = -\frac{qr^2}{E\delta}.$$

$$\text{Тогда } \omega = \frac{qr^2}{E\delta} \left(-e^{-\lambda x_1} \cos \lambda x_1 \right);$$

$$M_{x_1} = 0,289qr\delta \sin^2 \beta e^{-\lambda x_1} \sin \lambda x_1. \quad (3.62)$$

В направлении оси Y_1 получаем уравнение, аналогичное уравнению (3.57), решая которое находим M_{y_1} , Уравнение краевого эффекта не дает возможности определить крутящий момент в оболочке $M_{x_1 y_1}$, величиной которого по сравнению с величинами M_{x_1} и M_{y_1} можно пренебречь.

В качестве примера определим изгибающие моменты в оболочке со следующими параметрами: $a = 40 \text{ м}$; $f^\circ = 6 \text{ м}$; $r = 68,2 \text{ м}$; $\delta = 7 \text{ см}$. Задавая $\beta = 45^\circ$, получаем эпюры изгибающих моментов в оболочке (рис 3.5); с уменьшением угла β уменьшается величина $M_{\text{макс}}$. В табл. 3.2 приведены значения $M_{\text{макс}}$ для значений β и расстояния, на которых действует $M_{\text{макс}}$. Случай жесткой заделки может быть рассмотрен в местах сопряжений краев оболочек, при наличии у оболочек бортовых контурных ребер, жесткость которых превышает жесткость оболочки.

$$\text{Имеем при } x_1 = 0; \quad \omega = 0; \quad \frac{d\omega}{dx_1} = 0;$$

Получаем $C_1 = C_2 = -\frac{qr^2}{E\delta}$;

$$M_{x_1} = 0,289qr\delta \sin^2 \beta e^{-\lambda x_1} (\sin \lambda x_1 - \cos \lambda x_1)$$

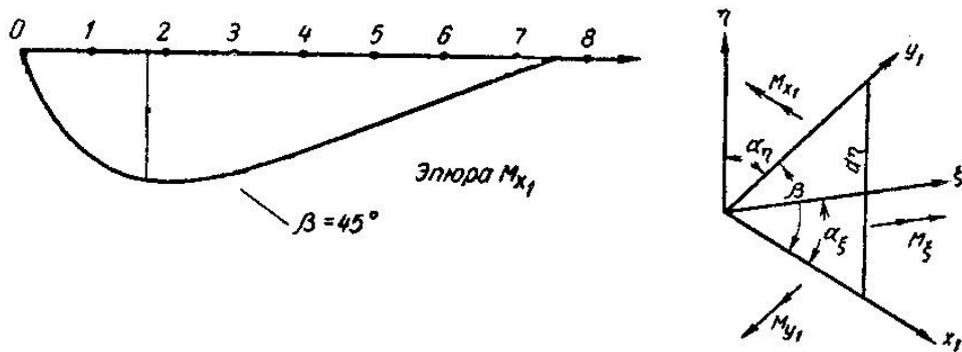


Рис. 3.5 Граничные условия и распределение моментов по контуре оболочки.

Таблица 3.2.

β в град	x_1 в м	M_{\max} в $H \cdot м / м$
45	1,84	2,17

Для оболочки с принятыми в предыдущем примере параметрами в табл. 3.3 приведены величины моментов в заделке, а также величины M_{\max} и расстояния, на которых они действуют.

Решение уравнения (3.57) дает возможность определять изгибающие моменты и при других случаях контурных закреплений. После того как получено решение в косоугольных координатах и определены моменты M_{x_1} и M_{y_1} , желательно преобразовать их в прямоугольную систему компонентов M_{ξ_1} и M_{η} . Выделив из оболочки треугольные элемент (рис 3.5), у которого одна сторона d_{η} параллельная одной из осей новой прямоугольной системы координат, а две другие имеют направления обеих косоугольных осей x_1 и y_1 , из условий равновесия можно получить.

$$\left. \begin{aligned} M_{\xi} \sin \beta &= M_{x_1} \cos^2 \alpha_{\xi} + M_{y_1} \sin^2 \alpha \eta; \\ M_{\eta} \sin \beta &= M_{x_1} \sin^2 \alpha_{\xi} + M_{y_1} \cos^2 \alpha \eta. \end{aligned} \right\} \quad (3.64)$$

В формулах перехода (3.64) не учитывался крутящий момент $M_{x_1 y_1}$, величиной которого вследствие его малости можно пренебречь.

Таблица 3.3.

β в град	x_1 в м	M_{\max} в Н·м/м	$M_{\text{зад}}$ в Н·м/м
45	3,68	1,43	-6,9 q

Расчет сечений и конструирование. Расчет сечений оболочек производится с учетом нормальных, касательных и главной усилий, вычисленных при статическом расчета оболочки и в соответствии с нормами проектирования бетонных и железобетонных конструкций.

Толщина стенки оболочки и принята класс бетона должны удовлетворять следующему условию: максимальная величина главного сжимающего напряжения не должна превышать расчетного призмического сопротивления R_b , а величина главного растягивающего напряжения - 25% расчетного сопротивления бетона R .

В сжатых зонах, а также в зонах, где возникают небольшие главные растягивающие напряжения, величина которых не превышает расчетного сопротивления бетона осевому растяжению R_{bt} , арматура в виде сеток ставится без расчета по конструктивным соображениям; площадь сечения арматуры должна составлять не менее 0,2 % от сечения бетона; сетки с квадратными или прямоугольными ячейками с шагом 20-25 см из проволоки диаметром 4 - 5 мм. На участках, где главные растягивающие напряжения превышают R_{bt} , они должны быть полностью восприняты арматурой; при этом в расчет вводится арматура, параллельная сторонам контура оболочки, и косая арматура.

При небольшой толщине плиты сетки располагаются в уровне

срединной поверхности; при толщине 7 см и более ставятся двойные сетки.

Применение метода конечных разностей к решению систем дифференциальных уравнений свода оболочек. Решение многих задач строительной механики оболочек и, в частности, рассматриваемых в настоящей задаче определения усилий в сечениях оболочек сопряжено с необходимостью численного интегрирования дифференциальных уравнений с частными производными.

Сущность этого метода заключается в том, что вместо входящих в дифференциальные уравнения отношений бесконечно малых величин рассматриваются отношения величин конечных; вместо производных, представляющих предел отношения бесконечно малых приращений функций dF к бесконечно малым, стремящимся к нулю приращениям аргументом dx или dy , рассматриваются отношения конечных приращений функций ΔF к соответствующим конечным приращениям аргументов Δx , Δy ; вместо интегральных кривых или интегральных поверхностей с плавным течением рассматриваются ломаные линии или многогранные поверхности, дающие значения функций не по всей континуальной области изменения аргументов, а лишь в конечном числе отдельных (дискретных) точек этой области (рис.3.6).

В результате вместо системы дифференциальных уравнений подлежит решению алгебраических уравнений.

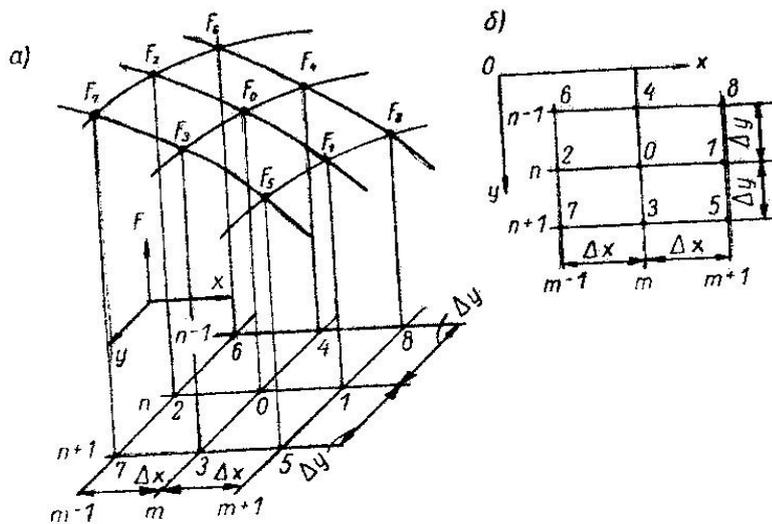


Рис.3.6. Интегральная поверхность функции напряжений а – аксонометрия; б – проекция функции F на координатную плоскость xOy .

В качестве неизвестных значения функций в ряде точек;

Ниже приводятся без выводов некоторые, связывающие значения производных с аппроксимирующими их выражениями в конечных разностях, и показана техника замены производных конечно-разностными отношениями.

На интегральной поверхности $F = f(x, y)$ рассмотрим точки F_0, F_1, \dots, F_8 , выбранные так, чтобы их проекции на координатную плоскость xOy т.е. точки $0, 1, \dots, 8$, оказались лежащими в узлах прямоугольной сетки с ячейками Δx и Δy (рис.3.6,а). Заменяя отрезки кривых $F_1 \div F_0 \div F_2$, $F_3 \div F_0 \div F_4$ и т.д., расположенных на интегральной поверхности, вписанными ломаными, состоящими из прямолинейных участков, будем аппроксимировать производные функции F по аргументам x или y отношениями конечных приращений ΔF к конечным приращениям аргументов.

