

Автореферат диссертации по теме "Теоретические основы проектирования металлических куполов"

РГБ ОД

~ 2 акт 1335

на правах рукописи

Савельев Виталий Алексеевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КУПОЛОВ

Специальность 05.23.01 -Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Москва -1995

Работа выполнена в Центральном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте строительных металлоконструкций им. Н.П.Мельникова (ЦНИИпроектстальконструкция им.Мельникова).

Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт комплексных проблем строительных конструкций и сооружений им. В.А.Кучеренко (ЦНИИСК им.Кучеренко).

Защита состоится ..... 1995 года в 10 часов на заседании

диссертационного совета Д 033.12.01 по специальности 05.23.01 - "Строительные конструкции, здания и сооружения" при ЦНИИпроектстальконструкция им.Мельникова по адресу: 117393, Москва, ул. Архитектора Власова, 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Автореферат разослан ..... 1995 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ЕРМОЛОВ Вадим Владимирович, доктор технических наук, профессор КУДИШИН Юрий Иванович, доктор физ.-мат. наук, профессор МАЛЫЙ Виктор Иванович.

Ведущее предприятие:

кандидат технических наук

Т.С.Волкова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Различным областям народного хозяйства требуются здания с большими пролетами и высотами внутренних помещений. Такие сооружения необходимы для размещения ряда новых производств с частой сменой технологических схем и процессов, а также для сборочных цехов и укрытий крупных технических объектов, таких как: океанские и морские суда, дирижабли, космические аппараты, генераторы импульсного напряжения, радиотелескопы и др. Большие пролеты необходимы также для многих общественных зданий - выставочных павильонов, крытых стадионов, залов собраний. В связи с освоением огромных пространств Сибири и Дальнего Востока в перспективе возникает еще одна важная область применения большепролетных конструкций - создание крытых населенных пунктов в районах с крайне суровыми климатическими условиями.

Использование традиционных плоскостных конструкций для покрытий пролетом 60 - 100 м приводит к повышенному расходу материалов, большим трудозатратам при изготовлении и длительным срокам возведения. Пролеты более 100 м для рамно-балочных конструктивных схем практически недоступны.

Опыт проектирования и строительства показывает, что одной из наиболее рациональных конструктивных форм большепролетных покрытий, наряду с висячими конструкциями, являются металлические купола, особенно сетчатые купола-оболочки. Однако, применяемые конструкции сетчатых куполов недостаточно технологичны в изготовлении и монтаже; кроме того, принципы их геометрического построения и используемые конструктивные решения позволяют создавать лишь простейшие формы поверхности - круговой цилиндр и сферу, что ограничивает возможности поиска оптимальных конструктивных и архитектурно-композиционных решений.

Потребность в большепролетных покрытиях непрерывно возрастает, поэтому создание экономичных, технологичных в изготовлении и монтаже конструкций металлических куполов с различной формой поверхности и очертанием в плане является важной для народного хозяйства проблемой.

Целью работы является разработка новых принципов конструктивного формообразования и совершенствование методов расчета большепролетных купольных покрытий.

Для достижения этой цели:

- выполнен анализ современного состояния проектирования и строительства большепролетных куполов;
- проведено сравнение двух основных конструктивных схем куполов по показателю расхода стали; . <
- разработаны новые методы геометрического формообразования односетчатых и двухсетчатых куполов-оболочек переменной кривизны;
- разработаны и внедрены в практику строительства новые конструктивные решения металлических куполов-оболочек, отличающиеся экономичностью, повышенной технологичностью изготовления и монтажа; 4
- предложены новые методы статического расчета, в том числе, с учетом геометрической и физической нелинейности;
- разработана практическая методика проверки устойчивости куполов;
- выполнено исследование долговечности и надежности сетчатых и ребристо-кольцевых куполов, сечения которых подобраны по нормативной методике;
- предложена методика подбора сечений по критерию равнонадежности стержневых элементов.

Объектом исследования являются металлические купола как конструктивная форма большепролетных покрытий промышленных и гражданских зданий. Результаты исследования могут быть использованы также при создании некоторых других специальных сооружений, например, башенных градирен.

Научная новизна работы заключается в том, что "впервые:

- разработаны методы геометрического формообразования односетчатых и двухсетчатых оболочек, обеспечивающие возможность создания поверхностей переменной положительной и отрицательной гауссовой кривизны;

- разработан интерполяционный метод расчета, позволяющий изучать напряженно-деформированное состояние многоэлементных сетчатых оболочек с любой заданной точностью;
- разработаны теоретические основы учета физической и конструктивной нелинейности при расчете двухпоясных куполов с произвольным законом деформирования стержневых элементов;
- поставлены и решены задачи устойчивости односетчатых сферических оболочек по континуальной и дискретной расчетным схемам с учетом начальных несовершенств формы и неравномерности загрузки;
- предложен критерий оценки нормативной жесткости, обеспечивающий устойчивость куполов;
- методом статистических испытаний получены оценки надежности и долговечности куполов, запроектированных по действующим строительным нормам и правилам.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

- разработаны и использованы в строительстве новые конструктивные решения односетчатых и двухсетчатых куполов с любой формой поверхности и конфигурацией плана при минимальном количестве типоразмеров стержневых элементов и узлов:: деталей;

е разработана методика назначения основных конструктивных параметров;

- обоснована и практически доказана возможность навесной сборки большепролетных сетчатых куполов крупными блоками полной стоительной готовности без вспомогательных опор. Разработана и апробирована практическая методика расчета геометрических параметров монтажных блоков с учетом их деформации во время монтажа, а также методика корректировки геометрических размеров по данным геодезических измерений формы поверхности;
- все разработанные методики геометрического и статического расчета, методики оценки, надежности' и долговечности реализованы в виде программ для ЭВМ и использовались при проектировании реальных сооружений.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

- новые конструктивные решения металлических сетчатых куполов-оболочек;
- результаты сравнительного анализа металлоемкости ребристо-кольцевых и сетчатых куполов;
- методы формообразования односетчатых оболочек с произвольной формой поверхности и очертанием в плане;
- метод геометрического формообразования двухсетчатых оболочек вращения из однотипных пространственных блоков;
- обобщенный подход к расчету геометрических параметров пространственных конструкций, включающий решение задачи моделирования процесса монтажа и оценки на'.-альных несовершенств формы;

» интерполяционный метод расчета, позволяющий изучать напряженно-деформированное состояние больших стержневых систем с необходимой для практики точностью;

- способ регулирования усилий в двухсетчатых куполах при навесной сборке;
- основы методики расчета большепролетных двухпоясных куполов с учетом

конструктивной и физической нелинейности работы стержневых элементов;

- методика проверки устойчивости сетчатых сферических оболочек;
- принцип назначения изгибной жесткости куполов, гарантирующей их устойчивость и оптимальное использование прочностных свойств материала;
- практическая методика оценки надежности и долговечности пространственных конструкций.

Внедрение результатов работы. На основе проведенных исследований под руководством и с участием автора разработаны проекты около двадцати металлических сетчатых куполов различных пролетов и назначения.

Структура диссертационной работы подчинена цели наиболее полно и ясно изложить основные результаты работы. Она включает четыре необходимых и взаимосвязанных между собой направления исследований, а именно:

- анализ существующих и разработка новых конструктивных решений металлических сетчатых куполов (главы 1, 2 и 4);
- исследование методов геометрического формообразования односетчатых и двухсетчатых оболочек с переменной кривизной поверхности (глава 3);

совершенствование методов расчета и изучение напряженно-деформированного состояния в линейной постановке (глава 5), а также с учетом геометрической (глава 6) и физической нелинейности (глава 7);

- сравнительная оценка надежности металлических куполов (глава 8).

Объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав и заключения, изложена на 282 страницах текста, содержит 124 страницы рисунков и 7 таблиц. Список используемых литературных источников включает 283 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, ее значение в решении народнохозяйственных проблем. Излагаются новые положения, внесенные автором в разработку проблемы создания большепролетных металлических покрытий, перечисляются основные результаты работы, которые выносятся на защиту, отмечается их научное значение и практическая ценность. Приводятся сведения о внедрении результатов-исследований. '

Первая глава содержит обобщение и анализ отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства металлических куполов, сформулирована цель, обоснованы задачи исследования.

Принцип построения каркасной пространственной купольной конструкции известен человечеству с древнейших времен. Купола строились из естественного природного материала - древесины. Сталь впервые была использована в 1811 году при сооружении купола, перекрывающего центральную часть зернового рынка в Париже. С тех пор металл является основным конструкционным материалом для куполов.

Широкое распространение металлические купола получили благодаря следующим качествам:

- выпуклая форма поверхности обеспечивает снижение снеговых нагрузок вдвое по сравнению с плоскими покрытиями;
- ветровая нагрузка распределяется равномерно, ее равнодействующая направлена вверх, противоположно вектору гравитационных сил;

- статическая схема рациональна - напряженное состояние от действия основных нагрузок характеризуется относительно равномерным распределением преимущественно осевых усилий в стержневых элементах каркаса;
- купола дают архитекторам возможность создания выразительных пространственных композиций; . \_ ..
- ^ в купольных покрытиях лепсо реализуется принцип совмещения функций несущих и ограждающих конструкций;
- строительная высота купольной конструкции минимальна, перекрываемая площадь и внутренний объем могут быть рационально использованы.

Купола диаметром 15 - 40 м конкурентноспособны с любыми плоскостными конструкциями. При увеличении пролета их преимущества возрастают.

Конструктивные схемы металлических куполов можно разделить на три типа: ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые (рис.1).

На примерах кокрзтных сооружений показано, что до конца девятнадцатого века строились исключительно ребристые купола (рис.1, а). Затем, постепенно они были вытеснены ребристо-кольцевыми (б). С появлением сетчатых схем (в, г, д) начался следующий этап совершенствования конструктивной формы металлических куполов. Первые сооружения появились еще в двадцатые годы, однако массовый характер строительство сетчатых куполов приобрело в послевоенные годы,

Рис.1. Основные геометрические схемы металлических куполов

что связано с развитием вычислительной техники и численных методов расчета пространственных конструкций.

Сетчатый купол является частным случаем сетчатой оболочки. Сетчатая оболочка может иметь произвольную форму поверхности. Сетчатую оболочку называют сетчатым куполом, если ее форма представляет собой выпуклую вверх поверхность, перекрывающую близкую к кругу площадь. В работе используется термин "сетчатая оболочка" в тех случаях, когда результаты исследований полностью справедливы как для сетчатых куполов, так и для более широкого класса конструкций - сетчатых оболочек.