Например, для лежащей на интегральной поверхности плоской

кривой $F_1 \div F_0 \div F_2$, производная $\frac{\partial F_0}{\partial x}$ в точке F_0 может быть аппроксимирована отношением приращения функции $\Delta F = F_1 - F_0$ к приращению абсциссы $\Delta x = x_1 - x_0$ (рис. 3.6).

$$\frac{\partial F_0}{\partial x} \approx \frac{\Delta F_0}{x_1 - x_0} = \frac{F_1 - F_0}{\Delta x} \quad (3.65)$$

Правая часть формулы (3.65) называется отношением правых разностей

Можно также написать отношение левых разностей:

$$\frac{\partial F_0}{\partial x} \approx \frac{\Delta F_0}{x_0 - x_2} = \frac{F_0 - F_2}{\Delta x} \quad (3.66)$$

Или дающее несколько более высокую точность аппроксимации отношение центральных разностей

$$\frac{\partial F_0}{\partial x} \approx \frac{\Delta F_0}{x_1 - x_2} = \frac{F_1 - F_2}{2\Delta x} \quad (3.67)$$

Аналогично, для лежащей на интегральной поверхности плоской кривой $F_3 \div F_0 \div F_4$ производная $\frac{\partial F_0}{\partial y}$ может быть аппроксимирована отношением правых разностей (рис.3.6).

$$\frac{\partial F_0}{\partial y} \approx \frac{F_3 - F_0}{\Delta y} \quad (3.68)$$

Или отношением левых разностей:

$$\frac{\partial F_0}{\partial y} \approx \frac{F_0 - F_4}{\Delta y} \quad (3.69)$$

Или отношением центральных разностей:

$$\frac{\partial F_0}{\partial y} \approx \frac{F_3 - F_4}{2\Delta y} \quad (3.70)$$

Для аппроксимации производных второго, третьего и четвертого порядка принимаются следующие формулы (рис.3.6).

$$\frac{\partial^2 F_0}{\partial x^2} \approx \frac{F_1 - 2F_0 + F_2}{\Delta x^2}; \quad (3.71)$$

$$\frac{\partial^2 F_0}{\partial y^2} \approx \frac{F_3 - 2F_0 + F_4}{\Delta y^2}; \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial^2 F_0}{\partial x \partial y} \approx \frac{F_5 - F_7 - F_8 + F_6}{4\Delta x \Delta y}; \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial^3 F_0}{\partial x^2 \partial y} \approx \frac{F_5 + F_7 + F_8 - F_6 + 2F_4 - 2F_3}{4\Delta x \Delta y}; \quad (3.74)$$

$$\frac{\partial^3 F_0}{\partial x \partial y^2} \approx \frac{F_5 + F_7 + F_8 - F_6 + 2F_2 - 2F_1}{2\Delta x \Delta y^2}; \quad (3.75)$$

$$\frac{\partial^4 F_0}{\partial x^2 \partial y^2} \approx \frac{4F_0 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 - 2F_1 + 2F_2 - 2F_3 - 2F_4}{\Delta x^2 \Delta y^2}; \quad (3.76)$$

Техника составления конечно-разностных уравнений, аппроксимирующих дифференциальные уравнения равновесия, сводится к следующему.

Спроектируем срединную поверхность оболочки с многоугольным или прямоугольным планом на горизонтальную плоскость на координатную плоскость xOy . Ориентируем две смежные стороны контура проекции оболочки (или две оси симметрии, если таковые имеются) параллельно координатным осям Ox и Oy . Построим внутри контура проекции сетку, образованную двумя системами равноотстоящих прямых, параллельных соответственно осям Ox и Oy . Тогда площадь проекции окажется разбитой на некоторое количество одинаковых прямоугольных (или квадратных) ячеек размерами $\Delta x \Delta y$ каждая.

Обозначим линии сетки, в том числе и линии контура, параллельные оси Oy , номерами $1, 2, \dots, m-1, m, m+1, \dots$, линии сетки, параллельные оси Ox , – номерами $1, 2, \dots, n-1, n, n+1, \dots$. Тогда любой узел сетки можно обозначить номерами пересекающихся в узле линий

сетки, например, узел $m - 1, n$; узел m, n ; узел $m, m + 1$ и т.п.

Рассматривая какой-нибудь узел сетки, например узел m, n , совместим его с узлом O схем, показанных на (рис3.6) и напишем для него конечно-разностное уравнение, заменяя члены аппроксимируемого дифференциального уравнения конечно-разностными отношения в соответствии с видом производных по формулам (3.65) – (3.76); при этом необходимо помещать рассматриваемый узел и окружающие его восемь узлов в квадрате, расположенном между положительными направлениями осей Ox и Oy .

Подобные конечно-разностные уравнения составляются для всех без исключения узлов сетки, в том числе и для узлов, расположенных на контуре проекции оболочки или на осях симметрии. Решение полученной системы линейных алгебраических уравнений с учетом заданных граничных условий может с известной степенью точности заменить решение системы дифференциальных уравнений.

Степень точности аппроксимации повышает при сгущении сетки. В некоторых случаях для повышения целесообразно сгущать сетку лишь в приконтурных полосах, в других случаях уместно применять косоугольные сетки.

В заключение приведем примеры конечно-разностных уравнений.

Уравнение

$$\frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_{xy}}{\partial y} + X = 0$$

Может быть по формулам (3.67) и (3.70) аппроксимировано уравнением

$$\frac{n_x \text{ (в)} - n_x \text{ (с)}}{2\Delta x} + \frac{n_{xy} \text{ (в)} - n_{xy} \text{ (с)}}{2\Delta y} + X = 0.$$

Для уравнения

$$\frac{\partial n_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} + Y = 0$$

По формулам (3.67) и (3.79) напишем

$$\frac{n_x \left(\leftarrow - n_x \rightleftarrows \right)}{2\Delta x} + \frac{n_{xy} \left(\leftarrow - n_{xy} \rightleftarrows \right)}{2\Delta y} + Y = 0.$$

Для уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} = 0$$

По формулам (3.71) и (3.72) напишем

$$\frac{n_1 - 2n_0 + n_2}{\Delta x^2} + \frac{n_3 - 2n_0 + n_4}{\Delta x^2} + Y = 0.$$

Ниже на числовом примере расчета свода оболочки покажем техника составления конечно-разностных уравнений.

Анализ напряженного состояния свода оболочки гипар (трансгиполоида, рис. 3.3). Уравнение срединной поверхности:

$$z = \frac{f_a}{a^2} x^2 + \frac{f_b}{b^2} y^2 = \frac{k_1}{2} x^2 + \frac{k_2}{2} y^2, \quad (3.77)$$

где

$$k_1 = \frac{2f_a}{a^2}; \quad k_2 = \frac{2f_b}{b^2}. \quad (3.78)$$

Параметры Монжа:

$$\left. \begin{aligned} p = \frac{\partial z}{\partial x} = k_1 x; \quad q = \frac{\partial z}{\partial y} = -k_2 x, \\ r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = k_1; \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0; \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -k_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.79)$$

Уравнения равновесия для случая вертикальной нагрузки ($X=0, Y=0$):

$$\frac{\partial n_x}{\partial x^2} + \frac{\partial n_{xy}}{\partial y^2} = 0; \quad (3.80)$$

$$\frac{\partial n_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y^2} = 0; \quad (3.81)$$

$$k_1 n_x - k_2 n_y = -Z. \quad (3.82)$$

Сопоставляя приведенные здесь формулы (3.77) – (3.82) с формулами выведенными при анализе напряженного состояния оболочки тина «эллиптической параболой» нельзя не заметить большого сходства их структуры: они различаются лишь знаком членов, содержащих коэффициенты k_2^* .

По аналогии с формулой запишем

$$\frac{\partial^2 n_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 n_y}{\partial y^2}. \quad (3.83)$$

По аналогии с формулой

$$k_2 \frac{\partial^2 n_x}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial^2 n_x}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \quad (3.84)$$

Конечно-разностное уравнение, аппроксимирующее дифференциальное уравнение (3.84)

$$-k_2 \frac{n_x^{m+1,n} - 2n_x^{m,n} + n_x^{m-1,n}}{\Delta x^2} + k_1 \frac{n_x^{m,n+1} - 2n_x^{m,n} + n_x^{m,n-1}}{\Delta y^2} = -\frac{\partial^2 Z^{m,n}}{\partial y^2}. \quad (3.85)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } x = \pm a \quad n_x &= 0; \\ \text{при } y = \pm a \quad n_y &= 0. \end{aligned} \quad (3.86)$$

Свободные члены уравнений (3.85) определяются:

а) для нагрузки g_1 равномерно распределенной по поверхности оболочки, – по формуле

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{k_2^2 \left(+ k_1^2 x^2 \right)}{\left(+ k_1^2 x^2 + k_2^2 y^2 \right)^{3/2}} g_1; \quad (3.87)$$

б) для нагрузки g_2 равномерно распределенной по горизонтальной проекции оболочки, – по формуле

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0.$$

После решения системы уравнений типа (3.85) и определения величин усилий n_x усилия n_y можно определить из соотношения:

$$n_y^{m,n} = \mp \frac{1}{k^2} \left(\zeta^{m,n} + k_1 n_x^{m,n} \right) \quad (3.88)$$

При нагрузке, равномерно распределенной по поверхности оболочки и по ее проекции, касательные усилия n_{xy} в узлах, расположенных на осях симметрии, т.е. на координатных осях Ox и Oy , равны нулю; в усилия, расположенных симметрично относительно осей симметрии оболочки, касательные усилия одинаковы по абсолютной величине, но имеют противоположные знаки; нормальные усилия n_x и, соответственно, n_y одинаковы и по абсолютной величине и по знаку.