Большой вклад в развитие этой конструктивной формы большепролетных . покрытий внесли Берке, Дю Шато, Клеппель, Ледерер, Линд, Маковский, Маппет, Менгерингхаузен, Пиньеро, Райт, Рюлле, Фуллер, Юнгблют, и др. Вопросам конструктивного формообразования и развитию методов расчета посвящен ряд работ российских ученых: В.В.Ермолова, ААЖуравлева, С.А.Иванова, А.Н.Косолапова, Е.В.Лебеда, И.В.Ломбардо, М.Е.Липницкого, Л.Н.Лубо, Ю.А.Мелагона, И.В.Молева, Р.И.Молевой, Б.Г.Мухина, Г.Н.Павлова, ВЛ.Посяникова, ГА.Пше-ничного, Б .А.Сперанского, В.Д.Таирова, М.С.Туполева, В.И.Тура, Р.И.Хисамова и др.

Металлическими сетчатыми куполами перекрыты самые большие однопро-летные здания в мире. Достигнутый уровень распространения характеризуется "следующими цифрами: построены тысячи сооружений с сетчатыми покрытиями пролетом до 60 метров, сотни - пролетом от 60 до 100 метров и десятки - 100 и более метров. Покрытия пролетом до 100 м проектируются, как правило, односет-чатыми (однопоясными), свыше 100 м - двухсетчаггыми (двухпоясными). Максимальный пролет - 265.5 м имеет купол крыггого стадиона в Г.Детройт (США).

Монтаж, куполов в основном производится поэлементно с использованием вспомогательных лесов и подмостей. Отдельные сооружения смонтированы навесным методом.



Обращено внимание на то, что подавляющее большинство металлических куполов, особенно при пролетах более 100 м, очерчены по сферической поверхности; методы геометрического формообразования оболочек с переменной кривизной поверхности не разработаны. -

Отмечена излюбительная трудность решения задачи узлового соединения элементов сетчатых оболочек. Она объясняется тем, что в сетчатых оболочках в отличие от плоскостных систем оси стержневых элементов не только не лежат в одной плоскости, но в каждом из узлов имеют различные комбинации взаимного расположения в пространстве. Это существенно усложняет выполнение несущих и ограждающих элементов и, кроме того, приводит к увеличению количества их типоразмеров; поэтому изготовление многих конструкций сетчатых куполов, получивших распространение за рубежом; производилось с применением специального оборудования, которое отсутствует на отечественных заводах строительных металлоконструкций.

В заключение главы сформулированы основные задачи исследования. Сделан вывод о том, что для успешного внедрения металлических куполов в практику строительства, необходимо разработать такие конструктивные решения, которые позволяют организовать их изготовление на существующих заводах металлоконструкций. Конструктивные решения двухпоясных куполов должны обеспечивать возможность их навесного монтажа крупными блоками полной строительной готовности. Необходимо разработать методы геометрического формообразования сетчатых оболочек с переменной кривизной поверхности, что не только расширяет архитектурно-композиционные возможности покрытий, но и позволяет создавать внешне безраспорные системы с эффективным включением в работу каркаса мембранных ограждающих поверхностей. Использование этих методов не должно приводить к увеличению количества типоразмеров элементов. Важной задачей является совершенствование методов расчета как в линейной, так и в геометрически- и физически нелинейной постановке. Большое значение имеет исследование возможности перераспределения и регулирования усилий с учетом "нелинейных характеристик деформирования стержневых элементов и соединений. Авария большепролетного купола в г. Истра показала необходимость разработки методов оценки надежности и долговечности куполов.

Во второй главе приведены результаты сравнительного анализа показателей расхода стали куполов полусферического очертания в широком диапазоне пролетов и нагрузок, запроектированных по двум схемам - ребристо-кольцевой (со связями через сектор) и сетчатой (звездчатой).

С конструктивной точки зрения ребристые и ребристо-кольцевые купола мало чем отличаются друг от друга. Кольцевые элементы присутствуют в обеих конструкциях. Разница заключается в том, что в ребристо-кольцевых куполах кольца наряду с ребрами являются элементами основного несущего каркаса, воспринимая продольные усилия. В ребристых же куполах горизонтальные кольца являются всего лишь вспомогательными элементами - кровельными прогонами, поэтому они должны быть присоединены к ребрам таким образом, чтобы передавать только вертикальную реакцию, не ограничивая свободу перемещения ребра в радиальном направлении. Но, кроме того, прогоны должны выполнять функции

распорок, соединяющих ребра со связями, и тем самым обеспечивать их устойчивость из плоскости. Конструктивно совместить выполнение этих условий затруднительно, поэтому, как только появились расчетные методы достоверной оценки степени включения кольцевых элементов в работу каркаса, ребристые купола уступили в практике строительства место ребристо-кольцевым. Можно

определенно утверждать, что ребристо-кольцевая схема как по металлоемкости, так и по показателям технологичности изготовления и монтажа предпочтительнее ребристой.

Преимущество же сетчатых куполов перед ребристо-кольцевыми не столь очевидно. Сетчатые купола, являясь пространственными фермами, хорошо воспринимают несимметричные нагрузки и обладают повышенной жесткостью и устойчивостью. Вместе с тем, они более многодельны, чем ребристо-кольцевые, так как имеют большее число стержневых элементов и более сложные узловые соединения.

Для выполнения сравнительного анализа эффективности двух расчетных схем была разработана программа DOM, которая автоматизирует нормативную методику подбора сечений пространственной стержневой системы. В качестве основной расчетной модели был принят полусферический купол диаметром 130 м с каркасом из сквозных стержней в виде ферм с параллельными поясами высотой 1500 мм и треугольной решеткой. Расчетная длина панели пояса равна 1700 мм. Принято, что пояса и решетка ферм komponуются из прокатных равнополочных стальных уголков любого сечения. В обеих схемах узлы расположены по меридиану с угловым шагом ( $\rho = \pi/24$  и в окружном направлении - с шагом  $\theta = \pi/18$  (рис.2).