Величины касательных усилий определяются из соотношений типа

$$\frac{n_{xy}^{m,n+1} - n_{xy}^{m,n-1}}{2\Delta y} = - \frac{n_x^{m+1,n} - n_x^{m-1,n}}{2\Delta x}, \quad (3.89)$$

или

$$\frac{n_{xy}^{m+1,n} - n_{xy}^{m-1,n}}{2\Delta x} = - \frac{n_y^{m,n+1} - n_y^{m,n-1}}{2\Delta y}. \quad (3.90)$$

Вычисление усилий n_{xy} следует начинать с рассмотрения узлов, расположенных на осях Ox и Oy , где $n_{xy} = 0$.

Расчет конструкции свода оболочек. Расчет железобетонных свода состоит в определении несущей способности плиты оболочки, контурных и коньковых элементов. Сборно-монолитная оболочка (рис.3.3) после достижения бетоном замоноличивания проектной прочности рассчитывается как монолитная. В расчетной схеме используется срединная поверхность гладкой оболочки, расчетный пролет которой определяется как расстояние между осями опор покрытия или между осями соответствующих бортовых элементов или диафрагм. Плиты сборных оболочек рассчитываются по прочности для двух стадий работы: в эксплуатации - на основные усилия, полученные при расчете гипара; при монтаже - на усилия от собственной массы плиты. При определении усилий в оболочке в упругой стадии площадь и момент инерции можно принимать как для бетонного или приведенного к нему сечения, если процент армирования $\mu \leq 1\%$.

Нагрузки на 1 м² проекции свода. Расчетная постоянная нагрузка на единицу площади горизонтальной проекции покрытия составляет

$$g = (g_1 + g_2) \cdot \frac{A_1}{A_2} \quad (3.91)$$

где g_1 - расчетная постоянная нагрузка от собственной массы конструкции гипара, g_2 - то же, от кровли на 1 м² поверхности покрытия;

A_1 - площадь поверхности гипара; A_2 - площадь плана (проекции) гипара; $\frac{A_1}{A_2}$ принимается равным 1,05.

Расчетная постоянная нагрузка g_1 от собственной массы конструкции подсчитывается по формуле:

$$g_1 = t\rho\gamma_f \quad (3.92)$$

где t - толщина оболочки; ρ - плотность бетона; γ_f коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый равным 1.1.

Расчетная нагрузка от собственной массы покрытия может также назначаться по аналогии с известными проектными решениями.

Расчетная постоянная нагрузка g_2 от кровли на 1 м^2 поверхности покрытия вычисляется с учетом состава кровельного ограждения (гидроизоляционный ковер, выравнивающая стяжка, утеплитель, пароизоляция). Нагрузка от стяжки и утеплителя зависит от их толщины t и плотности ρ .

Расчетная снеговая нагрузка составляет

$$S = S_n C \gamma_f, \quad (3.93)$$

где S_n - нормативная снеговая нагрузка на 1 м горизонтальной проекции гипара, принимаемая в зависимости от снегового района; C - коэффициент, принимаемый по СНиП; для пологих гипаров равен 1 ; γ_f - коэффициент надежности по нагрузке для железобетонных оболочек, равный $1,4$.

Полная равномерно распределенная нагрузка на 1 м^2 горизонтальной проекции покрытия, определяемая по формулам (3.91) и (3.93),

$$q = g + S. \quad (3.94)$$

Расчет плиты оболочки свода. Несущая способность плиты оболочки свода в направлении действия сжимающих усилий определяется из условия прочности без учета армирования по формуле для расчета внецентренно сжатых бетонных элементов:

$$N_2 \leq \alpha R_b A_b; A_b = \frac{N_2}{\alpha R_b}, \quad (3.95)$$

где N_2 - сжимающее усилие в плите оболочки свода вдоль выпуклой параболы; α - коэффициент, принимаемый равным 1 для тяжелого и легкого бетона; R_b - расчетное сопротивление бетона осевому сжатию (призменная прочность); принимается по классу бетона. Значение R_b умножается на коэффициент условий работы бетона $\gamma_{b2}=0,9$; A_b - площадь бетона сжатой полосы плиты шириной $b = 100 \text{ см}$, определяемая с учетом случайного эксцентриситета $e_a = 1 \text{ см}$ продольного усилия N_2

$$A_b = bt \left(1 - \frac{2e_a \eta}{t} \right) \quad (3.96)$$

где t , - толщина оболочки; η - коэффициент, учитывающий влияние

прогиба на величину эксцентриситета продольного усилия N_2 ; принимается равным 1.

Из формулы (3.96) определяется площадь сечения бетона A_b , а затем по вычисляется толщина плиты оболочки t .

При проектировании свода с ребрами сечением bh и шагом S влияние последних можно приближенно учитывать, заменяя ребристую оболочку гладкой с приведенной толщиной t_{red} .

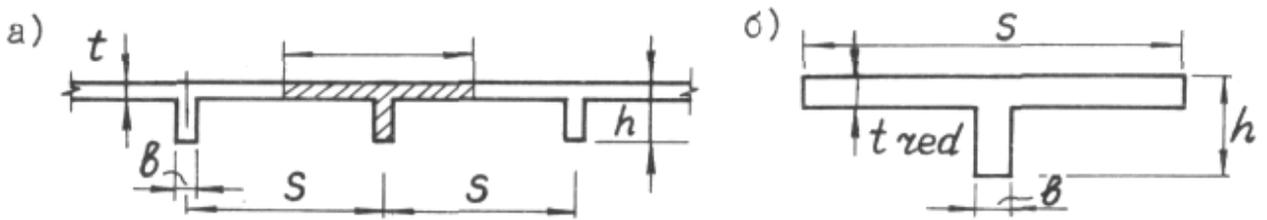


Рис. 3.7. К определению толщины ребристой оболочки свода а - плита оболочки свода; б - приведенное тавровое сечение

При расчете на мембранные усилия сечение приводится к эквивалентному по площади

$$t_{red,A} = \frac{bh + tS}{S} \quad (3.97)$$

При расчете краевой зоны на действие изгибающих моментов тавровое сечение приводится по жесткости

$$t_{red,B} = \sqrt[3]{\frac{12J}{S}} \quad (3.98)$$

где J - момент инерции таврового сечения (рис. 3.7,б).

Площадь сечения сжатой арматуры A'_s в направлении выпуклой параболы назначается не менее 0,2 % от площади сечения бетона A_b , т.е. на 1 м плиты следует принимать

$$A'_s > 0,2 t. \quad (3.99)$$

В направлении растягивающих усилий N_1 вдоль вогнутой параболы устанавливается арматура A_s по расчету. При армировании плиты

оболочки свода стержнями, ориентированными вдоль диагоналей поверхности, площадь сечения арматуры в направлении растяжения определяется из условия прочности центрально растянутых железобетонных элементов:

$$N_1 = R_s A_s ; \quad A_s = \frac{N_1}{R_s}, \quad (3.100)$$

где N_1 и A_s - соответственно растягивающие усилие и площадь сечения арматуры в направления вогнутой параболы на участке плиты шириной 1 м; R_s - расчетное сопротивление арматуры растяжению, принимаемое в зависимости от класса стали.

При армировании плиты стержнями, ориентированными вдоль образующих поверхности свода, условие прочности в направлении растягивающих усилий N_1 проверяется по формуле

$$N_1 \leq 2A_{s,1} R_s \cos 45^\circ, \quad (3.101)$$

где $A_{s,1}$ - площадь сечения стержней, ориентированных вдоль образующих оболочки одного направления, на участке шириной 1 м. Количество рабочей арматуры в каждом направлении:

$$A_{s,1} = \frac{N_1}{2R_s \cos 45^\circ} = \frac{N_1}{1,414R_s} \quad (3.102)$$

Прочность плиты на срез проверяется на действие касательных усилий

$$N_{xy} \leq 2R_{bt} bt, \quad (3.103)$$

где R_{bt} - расчетное сопротивление бетона осевому растяжению, зависящее от класса бетона; значение R_b умножается на коэффициент условий работы бетона γ_{b2} , равный 0,9.

Расчет контурных элементов оболочки. Площадь сечения сжатого контурного (бортового) элемента свода оболочки можно приближенно определить по сжимающему усилию N_b :

$$A_b = \frac{N_b}{R_b}$$

Бортовые элементы прямоугольного (квадратного) сечения с симметричной арматурой классов А-II, А-III, при расчетной длине $L_0 < 20h$ и случайных эксцентриситетах $e_a \leq 30$ разрешается рассчитывать по несущей способности как центрально-сжатые, исходя из условия

$$N_b \leq (R_b A_b + R_{sc} A'_s). \quad (3.104)$$

Требуемая площадь сечения сжатой арматуры:

$$A'_s = \frac{\frac{N_b}{\eta\varphi} - A_b R_b}{R_{sc}} \quad (3.105)$$

где N_b - продольное сжимающее усилие в бортовом элементе от расчетной нагрузки; $A_b = bh$ - площадь сечения элемента; b и h - ширина и высота сечения; A_s - площадь сечения всех сжатых продольных стержней; η - коэффициент условий работы, равный 0,9 при $h \leq 200$ мм и 1 при $h > 200$ мм; φ - коэффициент продольного изгиба, определяемый в зависимости от гибкости $\lambda = \frac{L_0}{h}$ и соотношения $\lambda = \frac{N_{b,L}}{N_b}$; L_0 - расчетная длина бортового элемента; $N_{b,L}$ - усилие от длительно действующей нагрузки; R_b - призматическая прочность бетона. Значение R_b умножается на коэффициент условий работы $\gamma_{и2}$, равный 0,9; R_{sc} - расчетное сопротивление арматуры сжатию, принимаемое по классу арматуры.

Минимальная площадь продольной сжатой арматуры в сечении бортовой балки принимается не менее 0,05% от площади сечения бетона.

При $L_0 > 20h$ расчет бортового элемента ведется на внецентренное сжатие с эксцентриситетом e . Если элемент выполнен из бетона класса В30 и ниже с ненапрягаемой арматурой классов А-II, А-III, то несущую способность сжатого бортового элемента при $e_a \leq 0,3 h_0$ можно проверять на действие усилия N_b , исходя из условия прочности при внецентренном сжатии (случайный эксцентриситет принимается равным большему из значений:

$$e_a = 1/600L_0; e_a = 1/30h \text{ и не менее } 1 \text{ см.}$$

$$N_b e \leq 0,5R_b b h^2 + A_s (h_0 - a')$$

$$N_b = R_b b h - R_{SC} A'_s - R_s A_s ,$$

где e - расстояние от продольной силы N_b до центра тяжести сечения арматуры A_s ; $h_0 = h - a$ - полезная высота сечения элемента; $a = a'$ - защитный слой арматуры.

$$e = e_a \eta + h/2 - a;$$

η - коэффициент, учитывающий влияние прогиба на величину эксцентриситета продольного усилия N_b .

Если гибкость элемента $\lambda = \frac{L_0}{i} < 14$, то η принимается равным 1; L_0 и i - соответственно расчетная длина и радиус инерции сечения бортового элемента. Для прямоугольного сечения $i = \sqrt{J_b / A_b} = \sqrt{h^2 / 12}$

При $\lambda > 14$ учитывается коэффициент η

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N_b}{N_{cr}}} \quad (3.106)$$

где N_{cr} - критическая величина продольной силы в бортовом элементе.

$$N_{cr} = \frac{6,4E_b}{L_0^2} \left[\frac{J_b}{\varphi_1} \left(\frac{0,11}{0,6 - 0,1 \frac{L_0}{h} - 0,01R_b + 0,1} \right) + \alpha J_s \right] \quad (3.107)$$

E_b - начальный модуль упругости бетона при сжатии; J_b - момент инерции поперечного сечения бортового элемента; для прямоугольного сечения $J_b = bh^3/12$; $J_s = \mu bh_0(0,5h - a)^2$ - приведенный момент инерции сечения арматуры, относительно центра тяжести бетонного сечения; μ - коэффициент армирования; $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$; E_s - модуль упругости арматуры; $\varphi_1 =$

1 - коэффициент, учитывающий влияние длительного действия нагрузки на прогиб элемента.

Если оказывается, что $N_b > N_{cr}$, то следует увеличить размеры сечения элемента.

В общем случае несущая способность растянутого бортового элемента проверяется на действие продольного усилия N_b , исходя из условия прочности при внецентренном растяжении по формулам:

$$N_b e \leq R_s A_s (h_0 - a');$$

$$N_b e' \leq R_s A_s (h_0 - a'),$$

при условии, что по высоте поперечного сечения растягивающее усилие N_b приложено между верхней и нижней продольной арматурой.

Геометрические параметры, входящие в формулы даны на рис. 3.8, 3.9.

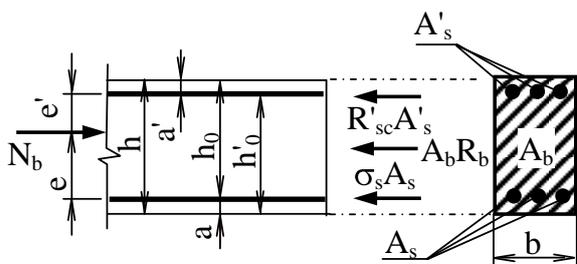


Рис. 3.8. Схема усилий во внецентренно сжатом элементе при расчете его на прочность

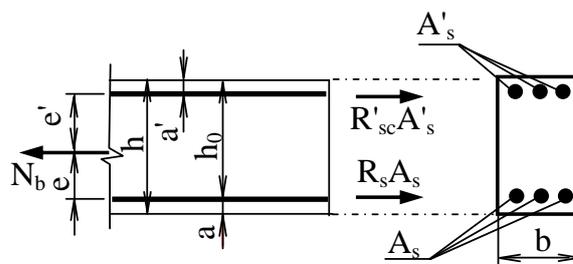


Рис. 3.9. Схема усилий во внецентренно растянутом элементе при расчете его на прочность

Во внецентренно растянутых элементах содержание продольной арматуры принимается: $\mu \geq 0,05\%$.

Если контурные ребра располагаются без эксцентриситета относительно срединной поверхности оболочки и жесткостью их на изгиб в горизонтальной плоскости пренебрегают, то проверку несущей способности ребра производят как центрально-растянутого элемента.

$$N_b \leq R_s A_s \tag{3.108}$$

где N_b - растягивающее усилие в контурном элементе; A_s - площадь сечения всей продольной арматуры; R_s - расчетное сопротивление ар-

матуры растяжению, определяемое по классу арматуры. Минимальное содержание продольной арматуры A_s в центрально растянутых элементах принимается равным 0,10%.

При использовании напрягаемой арматуры прочность центрально-растянутых элементов рассчитывают по условию

$$N_b \leq \gamma_{s6} R_s A_{sp} + R_s A_s, \quad (3.109)$$

где R_{sp} – площадь сечения напрягаемой арматуры; γ_{s6} - коэффициент условия работы высокопрочной арматуры при напряжениях выше условного предела текучести.

Расчет затяжки диафрагм свода. При опирании свода оболочки на колонны или фундаменты, распор может восприниматься стальными или железобетонными затяжками. Подбор сечения затяжки производится по формулам:

$$A = \frac{F_h}{R_y} \quad \text{или} \quad A_s = \frac{F_h}{R_s}, \quad (3.110)$$

где F_h - распор; A - площадь сечения затяжки из жесткой арматуры (Ст.3, Ст.5); A_s - то же из стержневой арматуры; R_y - расчетное сопротивление растяжению прокатной стали; R_s - расчетное сопротивление растяжению стержневой арматуры.

Расчет шпоночных соединений сборно-монолитных сводов оболочек. Для восприятия сдвигающих усилий сборные железобетонные панели соединяются между собой и с контурными конструкциями бетонными шпоночными швами. Размеры бетонных шпонок проверяются расчетом из условия прочности ее против раздавливания

$$\delta_k \geq \frac{S \cdot a}{R_{bt} l_k n_k} \quad (3.111)$$

и против среза

$$h_k \geq \frac{S \cdot a}{2R_{bt} l_k n_k} \quad (3.112)$$

где S - сдвигающее усилие на единице длины; δ_k , h_k и l_k - соответственно глубина, высота и длина шпонки (задаются при назначении размеров сборной панели); n - число шпонок вдоль одной грани панели; a - размер сборной панели (длина стороны, вдоль которой рассчитываются шпонки); R_b и R_{bt} - соответственно призмная прочность бетона и расчетное сопротивление бетона осевому растяжению

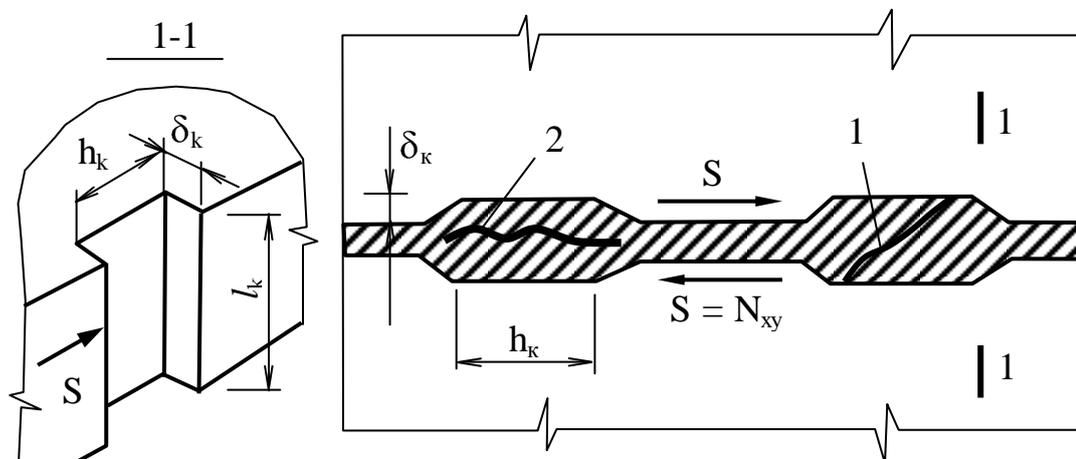


Рис. 3.10. К расчету бетонных шпонок. 1 - разрушение бетонной шпонки от раздавливания; 2 - то же, от скалывания.