Сравнение результатов расчета для всех возможных комбинаций интенсивности снеговой и ветровой нагрузок для диаметров от 80 до 200 м показало, что металлоемкость сетчатых куполов практически не зависит от величины нормативной ветровой нагрузки, тогда как расход стали ребристо-кольцевых куполов возрастает на 15 - 40% с ее увеличением; во всем диапазоне нагрузок и пролетов сетчатые купола имеют меньший расход стали, чем ребристо-кольцевые, причем, при малых величинах скоростного напора ветра (230-380 Па) разница показателей незначительна, но быстро растет с его увеличением (рис.3).

Третья глава посвящена разработке методов геометрического формообразования односетчатых и двухсетчатых оболочек.

Рис.2. Ребристо-кольцевая (а) и звездчатая (б) схемы , полусферического купола  
= 850 Па

нормативная снеговая нагрузка  $B_0 = 1000$  Па

80 60 100 110 120 130 140 150 160 170 180 180 200 диаметр купола (м)

Рис.3. Расход стали на 1 м<sup>2</sup> поверхности полусферического купола

- - ребристо-кольцевая схема,----- сетчатая схема

Рис.4. -Три типа сетей с равносторонними ячейками

Геометрическое формообразование - построение геометрической схемы конструкции - является важнейшей составной частью проблемы создания конструктивной формы металлических куполов.

Вычисление геометрических параметров осесимметричных ребристых и ребристо-кольцевых куполов является тривиальной задачей, которая сводится к построению осевой линии меридиана. Минимальное количество типоразмеров стержневых элементов достигается, если в качестве меридиана принять дугу окружности, а узловые точки расположить на равных расстояниях друг от друга. Если центр окружности лежит на оси купола, то все узлы будут расположены на сферической поверхности.

Для односетчатых оболочек на основе теории симметрии плоских орнаментов

разработан новый метод построения сетей с ромбическими и равносторонними шестиугольными ячейками, главная особенность которого состоит в том, что он может быть использован не только для поверхностей вращения, но и для поверхностей произвольной формы, как гладких, так и составных. Доказано существование трех типов таких сетей (рис.4). Отмечается, что этот метод дает возможность создавать геометрические схемы, в которых две трети стержней имеют равные длины, а остальные стержни незначительно отличаются по длине друг от друга. ■ Максимальные отклонения углов между стержнями от среднего положения не превышают  $7^\circ$  - в касательной плоскости и  $1^\circ$  - в радиальной. Использование метода в сочетании с конструктивным решением каркаса из алюминиевых прессованных профилей дает решение задачи проектирования односетчатых оболочек любой формы и очертания в плане из ограниченного набора унифицированных стержневых элементов и узловых деталей. Сделан вывод о том, что для пологих покрытий наиболее рациональны сетчатые поверхности с ромбическими ячейками, являющиеся дискретным аналогом правильных сетей Чебышева. Предложены три комбинированные схемы сетчатых оболочек, в основе которых лежат сети с равносторонними четырехугольными ячейками ( а.с: №Na 196272, 594271, 706510).

Известно, что при изгибании сплошных, поверхностей их гауссова кривизна остается постоянной. В работе показано, что любая незамкнутая сетчатая поверхность также может быть трансформирована без изменения длин стержней и углов между соседними стержнями. На основе использования этого свойства разработан второй метод геометрического формообразования односетчатых оболочек -метод изометрического преобразования и доказано, что с его помощью из простейших форм поверхностей может быть получено бесконечное множество разнообразных форм без увеличения количества типоразмеров конструктивных элементов.

При решении задач геометрического расчета односетчатых оболочек использована простейшая математическая модель стержня - отрезок прямой линии. Для двухсетчатых оболочек математическая модель стержневого элемента предлагается в виде неравных отрезков прямых. В общем случае эти отрезки не параллельны и не лежат в одной плоскости. Доказано, что произвольную двухсетчатую поверхность невозможно построить из равносторонних шестиугольных ячеек. Исключение составляет сферическая поверхность. Однако, существует решение обратной задачи - из однотипных пространственных элементов шестиугольной или ромбической формы могут быть образованы двухсетчатые поверхности вращения переменной как положительной, так и отрицательной гауссовой кривизны. Частными случаями являются поверхности постоянной кривизны - сферическая, цилиндрическая и псевдосферическая.

В работе исследованы закономерности изменения характеристик локальной кривизны ромбической ячейки в зависимости от двух основных геометрических параметров: первый характеризует разницу в длинах поясов, второй - угол закручивания грани стержневого элемента.

Разработанный метод геометрического формообразования дает возможность учитывать перемещения края монтируемой конструкции при навесной сборке и обеспечить образование строительного, подъема без увеличения количества типоразмеров стержней.

Решение подавляющего большинства задач геометрического расчета невозможно без применения вычислительной техники. Для возможности быстрого и оперативного решения разнообразных-геометрических задач, в том числе задач геометрического



формообразования разработан протрамный комплекс СЕСОИ. Установлено, что любая задача геометрического расчета может быть сведена к некоторой последовательности вычисления координат характерных точек, каждую из которых можно представить как след пересечения трех поверхностей.

Металлические купола, также как и любые другие строительные конструкции, не могут быть изготовлены и смонтированы абсолютно точно. В результате влияния различных случайных факторов, прежде всего, отклонений в размерах стержневых элементов, форма поверхности реальной конструкции всегда отличается от проектной. Величина отклонения узлов от номинального положения характеризует уровень точности возведения сооружения, от которого зависит его стоимость и надежность. Изготовление конструкций с низкой точностью приводит к необходимости выполнения большого объема дополнительных подгоночных работ при монтаже и снижает несущую способность сооружения. С другой стороны, повышение точности сопровождается увеличением трудоемкости изготовления.

Программный комплекс GECON позволяет осуществлять моделирование процесса изготовления и монтажа с учетом случайных отклонений длин элементов от номинальных размеров и на основе статистического анализа величин отклонений узлов от проектного положения прогнозировать вероятные значения начальных несовершенств формы сооружения. Вероятностная оценка начальных отклонений узлов является одной из важнейших задач геометрического расчета. Для куполов эта задача особенно важна потому, что их общая устойчивость непосредственно зависит от величины начальных отклонений узлов.

В процессе монтажа большепролетных куполов навесным способом случайные отклонения узлов от проектного положения могут быть измерены геодезическими средствами после окончания сборки очередного яруса. Конструктивным приемом, позволяющим полностью или частично компенсировать ошибки изготовления и монтажа, является установка прокладок в плоскостях контакта монтируемого блока с уже смонтированной частью конструкции. Разработана методика назначения толщин прокладок и реализована в программе DELTA.

В четвертой главе обоснованы основные положения по разработке эффективных конструктивных решений металлических сетчатых оболочек.

В понятие эффективности вкладывается:

- меньшая металлоемкость по сравнению с традиционными плоскостными конструкциями;
- технологичность изготовления, заключающаяся в максимальной унификации сборных элементов;
- простота и малая трудоемкость сборки, отсутствие монтажной сварки.

-Отмечается, что при традиционном подходе к проектированию сетчатых куполов каждый стержневой элемент и каждая узловая деталь выполняются в строгом соответствии с выбранной геометрической схемой. Количество типоразмеров сборных элементов однозначно определяется числом различных геометрических размеров. Поскольку сетчатые купола двоякой кривизны принципиально невозможно создать из элементов с одинаковыми размерами, с целью сокращения числа различных элементов применяются исключительно циклически симметричные схемы на основе поверхностей вращения. Однако, и в этом случае количество типоразмеров сборных элементов достаточно велико, что снижает технологичность изготовления сетчатых куполов по сравнению, например, с перекрестно-стержневыми конструкциями.

Чтобы получить возможность создания сетчатых куполов с различной формой поверхности, в работе предложен новый подход к их проектированию, заключающийся в том, что конструктивное выполнение сборных элементов должно обеспечивать возможность их использования не только при конкретных геометрических размерах, но и при отклонении этих размеров на определенную достаточно малую величину.

Отмечается, что такой подход наиболее эффективен для односетчатых куполов массового применения, для которых задача унификации узловых деталей имеет решающее значение. Однако его использование возможно лишь при использовании специальных методов геометрического формообразования, которые позволяют минимизировать не количество различных геометрических размеров, а разброс их величин и создавать схемы, в которых длины стержней и углы между ними незначительно отличаются друг от друга.. Показано, что малые отклонения геометрических размеров могут быть компенсированы за счет использования таких конструктивных приемов, как: упругая деформация стержней открытого профиля, пластический отгиб фасонки узловых деталей, сдвиг контактных плоскостей фрикционных соединений в пределах разницы диаметров болтов и отверстий под болты, установка калиброванных прокладок в местах передачи сжимающих усилий через фрезерованные торцы, изменение ширины нахлеста кровельных листов и ЛР-

Новый подход был реализован для покрытий пролетом от 20 до 60 м. Автором предложена конструкция каркасно-обшивной алюминиевой сетчатой оболочки (а.с. №№ .574509, 657139, 894110), основная идея которой заключается в том, что для изготовления узловой детали, соединяющей концы шести стержней каркаса, используется специальный алюминиевый профиль в виде звезды с шестью лучами. Благодаря особой конфигурации сечения каждый луч узловой детали легко может быть отогнут из плоскости в пределах  $+7^\circ$ . Средний угол наклона стержня к оси узла в радиальной плоскости обеспечивается проектной разметкой отверстий в стержнях под высокопрочные болты, а возможные отклонения углов от среднего значения в каждом из узлов компенсируются за счет расчетного люфта в одном из двух болтовых соединений (рис.5). При монтаже до завершения сборки всего каркаса болты не затягивают, и только после того, как все элементы установлены и конструкция приняла заданную геометрическую форму, производится контролируемое натяжение болтов. Поверх стержней каркаса укладываются алюминиевые листы толщиной 0.8...1.2 мм, являющиеся кровельным

Рис.5. Конструктивное решение узлового соединения стержней

сетчатых куполов из алюминиевых прессованных профилей

Рис.6. Схемы монтажных узлов

покрытием. Листы соединяются внахлест и крепятся к стержням каркаса с помощью прижимных реек таврового профиля. Водонепроницаемость покрытия обеспечивается размещением между листами по линиям нахлеста тонкого слоя герметика. К внутренней поверхности каркаса крепятся декоративные панели подвесного акустического потолка, выполняющие также функцию теплоизоляции и огнезащиты.

Отмечается, что предложенное конструктивное решение дает возможность создавать сетчатые оболочки с произвольной формой поверхности при максимальной унификации сборных элементов. Гибкость и универсальность решения, возможность создания оригинальных сооружений по индивидуальным проектам из ограниченного сортамента сборных элементов обеспечивается благодаря использованию принципа поэлементной сборки. Поскольку масса каждого

из элементов не превышает 10 кг, сборка может производиться вручную, без грузоподъемных механизмов.