4. Расчетная оценка работы натурального свода оболочек по результатам экспериментальных исследований

В целях широкого внедрения результатов исследования результаты модельных испытаний применялись для оценки работы натурального свода оболочек положительной гауссовой кривизны М 1:20. Это масштаб соответствовала пролету натурной оболочки 36 м. Унифицированная нагрузка на натурной оболочки в соответствии «Руководство...» принимались равной 4 кН/м^2 .

Модели свода оболочек покрытий выполнялись с соблюдением требований теории моделирования физического подобия. Характеристики исследованных типов моделей и натуральных конструкций покрытий приведены в табл. 3.6.

Все параметры напряженно-деформированного состояния натуральных

оболочек покрытий определяем в соответствие трех основных показателей подобия: геометрическое силовое, деформационное.

Нагрузка на исследуемую модель при известной величины (унифицированной) нагрузки на натурные конструкции покрытий определяем с учетом прочностных характеристик материалов

$$q_m = \frac{q_n}{\alpha_R}, \quad q_{me} = \frac{q_{nl}}{\alpha_m \alpha_R}, \quad F_m = \frac{F_n}{\alpha_m^2 \alpha_R} \quad (3.113)$$

где q_m , q_m' , F_m – соответственно, распределенное по площади, по длине (полосовая) и сосредоточенная нагрузка на модель;

q_n , q_n' , F_n – тоже соответственно на натурные конструкции

$\alpha_m = L_n/L_m$ – коэффициент масштаба – геометрического подобия;

$\alpha_R = R_n/R_m$ – коэффициент прочности – силового подобия;

$\alpha_E = E_n/E_m$ – коэффициент деформации – деформационного подобия;

С учетом этих коэффициентов подобия деформация и перемещения натуральных оболочек определяем по формулам

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l_n}{l_n} = \frac{\Delta l_m}{l_m} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_R \alpha_E}; \quad W_n = \alpha_m W_m; \quad U_n = \Delta l_m \frac{\alpha_m}{\alpha_R \alpha_E}$$

Изгибные и осевые усилия определяется по формулам:

$$M_n = M_m \alpha_m^2 \alpha_R; \quad N_n = N_m \alpha_m \alpha_R,$$

где M_m , N_m – изгибающий момент, продольная сила в модели;

M_n , N_n – тоже, на натурной конструкции.

Исследованные параметры модели, натуральных конструкций приведены в табл. 3.6

С применением этих расчетных параметров выполнена численная оценка напряженно-деформированного состояния натурального свода оболочек, покрытий при статических загрузениях. Результаты расчета приведены в табл. 3.6. Которые могут применяться для проектирования натуральных свода оболочек отрицательной и положительной гауссовой кривизны пролетами 36 м и более.

Таблица 3.6

**Расчетная оценка работы натуральных свода оболочек покрытий пролетами 36 м. Сравнение
экспериментальных и расчетных данных**

№ п.п.	Основные данные, размерность	Условные обозначения	Свод оболочек	
			Модели М 1:20	Натурные конструкции
			Положительной кривизны	
1	Размер оболочки, м	l, \emptyset	$\emptyset 1,8$	$\emptyset 36$
2	Средняя толщина оболочки, мм	h	6,7	70
3	Проектный радиус кривизны оболочки, м	R	1,8	36
4	Стрела подъема оболочки, контурной конструкции, м	$\frac{f}{f_1}$	0,56	7,2
			0,09	1,8
5	Класс бетона призмная прочность, МПа	B_n, R_b	25	30
			20,5	22
6	Начальный модуль упругости, МПа	E_b	21667	32500
7	Возраст к моменту испытаний, сут	τ	120	120

№ п.п.	Основные данные, размерность	Условные обозначения	Свод оболочек	
			Модели М 1:20	Натурные конструкции
			Положительной кривизны	
8	Длительность наблюдений, сут	t-τ	120	120
9	Длительная нагрузка, кН/м ²	кН/м ²	3,7	4
10	Прогиб: к началу наблюдения, мм	w	$\frac{1,4}{1,5}$	$\frac{28}{30}$
	к концу наблюдения		-	-
11	Разрушающая нагрузка: кратковременная, кН/м ²	q _{sh}	$\frac{24,7}{22,4}$	$\frac{11,8}{10,7}$
	Длительная, кН/м ²	Q _t	$\frac{-}{18,3}$	$\frac{-}{8,7}$

В числителе экспериментальные данные, в знаменателе – расчетные

Исследованные параметры свод оболочек

Таблица 3.7.

№	Основные данные, размерность	Условные обозначения	Свод оболочки		
			Положительной кривизны		
			Модели	Натурные конструкции	
1	2	3	4	5	
1	Коэффициент масштаба, геометрического подобия	$\alpha_m = L_H / L_M$	$\frac{36}{1,8} = 20$	36	
2	Коэффициент прочности, силовые подобия	$\alpha_R = R_H / R_M$	$\frac{22}{20,5} = 1,07$	22	
3	Коэффициент деформации - деформационного подобия	$\alpha_E = E_H / E_M$	$\frac{32500}{21667} = 1,5$	325000	
4	Нагрузка 4.1. Распределенная, $кН/м^2$	$q_M = \frac{q_H}{\alpha_R}$	3,74	4,0	

№	Основные данные, размерность	Условные обозначения	Свод оболочки		
			Положительной кривизны		
			Модели	Натурные конструкции	
1	2	3	4	5	
	4.2. Полосовая, $кН/м$	$q_{M\ell} = \frac{q_{H\ell}}{\alpha_m \alpha_R}$	0,93	0,04	
	4.3. Сосредоточенная, $кН$	$F_M = \frac{F_H}{\alpha_m^2 \alpha_R}$	0,093	0,0002	
5	Относительные Деформации, $мм/мм$	$\varepsilon_H = \frac{\Delta l_H}{l_H} = \frac{\Delta l_M}{l_M} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_R \alpha_E}$	$\varepsilon_H = 12,5\varepsilon_M$		
6	Прогиб, $мм$	$W_H = \alpha_m W_M$	$W_H = 20W_M$	64	
7	Перемещение, $мм$	$U_H = U_M \frac{\alpha_m}{\alpha_R \alpha_E}$	$U_H = 12,5U_M$		
8	Продольные усилия, $кН$	$N_H = \alpha_m \alpha_R N_M$	$N_H = 21,4N_M$	48,5	
9	Изгибающий момент, $кН.м$	$M_H = \alpha_m^2 \alpha_R M_M$	$M_H = 428M_M$	1370	

5. Рекомендации для реализации результатов исследований проектные технико-экономические достижения от реализации сводчатых оболочек.

Проведенные исследования и практика возведения железобетонных тонкостенных оболочек показала, что применение этих конструкций в Узбекистане не только возможно, но экономически и технически целесообразно, ибо обеспечивает существенное снижение капитальных затрат и расхода материалов без удлинения сроков строительства. Однако особенности строительно-климатической зоны налагают ряд условий на изготовление и монтаж сборных и сборно-монолитных оболочек. Элементы оболочек должны производиться в открытых и закрытых цехах в условиях стационарных заводов железобетонных изделий с систематическим пооперационным технологическим контролем. Полигонное изготовление не должно быть исключено главным образом из-за продолжительности теплого периода, а также из-за не опасности неожиданных заморозков в осенний и весенний периоды. Кроме того, пооперационный контроль технологического процесса в условиях открытого полигона может быть налажен столь же четко, как при стационарном производстве в условиях закрытого цеха.

При разработке пространственных сводчатых конструкций следует стремиться к такому членению оболочки на сборные элементы, при котором количество разнотипных по опалубке элементов было бы сведено к минимуму и их можно было применять для ряда пролетов (размеров оболочек), изменяя только характер армирования в зависимости от размеров покрытия и нагрузки на него. Сами сборные элементы следует проектировать по возможности крупноразмерными (в пределах транспортного габарита), чтобы уменьшить число монтажных подъемов и протяженность швов замоноличивания.

При членении оболочки на сборные элементы надо производить

разрезку ее таким образом, чтобы монтаж можно было осуществлять без применения лесов или подмостей, устанавливая монтируемые элементы на место непосредственно "с колес" или укрупнением на монтажные блоки.

Изложенное особенно важно для всех районов Узбекистана, так как в этом случае необходимо свести к минимуму размеры производственных площадей завода железобетонных изделий и сроки возведения покрытия, включая монтаж и замоноличивание швов.

В условиях Республики необходимо четко наладить работы по замоноличиванию швов при положительных и высоких температурах. Заранее приготовленные концентрированные растворы добавок следует разбавлять непосредственно перед употреблением, оперативно изменяя процент добавок в зависимости от меняющейся температуры наружного воздуха.

Таким же тщательным должно быть изготовление, хранение и испытание контрольных образцов бетона замоноличивания. Только при четкой работе службы замоноличивания и строительной лаборатории может быть налажен бесперебойный монтаж конструкций в течение всего года.

В качестве материала для оболочек можно, кроме традиционного тяжелого железобетона, рекомендовать также легкие бетоны, в частности керамзитобетон. Применение легких бетонов позволяет не только уменьшить массу несущей части покрытия, но и учесть влияние легкой оболочки при теплотехническом расчете и соответственно уменьшить слой утеплителя. Очевидно, что эффект от применения легких бетонов может быть получен, в первую очередь, в ограждающих элементах оболочки — плитах; что же касается бортовых элементов, диафрагм, затяжек и прочих несущих элементов, где целесообразно использовать предварительное напряжение, то для них следует применять обычный, желателен высокомарочный, бетон.