Снижения трудоемкости работ на монтаже можно достичь при использовании панельных решений односетчатых куполов. Для образования панели каждый стержень каркаса разрезается на две половины плоскостью симметрии, проходящей через его продольную ось. Половины стержней объединяются в замкнутый рамный каркас, к которому крепятся наружная и внутренняя обшивки. Простой конструктивный прием (а.с. № 531909), позволяет изготовить такие ячейки из прямолинейных швеллеров. Он заключается в том, что в полках швеллера с шагом, равным приблизительно длине стержня, выполняются парные прорезы, благодаря которым швеллер легко сгибается в четырехугольную или шестиугольную раму. Изменением расстояния между прорезями можно регулировать локальные характеристики кривизны панелей. Плоские стальные листы толщиной 0.6...1.0 мм привариваются в кондусторах к наружным полкам рам. Они фиксируют форму панели и обеспечивают восприятие усилий, направленных по диагоналям между узлами. Изгибная жесткость панелей может быть существенно увеличена за счет установки полосовых диагоналей по внутренним полкам. Панели соединяются между собой на болтах. Узловые детали отсутствуют.

Приведено также другое, еще более простое конструктивное решение панели для легких сетчатых куполов в форме равнобедренного треугольника. Каркас выполняется из тугого уголкового профиля. Уголки свариваются в углах треугольными фасовками. На расстоянии четверти длины стержня установлены распорки из того же профиля. И узловые фасонки и распорки привариваются к вертикальным полкам уголков линейными швами в плоскости, проходящей через центр тяжести сечения. К каркасу точечной сваркой приваривается плоский стальной лист. Из "та-

ких панелей на болтах могут собираться купольные конструкции различной кривизны. Плоскости угловых профилей совмещаются при затяжке болтов за счет пластического изгиба узловых фасонки и полок распорок в зоне сварных швов.

Установлено, что для покрытий пролетом свыше 100 м определяющим показателем эффективности является снижение трудоемкости монтажных работ. Наиболее рациональным методом сооружения большепролетных покрытий является их навесная сборка из крупных блоков полной строительной готовности, включающих элементы как несущих, так и ограждающих конструкций, без применения подмостей или каких-либо поддерживающих конструкций. При этом отмечается, что такой способ производства работ при монтаже требует увеличения изгибной жесткости оболочки и перехода к двухсетчатым поверхностям. Далее приведены результаты разработки и исследования двух типов монтажных боков: четырехугольного и шестиугольного (а.с. №№ 590414, 920150, 103В455) (рис.6) . Каждый блок имеет каркас из стержневых элементов в виде ферм с параллельными поясами, наружную мембранную обшивку и панели подвесного потолка. Показано, что шестиугольные блоки дают возможность осуществить симметричное нагружение конструкции. Кроме того, такое решение позволяет избежать спаренной решетки в фермах. Разъемное узловое соединение стержневых элементов каркаса (а.с. № 765476) приведено на рис.7. Пояса стержней кольцевого направления соединяются между собой сквозной почти плоской фасонкой. Узловые детали, к которым крепятся пояса стержней двух других направлений, имеют симметричную V - образную форму с плоско-фрезерованными торцами. Все три узловые детали соединяются болтами. Показано, что, поскольку осесимметричная оболочка по направлению меридиана имеет только сжимающие усилия, разъемный узел имеет такую-же несущую способность, как и узел с цельной узловой деталью тех же геометрических размеров. Мембрана,

которая приваривается к наружным поясам, выполняет, в основном, ограждающие функции. Она воспринимает местные ветровые и снеговые нагрузки в пределах треугольной ячейки и одновременно развязывает верхний пояс от потери устойчивости. Доказано, что в зоне растягивающих усилий в кольцевых элементах каркаса мембрана может быть эффективно включена в работу.

Далее излагаются основные результаты теоретических и экспериментальных исследований узловых уединений, которые позволили установить, что узловые эксцентриситеты незначительно снижают несущую способность стержней. В этой же главе приведены описания основных сооружений, в которых были использованы результаты работы. Автор принимал непосредственное участие в их про-

Рис.7. Разъемное узловое соединение поясов двухсетчатого купола

ектировании, а также в осуществлении технического надзора за изготовлением и монтажом конструкций.

Изготовление односетчатых куполов из алюминиевых прессованных профилей было освоено в 1974 году на заводе алюминиевых конструкций производственного объединения "Мосметаллоконструкция" в г. Видное Московской области. По проекту, разработанному под руководством автора, на территории завода был построен первый экспериментальный сетчатый купол диаметром 21 м и высотой 7.3 м. В 1975 году по этому же проекту был сооружен выставочный павильон строительного раздела Выставки достижений народного хозяйства (на Фрунзенской набережной).

Два алюминиевых стчатых купола применены в проекте здания лаборатории "Искусственный небосвод" Научно-исследовательского института строительной физики. Здание введено в эксплуатацию в 1981 году.

Примером возможности создания оболочки сложной геометрической формы является покрытие водно-оздоровительного корпуса пансионата "Березки" Госстроя СССР. Оболочка состоит из одинаковых симметричных секторов и опирается на шесть стоек, расположенных по окружности диаметром 40 м. Высота в центре равна 11.7 м. Строительство закончено в 1983 году.

Кроме того, запроектированы и построены: покрытие музея ракетных войск под Москвой, здание пионерлагеря в г. Евпатория, корпус столовой пансионата на мысе Форос в Крыму, и др. . . . .

С использованием панелей с мембранной обшивкой в 1978 году построен павильон для испытания электротехнического оборудования в виде сферического купола диаметром 32 м и высотой 19 м, а также купол главного собора НовоИерусалимского монастыря при реконструкции в 1980 г.

Пятая глава посвящена исследованию точности приближенных методов статического расчета куполов. Отмечается, что несмотря на быстрое развитие вычислительной техники и совершенствование программ, позволяющих выполнять анализ напряженно-деформированного состояния многоэлементных конструкций точными методами, приближенные методы расчета не утратили своего значения. Благодаря простоте, гибкости они весьма эффективны на ранних этапах проектирования. Их точность оказывается вполне достаточной для оценки усилий. и предварительного подбора сечений стержней при сравнении вариантов, общей компоновке сооружения, выборе наиболее рациональных размеров и пропорций.

Метод сплошного аналога заключается в том, что усилия в сетчатой оболочке приближенно могут быть определены через напряжения сплошной оболочки той же геометрической формы. Выведены расчетные формулы этого метода для сетчатой оболочки с треугольными ячейками.

Выполнены исследования точности метода дискретного аналога применительно к пологой шестиугольной в плане сферической оболочке. Существо метода заключается в возможности использования расчета сетчатой оболочки с конкретной геометрической схемой для определения усилий в другой оболочке с аналогичными условиями опирания и загрузки, но имеющей более редкую или более частую стержневую сеть. Установлено, что точность вычисления усилий в среднем по всем стержням достаточно высока (не превышает 6%), что позволяет рекомендовать метод дискретного аналога для решения задач оптимального проектирования, где результатом расчета являются интегральные показатели массы и стоимости. Он может быть успешно использован также для приближенного расчета конструкций на стадиях эскизного проектирования и сравнения вариантов.

Для сетчатых оболочек характерно плавное деформирование их срединных поверхностей под нагрузкой. На использовании этой закономерности построен приближенный метод расчета, заключающийся в том, что система уравнений метода перемещений составляется не для всех, а лишь для части узлов системы - основных узлов, а перемещения остальных - второстепенных узлов  $A_i$  - выражаются через перемещения основных  $b_k$  по формуле

$$D_i = \dots (1)$$

где:  $C(k)$  - интерполяционные коэффициенты;

$t$  - число основных узлов.

Коэффициенты сокращенной системы уравнений метода перемещений  $r_{ij}$  и  $r_{kP}$  выражаются через коэффициенты полной системы  $\Gamma_{ij}$  и  $\Gamma_{kP}$  по формулам: "

$$\{\Gamma\} = 220 \cdot 10^{-1} \dots; \{r\} = E \cdot S \cdot \Gamma \quad (2)$$

Оценка точности вычисления перемещений доказала, что тридцатипроцентное уменьшение количества основных узлов приводит к погрешностям в пределах 5% от точного расчета. Вполне приемлемую точность порядка 10% дает уменьшение количества основных узлов системы вдвое. Однако наилучшие результаты могут быть достигнуты при сгущении сети основных узлов в наиболее ответственных местах расчетной схемы.

В шестой главе рассмотрена проблема устойчивости сетчатых сферических куполов.

Показано, что для проверки устойчивости сетчатых оболочек обычно используется методика, принятая в теории сплошных оболочек.

Критическая нагрузка вычисляется по формуле:

$$4 \cdot U_3 \cdot E \cdot U$$

полученной эквивалентным переходом из известной формулы Цолли. В этой формуле:

$l$  - длина стержня,  $A$  - площадь сечения,  $I$  - радиус инерции сечения,  $E$  - модуль упругости материала,  $R$  - радиус кривизны.

Отношение расчетной нагрузки к верхней критической  $q$  не должно превышать некоторого нормативного значения  $\eta$ :

$$q / q_{cr} = \eta < \eta_{\text{норм}} \quad (4)$$

Величину  $\eta$  обычно рекомендуется принимать в пределах от 0.12 до 0.33.

Если условие (4) удовлетворяется, общая устойчивость считается обеспеченной. Локальная устойчивость, т.е. устойчивость отдельных стержней, проверяется независимо, исходя из того, что узлы несмещаемы.



Показано, что такое механическое перенесение методики проверки устойчивости сплошных оболочек на сетчатые неправомерно. Принципиальное отличие сплошной оболочки от сетчатой заключается в том, что в сплошных оболочках и изгибная жесткость и площадь сечения определяются одним параметром - толщиной. Повышения критической нагрузки можно добиться увеличением толщины, но одновременно при этом происходит снижение расчетного напряжения. Поэтому сплошные оболочки относительно тонкостенны; критические напряжения существенно меньше предела текучести и потеря устойчивости происходит в упругой стадии работы материала. Напротив, критическая нагрузка сетчатых оболочек может быть повышена только за счет развития сечений в радиальной плоскости без увеличения площади сечения. Это дает возможность обеспечить высокий уровень напряжения, близкий к пределу текучести, поэтому потеря устойчивости сетчатых оболочек всегда связана с развитием пластических деформаций.

Для решения задачи устойчивости сетчатых оболочек с жесткими узлами в работе использован критерий краевой текучести, а диаграмма работы материала аппроксимирована диаграммой Прандтля. , , Получено общее выражение для коэффициента снижения осевого напряжения

$\lambda/2\pi \cdot 3\sqrt{18} \cdot 9\sqrt{\dots}$

где:  $\lambda$  - отношение величин расчетной нагрузки и верхней критической, которая вычисляется по формуле (3);

$\lambda$ ,  $\lambda$ ,  $\lambda$  - относительные параметры упругого и начального прогибов, равные отношению абсолютных значений прогибов, к радиусу инерции сечения  $I$ ,

$\lambda$  - расстояние от центра тяжести сечения до наружной его грани.