Другим путем уменьшения массы покрытия является применение

сталежелезобетонных конструкций, где в качестве ограждающих элементов оболочки используются железобетонные или легкобетонные плиты, а в качестве диафрагм — стальные конструкции. Комплексные сталежелезобетонные оболочки особенно целесообразны при пролетах покрытия, превышающих 24 м.

При применении сталежелезобетонных конструкций уменьшаются затраты труда на монтаже и сокращаются сроки возведения покрытия, что особенно важно в условиях областей Республики.

Наряду с изложенным выше, следует отметить, что основным критерием внедрения пространственных покрытий является их экономичность, и выбор того или иного варианта надо производить только на основе технико-экономических сопоставлений с обязательным учетом специфических местных условий площадки (развития базы стройиндустрии, транспортных коммуникаций, парка монтажных механизмов, климатических условий и др.).

Все эти условия, а также условия эксплуатации законченного покрытия учитываются в экономическом сравнении при вычислении приведенных затрат. Как правило, экономический эффект при применении оболочек, вычисленный по приведенным затратам, выше, чем по сметной стоимости, именно за счет уменьшения эксплуатационных затрат.

Внедрение экономичных, высокоэффективных видов оболочек в массовое строительство — одна из важнейших задач современной строительной техники.

Ниже приведем технико-экономические достижения полученные по результатам проведенных исследований.

Технико-экономические показатели на 1 м² покрытий

Таблица 3.8.

Показатели	Свод оболочки двойкой кривизны	Плиты по железобетонн ым фермам с шагом 6 м	Плиты по железобетонн ым фермам с шагом 12 м	Свод оболочки двойкой кривизны по стальным диафрагмам	Железобетонн ые плиты по стальным фермам с шагом 12 м
Расход материалов:					
бетона, см	$\frac{8,56}{68,0}$	$\frac{12,04}{95,5}$	$\frac{12,6}{100}$	$\frac{6,2}{56,6}$	$\frac{10,97}{100}$
стали, общий, кг	$\frac{8,56}{68,0}$	$\frac{23,3}{105,5}$	$\frac{22,1}{100}$	$\frac{25,4}{45,0}$	$\frac{56,6}{100}$
стали, без учета фонарей и переплетов, кг	$\frac{8,56}{68,0}$	$\frac{16,8}{113,7}$	$\frac{14,8}{100}$	$\frac{19,7}{41,0}$	$\frac{47,9}{100}$
Трудоемкость, чел.-ч.:					
изготовления	1,33	2,27	1,97	1,28	1,94
монтажа	0,35	0,41	0,25	0,61	0,71
Итого, чел.-ч.:	$\frac{1,68}{75,6}$	$\frac{2,68}{120,7}$	$\frac{2,22}{100}$	$\frac{1,89}{71,4}$	$\frac{2,65}{100}$

Показатели	Свод оболочки двойкой кривизны	Плиты по железобетонн ым фермам с шагом 6 м	Плиты по железобетонн ым фермам с шагом 12 м	Свод оболочки двойкой кривизны по стальным диафрагмам	Железобетонн ые плиты по стальным фермам с шагом 12 м
Стоимость, сум:					
изготовления	5,95	7,70	8,45	7,65	13,30
монтажа	0,72	1,05	0,58	1,06	1,16
транспортные и складские расходы	0,60	0,88	1,05	0,65	1,24
Итого	<u>7,27</u> 72,2	<u>9,68</u> 95,5	<u>10,08</u> 100	<u>9,36</u> 59,7	<u>15,70</u> 100
Сметная стоимость, сум	<u>14,19</u> 70,0	<u>20,29</u> 100	<u>20,28</u> 100	<u>16,83</u> 63,5	<u>26,45</u> 100
Приведенные затраты, сум	<u>18,2</u> 71,1	<u>25,5</u> 99,6	<u>25,6</u> 100	<u>22,1</u> 58,8	<u>36,6</u> 100

6. Выводы по третьей главе

1. Проведенные исследования сводов оболочек показали, что они работают как пространственные системы с высокой жесткостью и несущей способностью и они могут применяться при конкретном проектировании строительных объектов.

2. В рассматриваемых покрытиях, независимо от типа контурных конструкций, при действии равномерно распределенной нагрузки характер распределения мембранных усилий в центральных зонах свода оболочек одинаков. Напряженное состояние оболочек в этих зонах близко к безмоментному, и незначительными изгибающими моментами, действующими здесь, можно пренебречь. В центре системы образуется область двухосного сжатия, охватывающая примерно 0.8 пролета покрытия.

3. Нормальные усилия, направленные перпендикулярно контуру, близки по значениям для оболочек с различными краевыми условиями. В оболочках, опертых на фермы и жесткие стены, действуют вдоль контура сжимающие усилия незначительной величины, а в оболочке, опертой на ряды колонн, возникает в том же направлении значительное растяжение, быстро уменьшающееся по мере удаления от края оболочки.

4. Расчет по безмоментной теории при использовании метода конечных разностей благодаря своей простоте может быть рекомендован для стадии поиска конструктивного решения покрытия из многоугольных сводов оболочек.

5. Комплексный подход к моделированию покрытий из свода оболочек позволил провести исследования на малых моделях в полном объеме, с достаточной надежностью полученных результатов. Данные испытаний согласуются с результатами расчетов оболочек в упругой и неупругой стадии.

Исследование доказывает целесообразность проведения экспериментов на малых моделях с учетом теории подобия и моделирования для проверки прочности реальных пространственных покрытий.

6. Конструирование покрытий из сводов, выполненное в соответствии с эпюрами внутренних сил и моментов, следует производить с учетом особенностей их работы. Сборные панели оболочек целесообразно армировать сетками с прямолинейными рабочими стержнями, укладываемыми вдоль сторон контура оболочки. В коньковых и приконтурных полосах покрытия должно предусматриваться армирование для восприятия изгибающих моментов, действующих перпендикулярно полосам.

Рациональным является способ монтажа оболочек покрытия отдельными секциями, представляющими собой отдельных секторов оболочки, с установкой одной линии инвентарных монтажных опор.

7. На основании анализа результатов проектирования реальных объектов можно заключить, что наряду с высокими конструктивными качествами, покрытия с сочлененными сводами оболочками имеют хорошие технико-экономические показатели.

Основные выводы

На основе проведенных экспериментальных исследований разработана и развита метод моделирования железобетонных тонкостенных пространственных конструкции полигональных свод оболочек покрытий.

На железобетонных модель выполненных в масштабе 1:20 проанализирован напряженно-деформированное состояния свод оболочки при действия распределенной вертикальной нагрузки. Исследована работы оболочек как в линейный так и в нелинейный области деформирования.

Экспериментально выявлены высокая трещиностойкость и жесткость исследуемых сводчатых оболочек. Прогиб центральной части оболочки при нагрузке $3,2 \text{ кН/м}^2$ соответствующей полной нормативной нагрузке на натурную конструкции составила 1,0 мм или 1/1800 пролета.

Экспериментально подтверждена существенное влияние наличия контурных арок на статическую работу свод оболочек. Выявлены характерные особенности деформирования оболочка при наличие меридиональных ребер. При этом наличие меридиональных ребер в сводах - оболочек приводит к значительное увеличение жесткости 1,8... 2,5 раза.

Экспериментально обоснована в процессе исследования предельной стадии поведения конструкции о формирования и развития радиально - кольцевой схемы излома полигональных свод оболочки.

Экспериментально выявлена высокая несущая способность исследованных оболочек с контурными арками. Разрушающая нагрузка превысила расчетную нагрузку на натурную конструкцию в 3 раз.

Выявлено также возможность разрушения оболочки по одному из опорных сечений.

На основе проведенных исследований, разработана методика расчета железобетонных сводов оболочек различных геометрических форм на действие кратковременных нагрузок с учетом нормированных параметров нелинейного деформирования.

Построена разрешающая система уравнений в смешанной форме для расчета железобетонных сводов оболочек на кратковременное действие нагрузок с учетом физической и геометрической нелинейности, позволяющая учитывать изменения жесткостных параметров связанных с образованием и развитием трещин на различных уровнях нагружения.

На основе теории гибких оболочек и нелинейных зависимостей, получена разрешающая система уравнений, позволяющая вести оценку и прогнозирование напряженно-деформированного состояния сводов оболочек в стадии эксплуатации с учетом влияния климатических условий районов строительства.

Полученные, разрешающие системы уравнений могут применены при разработке алгоритм расчета и составление блок-схема позволяющая определять напряжения, деформации, перемещения, схемы распределения трещин при кратковременной нагрузке и оценке несущую способности при местном (локальном) разрушении железобетонных сводов оболочек различных геометрических форм.

В результате проведенных экспериментально теоретических исследований модели сводов оболочек при кратковременном загрузении, установлены законы нелинейного деформирования при загрузении и разгрузке выявлены схемы образования трещин и разрушения, оценена их несущая способность и напряженно-деформированное состояние.

По результатам проведенных численных экспериментов изучено напряженно-деформированное состояние и оценена, несущая способность свода оболочек, при кратковременном загрузении. Выполнен сравнительный анализ опытных и расчетных данных автора с результатами испытаний, пологих сводов оболочек показали хорошее соответствии.

Проведенные исследования сводов оболочек показали, что они работают как пространственные системы с высокой жесткостью и несущей способностью и они могут применяться при конкретном проектировании строительных объектов.

В рассматриваемых покрытиях, независимо от типа контурных конструкций, при действии равномерно распределенной нагрузки характер распределения мембранных усилий в центральных зонах свода оболочек одинаков. Напряженное состояние оболочек в этих зонах близко к безмоментному, и незначительными изгибающими моментами, действующими здесь, можно пренебречь. В центре системы образуется область двухосного сжатия, охватывающая примерно 0.8 пролета покрытия.

Нормальные усилия, направленные перпендикулярно контуру, близки по значениям для оболочек с различными краевыми условиями. В оболочках, опертых на фермы и жесткие стены, действуют вдоль контура сжимающие усилия незначительной величины, а в оболочке, опертой на ряды колонн, возникает в том же направлении значительное растяжение, быстро уменьшающееся по мере удаления от края оболочки.

Расчет по безмоментной теории при использовании метода конечных разностей благодаря своей простоте может быть рекомендован для стадии поиска конструктивного решения покрытия из многоугольных сводов оболочек.

Комплексный подход к моделированию покрытий из свода оболочек позволил провести исследования на малых моделях в полном объеме, с достаточной надежностью полученных результатов. Данные испытаний согласуются с результатами расчетов оболочек в упругой и неупругой стадии.

Исследование доказывает целесообразность проведения экспериментов на малых моделях с учетом теории подобия и моделирования для проверки прочности реальных пространственных покрытий.

Конструирование покрытий из сводов, выполненное в соответствии с эпюрами внутренних сил и моментов, следует производить с учетом особенностей их работы. Сборные панели оболочек целесообразно армировать сетками с прямолинейными рабочими стержнями, укладываемыми вдоль сторон контура оболочки. В коньковых и приконтурных

полосах покрытия должно предусматриваться армирование для восприятия изгибающих моментов, действующих перпендикулярно полосам.

Рациональным является способ монтажа оболочек покрытия отдельными секциями, представляющими собой отдельных секторов оболочки, с установкой одной линии инвентарных монтажных опор.

На основании анализа результатов проектирования реальных объектов можно заключить, что наряду с высокими конструктивными качествами, покрытия с сочлененными сводами оболочками имеют хорошие технико-экономические показатели.

Список литературы

Указы и постановление Президента Республики Узбекистан и постановление Кабинета Министров.

1. Каримов И.А. Постановление Президента №1111-847 от 29 апреля 2008 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности проектных организаций» ;
2. Указ «О мерах по дальнейшему совершенствованию архитектуры и градостроительства в Узбекистане» от 20 апреля 2000 года.
3. Каримов И.А. Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана. Тошкент, Ўзбекистон, 2009 – 7 с.

Основные литературы.

I. глава

4. Pucher A. Beitrag zur Theorie tragender Flächen. Dissertation, Techni «che Hochschule Graz, 1931, and «Uber den Spannungszustand dekrumnter Flächen». Beton and Eisen, 33, 298, 1934.
5. Флюгге В. «Статика и динамика оболочек». М., Госстройиздат, 1961.- 480с.
6. Ржаницын А. Р. Пологие оболочки и волнистые своды. ЦНИИСК. Вып. 14, М., Госстройиздат, 1960.
7. Mierisch R. «Successive approximations applied to the design of walls of circular reinforced concrete tanks». The Journal of the Institution of Engineers.
8. Markus G. «Korszimmetrikus szerkezetek elmelete es szamitasa». Budapest, Miiszaki Konivkiado, 1964.
9. Candela F. General formulas for membrane stresses in hyperbolic paraboloidal shells. Journal of the American concrete institute. October, 1960, № 4, v. 32; Proceedings, v. 57.
10. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих тонких оболочек. М.,

- Гостехтеориздат, 1953. 544 с.
11. Пастернак П.Л. и др. Железобетонные конструкции. М., Госстройиздат. 1961. -856с
 12. Власов В.З. «Общая теория оболочек». Гостехиздат, 1949.
 13. Beguin C. H. A type of solution for thin shells in the form of a hyper-bolic paraboloid Zeitschrift für angewandte Mathematic und Physik, 1960.
 14. Zienkiewicz O. C, Cheung V. K,. The finite element method in structural and continuum mechanics. McGraw-Hill, London, 1967.
 15. Dayaratnaw P., Jagannadharao V, Pradhamam S. Model study of hyperbolic paraboloid shells. Journal of the american concrete institute, May, 1966, proceedings, v. 63, № 5.
 16. Eras G., Elze H. «Berechnungsverfahren für vorgespannte, doppelt gekrümmte Seilnetzwerke» - Bauplanung und Bautechnik, 1961, No, 7.
 17. Миленковский И. Е. и др. К расчету пологих оболочек типа гиперболического параболоида по моментной теории. В кн.: Тонкостенные железобетонные пространственные конструкции. М.: Стройиздат, 1970.
 18. Назаров А. А. Основы теории и методы расчета пологих оболочек, М.: Стройиздат, 1966.
 19. Абовский В. П., Глейзер М. А., Абрамович К. Г. и др. Гиперболические оболочки в покрытиях зданий. — «Бетон и железобетон», 1966, № 12.
 20. Абовский В.П., Абрамович К.Г., Глейзер М.А. и др. Экспериментальные исследования сборных железобетонных оболочек. Красноярск, Красноярское книжное изд-во, 1966.
 21. Никреев В.М., Шадурский В.Л. «Практические методы расчета оболочек». –М.: Стройиздат, 1966. - 272 с.
 22. Рассказов А. О. Расчет оболочек типа гиперболических параболоидов. Киев, Изд-во Киевского университета, 1972.

II. глава

- 23.** Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. М., Стройиздат, 1979. -416 с.
- 24.** Раззаков С.Р., Матниязов Б.И., Бердиев О., Раззаков Ж. «Темир бетон гумбазлар (хиллари, конструктив ва хисобий схемалари)». - Ўзбекистон Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги томонидан тавсия қилинган ўқув қўлланма. Тошкент, «Фан ва Технология» нашриёти. 2009, - 83 б.
- 25.** Раззаков С.Р., Матниязов Б.И., Бердиев О., Раззаков Ж. «Темир бетон гумбазлар (хиллари, конструктив схемалари, монтаж усуллари ва техник иқтисодий кўрсаткичлари)». - Ўзбекистон Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги томонидан тавсия қилинган ўқув қўлланма. Тошкент, «Фан ва Технология» нашриёти, 2009. 43 б.
- 26.** Раззаков С.Р. Составные железобетонные оболочки покрытий зданий в условиях длительной эксплуатации и сейсмических воздействий. Ташкент, издательство «Фан» Академии наук Республики Узбекистан, 2004. -380 с.

III. глава

- 27.** Раззаков С.Р. Составные железобетонные оболочки покрытий зданий в условиях длительной эксплуатации и сейсмических воздействий. Ташкент, издательство «Фан» Академии наук Республики Узбекистан, 2004. -380 с.
- 28.** Шугаев В.В., Пятикрестовский К.П., Базаров А.Б. «Исследование складчатого пространственного покрытия на моделях», - Пространственные конструкции зданий и сооружений. 1977, вып. 3, 67-77 с.
- 29.** Власов В.З. «Общая теория оболочек». Гостехиздат, 1949.
- 30.** Раззаков Ж.С., Хамракулов У.Д., Шамюнов М., Раззаков Н.С. Расчет полигональных оболочек с учетом влияния краевого эффекта. Материалы Международной конференции СамГАСИ «Современные проблемы строительных материалов и конструкций» 2013г.

31. Никреев В.М., Шадурский В.Л. «Практические методы расчета оболочек». –М.: Стройиздат, 1966. - 272 с.
32. Миленковский И. Е. и др. К расчету пологих оболочек типа гиперболического параболоида по моментной теории. В кн.: Тонкостенные железобетонные пространственные конструкции. М.: Стройиздат, 1970.
33. Сахновский К.В., Горенштейн Б.В., Линецкий В.Д. «Сборные пространственные и большепролетные конструкции». М., Стройиздат, 1967.

Дополнительные литературы.

34. Абдурашидов К.С., Кабулов Ф.Р., Рахманов Б.К. Инженерные проблемы архитектурных памятников. Ташкент. Фан Ан.РУз. 2011. -352 с.
35. Абдурашидов К.С. Колебания и сейсмостойкость промышленных сооружений. Ташкент. Фан. 1989. -96 с.
36. Абрамович К. Г. Экспериментальна исследования оболочки отрицательной гауссовой кривизны на сосредоточенные нагрузки. - «Строительное проектирование промышленных предприятий, 1965, № 5.
37. Арутюнян Н.Х. «Некоторые вопросы теории ползучести». М.-Л., /5(52)
38. Aron H. «Das Gleichgewicht und die Bewegung einer unendlich diinnen belie-big gekriimnten elastischen Schale». Journ. fur reine und angewandte Ma-thematik, Bd. 78, 1874.
39. Вольмир А.С. «Гибкие пластинки и оболочки». М., Гостехиздат, 1956. 419 с.
40. Boyd Robin Engineering of excitement. The Architectural Review, November, 1968.
41. Горенштейн Б.В. Сборно-монолитные железобетонные оболочки покрытий производственных зданий с прямоугольной сеткой колонны.
42. Гольденвейзер А. Л. «Теория упругих тонких оболочек». М, ГТТИ. 1953.-544с.
43. Горенштейн Б.В. «Железобетонный пространственные покрытия». Л..

- Стройиздат, 1976.
44. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелецкий Е.Б. и др. «Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «ЛИРА-Windows». - Киев, изд. «ФАКТ», 1997. - 137 с.
 45. Дишингер Ф. «Оболочки», М., Госстройиздат, 1932.
 46. Дубинский Л. М. Расчет несущей способности покрытий из оболочек типа гиперболического параболоида. — В кн.: Рекомендации по методам расчета оболочек складчатого типа. М., ЦНИИСК им. Кучеренко, 1973.
 47. Dimitrije Dimitrijevic. Yodno numerirko resenje plitke hyperbolicko-paraboloidne Ljuske. Nase cradevinarstvo; 1963, br. 10.
 48. Laird M. HP roof of music school at Edinburg. Architectural Review, 1964, № 8.
 49. Жуковский Э. 3. Сборно-монолитные железобетонные оболочки покрытия зданий. М., Госстройиздат, 1963.
 50. Зенкевич О. «Метод конечных элементов в технике, (пер. с англ.)». Под ред. Б.Е. Победри. М., «Мир», 1975. - 541с.
 51. Joedicke J. Shell architecture. Documents of Modern Architecture edited by Jurgen Joedicke, 1962.
 52. Исследование напряженно-деформированного состояния модели сборно-монолитной составной оболочки на всех стадиях работм вплоть до разрушения.
 53. Ишаков В.И. К расчету пологих оболочек типа гиперболического параболоида.- «Строительная механика и расчета сооружений», 1974, № 1.
 54. KolaT V.t Kratochvil J., Leitner F., ZenlSek A. VypoJet ploSnych a prostorovych konstruka metodou konebnych prvka. PrahS, 1972.
 55. Корнишин М.С. «Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения». М., «Наука», 1964. -192 с.
 56. Колкунов Н. В. «Основы расчета упругих оболочек». М., «Высшая школа», 1972.- 296 с.
 57. Лауль Х. Х., Лейбур М. Х. Практический метод расчета прямоугольных

- в плане железобетонных оболочек вида гиперболического параболоида. Труды Таллинского политехнического института, серия А, № 200, 1963.
- 58.** Лауль Х. Х., Лейбур М. Х. Экспериментальное исследование квадратных в плане железобетонных оболочек вида гиперболического параболоида. Труды Таллинского политехнического института, серия А, №200, 1963.
- 59.** Милейковский И. Е. и др. Метод расчета покрытий из оболочек, очерченных по поверхности гиперболического параболоида. — «Строительное проектирование промышленных предприятий», 1965, № 5.
- 60.** Милейковский И.Е. и др. Расчет оболочек типа гиперболического параболоида (отрицательной гауссовой кривизны) на квадратном плане с прямолинейными краями. — В кн.: Практические методы расчета оболочек и складок покрытий. М.: Стройиздат, 1970.
- 61.** Матниязов Б.И. «Темир бетон гумбазлар. Ўзбекистон Олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги томонидан тавсия қилинган ўқув кўлланма», Тошкент, «Фан ва Технология» нашриёти. 2003. - 156 б.
- 62.** Матниязов Б.И., Бердиев О.Б. «Расчет армированного конического купола с учетом неупругих свойств материала», - Архитектура и строительство Узбекистана. Научно технический журнал. Ташкент. 2005, №2-3-4, с. 51.
- 63.** Муштари Х.М., Галимов К.З. «Нелинейная теория упругих оболочек». Казань, Таткнигоиздат, 1957. - 433 с.
- 64.** Новожилов В.В. «Теория тонких оболочек». 2-е изд. Л., Госсудпромиздат, 1962.-431 с
- 65.** Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. Л., Судпромгиз, 1962. -431с
- 66.** Овечкин А.М. «Расчет железобетонных осесимметричных конструкций (оболочек)». М., Госстройиздат. 1961. -259 с.
- 67.** «Программно-вычислительный комплекс «Ли́ра 9.0» для расчета и проектирования строительных конструкций (ВК «Ли́ра»)). -

- Руководство пользователя в 3 частях. Киев, ШТИАСС, 2002.
- 68.** Пастернак П.Л., Антонов К.К., Дмитриев С.А. и др. «Железобетонных конструкции». М., Госстройиздат, 1961. - 856 с.
- 69.** Прокопович И.Е. «Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояния сооружений». М, Госстройиздат, 1963, -260 с.
- 70.** Прохоров С.В. «Устойчивость железобетонной цилиндрической оболочки под действием неравномерного внешнего давления». - В сб.:
- 71.** Relssner R. On some aspects of the theory of thin elastic shells, Jour. Boston soc. С. Е. 1955.
- 72.** Rivlin R. «Networks of Inextensible Cords». - Nonlinear Problems Engineering. N. J. - London. Asad. Press., 1964.
- 73.** Симпозиум по проблемам взаимосвязи проектирования и возведения оболочек для производственных и общественных зданий с большими пролетами. М., Стройиздат, 1966.
- 74.** Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. «Пластинки и оболочки». М. Физматгиз. 1963.-63 5с
- 75.** Тимашев С.А. «Устойчивость подкрепленных оболочек». М., Стройиздат, 1974.-256с.
- 76.** Toltnhnfu П., Brebbfa С. Finite element techniques in structural mechanics. Southampton University Press. England, 1970. Гостехтеориздат, -323с.
- 77.** Флюгге В. Статика и динамика оболочек. М., Госстройиздат, 1961.
- 78.** Чиненков Ю. В. Работа сборной оболочки над нагрузкой (оболочка в виде гиперболического параболоида размером 18X 18м) — «Бетон и железобетон», 1965, №5.
- 79.** Чиненков Ю.В. Испытания сборной оболочки в виде гиперболического параболоида на прямоугольном плане. — «Промышленное строительство», 1964, №5.
- 80.** Чернина В.С. «Статика тонкостенных оболочек вращения». М., «Наука». 1968.-5 с.

81. Шугаев В.В. Сборные железобетонные лотки-каналы, — М.: Изд-во Колос, 1966.
82. Шугаев В.В., Пятикрестовский К.П., Базаров А.Б. «Исследование складчатого пространственного покрытия на моделях», - Пространственные конструкции зданий и сооружений. 1977, вып. 3, 67-77 с.
83. Штаерман И.Я. «Расчет купола как арки на упругом основании». - Проект и стандарт, № 9, 1933. с. 21-25.
84. Шугаев В.В., Назаров А.Т. Производство тонкостенных железобетонных элементов методом виброгнущего. Гидротехника и мелиорация. - 1965. -№4.
85. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сборно-монолитной оболочки на модели из гиперболических панелей.
- Периодические издания, статистические сборники и отчеты.**
86. Исследования по теории пластин и оболочек, вып. V. Казань, 1967. с. 614-624.
87. Раззаков С.Р., Раззаков Х.С. «Расчет конического купола оболочек с учетом длительности воздействия и деформации опорного контура» - Актуальные проблемы механики контактного взаимодействия. Сборник трудов Республиканской научной конференций. Сам.отд. АН РУЗ., 1997. с. 104-106.
88. Раззаков С.Р., Матниязов Б.И., Бердиев О.Б. «Поведение купола оболочек с учетом предистории нагружения». - Новые конструктивные решения пространственных покрытий и перекрытий зданий и сооружений. Тезисы докладов научной сессии. Москва, 2005, с. 53-54. s
89. Раззаков С.Р., Матниязов Б.И., Бердиев О.Б. «Вопросы оценки эксплуатационного состояния оболочек покрытий с учетом региональных особенностей». Новые конструктивные решения пространственных покрытий и перекрытий зданий и сооружений.

Тезисы докладов научной сессии. Москва, 2005, с. 51-52.

90. Раззаков Ж.С., Хамракулов У.Д., Шамюнов М., Раззаков Н.С. Расчет полигональных оболочек с учетом влияния краевого эффекта. Материалы Международной конференции СамГАСИ «Современные проблемы строительных материалов и конструкций» 2013г.
91. Развитие - методика расчета сочлененной сборно-монолитной гиперболической оболочки с учетом неупругих свойств материала.
92. Расчет сочлененных сборно-монолитных гиперболических оболочек в неупругой стадии, сравнение опытных и расчетных данных, оценка их несущей способности.
93. Разработка предложений по использованию сборно-монолитных гипар оболочек при различных архитектурно-планировочных решениях.

Строительные нормы и правила.

94. КМК 2.01.07-96. Нагрузки и воздействия.
95. КМК 2.01.03.-96. Строительство в сейсмических районах.
96. КМК 2.03.01-96. Бетонные и железобетонные конструкции.
97. КМК 2.03.05-97. Стальные конструкции.
98. КМК 2.03.11-96. Защита строительных конструкций от коррозии.
99. КМК 2.03.10-95. Крыши и кровли
100. КМК 2.08.02-96. Общественные здания и сооружения.
102. ШНК 1.03.01-03 Состав, порядок разработки, согласования и утверждения проектной документации на капитальное строительство предприятий зданий и сооружений.

Интернет сайты

103. www.moо-pk.ru
104. www.iasv.norma.ru
105. www.pravokonst.ru
106. www.stako.ru.
107. www.engstroy.spb.ru
108. www.Lex.uz