График зависимости (5) для двухсетчатой оболочки при  $2\lambda = 1$  показан на рис.8. Каждая кривая графика соответствует определенной величине параметра начальных отклонений формы и отделяет область устойчивых равновесных состояний от области неустойчивых. Пунктирная линия обозначает границу зоны ■ упругой работы. На основе анализа графика показано, что при подборе сечений элементов сетчатых оболочек осевые напряжения, вычисленные на основе линейного расчета, не должны превышать расчетного сопротивления материала, умноженного на понижающий коэффициент  $\gamma < 1$ , который является аналогом коэффициента ( $\gamma$  продольного изгиба стержней).

Показано, что по существующей методике фактические линии, отделяющие устойчивую область от неустойчивой, вертикальны. Поэтому устойчивой зоной объявляется обширная область неустойчивых равновесных состояний. Именно к этой области относятся конструкции, запроектированные наиболее экономично. При этом необходимо учитывать, что представление сетчатой оболочки в виде эквивалентной сплошной справедливо лишь в том случае, когда длина стержня значительно меньше радиуса зоны выпучивания, т.е. для случая густой сети.

С использованием известного решения задачи о продольном изгибе бесконечно длинного стержня на упруго-податливых опорах получено общее выражение для верхней критической нагрузки при различных значениях параметра относительной длины стержня  $\lambda = M \cdot \lambda / I$  (рис.9).

Большие деформации односетчатых сферических оболочек с шарнирными узлами исследованы на основе дискретной модели с двумя степенями свободы в

Диаграммы  $V/\lambda$  -  $\lambda$  для двухсетчатой сферической оболочки

1 о.ч •в-

1.0 2.0 3.0 4.0

относительная длина стержня  $\zeta = l / l_0$

Рис.9. Зависимость критической нагрузки от относительной длины стержня

условиях симметричного нагружения и деформации. . Использовано обычное в теории пологих оболочек допущение, суть которого заключается в том, что внутренняя геометрия срединной поверхности независимо от ее гауссовой кривизны может быть принята на некотором участке такой же, как геометрия на плоскости.

На основе этой расчетной схемы выполнен анализ диаграмм равновесных состояний при различных комбинациях нервномерности нагружения узлов и начальных несовершенств формы. Выявлены вторичные бифуркационные точки, связанные со скачкообразным изменением характера деформирования и возникновением кососимметричных форм потери устойчивости. Было подтверждено высказанное А.С.Вольмиром ("Устойчивость деформируемых систем". Наука, 1965, стр.184) предположение о том, что путем создания искусственных начальных отклонений узлов от идеальной сферической формы в направлении, соответствующем предполагаемому выпучиванию или противоположном, может быть достигнуто существенное увеличение критических нагрузок. Разработана методика, позволяющая производить проверку устойчивости шарнирно-стержневых оболочек с учетом как начальных отклонений узлов, так и погибей стержней.

Главной особенностью поведения сжатых стержневых систем при больших перемещениях является неоднозначность решений. При двух степенях свободы и одном варьируемом параметре перемещения установлена возможность возникновения одновременно трех форм равновесных состояний. Отмечено, что при переводе к расчетной схеме реальной конструкции и увеличении количества независимых параметров в десятки и сотни раз анализ форм равновесия систем значительно усложняется. Сделан вывод о том, что при реальном проектировании ориентация на использование более тонких методов и более сложных программ нецелесообразна. Практическое решение задачи заключается в конструировании сетчатых оболочек такой относительной толщины, которая заведомо гарантирует достаточно высокий уровень критических нагрузок по отношению к расчетным. Надежным критерием является близость фактической зависимости "нагрузка - перемещение" к линейной. Выход из области существенной нелинейности в область почти линейной работы позволяет применять итерационные алгоритмы последовательной линеаризации системы с использованием существующих программ, таких как РАСК, ПАРСЕК, ФЕНИКС, СПРУТ и др.

Были рассмотрены три варианта организации итерационного процесса, осуществляющего коррекцию расчетной схемы. По аналогии с известными методами решения дифференциальных уравнений они названы - шаговый, Ньютона и Ньютона-Канторовича. Сравнительная эффективность алгоритмов по числу итераций была исследована на примере • пологого сетчатого купола с треугольными ячейка-

ми, нагруженного сосредоточенной силой в вершине. Установлено, что наилучшей сходимостью обладает метод Ньютона. После трех итераций узловые невязки составляют менее 1% от расчетной нагрузки. •

Показано, что в большинстве случаев можно обойтись без организации численных итерационных процессов. Рекомендована практическая методика расчета куполов, которая заключается в том, что после выполнения линейного расчета должны быть вычислены узловые реакции и проанализированы их величины. Если сумма вертикальных реакций отличается не более, чем на 5% от равнодействующей

узловых нагрузок и невязка в каждом из узлов не превышает 30%, то расчет может считаться достоверным. В противном случае следует увеличить изгибную жесткость стержневых элементов в радиальной плоскости и повторить проверку. Отмечено, что такой подход к проектированию куполов не только обеспечивает существенное упрощение расчета, но и гарантирует минимальную материалоемкость конструкции.

В седьмой главе рассмотрены вопросы расчета сетчатых оболочек с учетом физической и конструктивной нелинейности работы стержневых элементов каркаса и их соединений.

Одной из важных задач реального проектирования большепролетных покрытий является задача регулирования усилий. Эта задача возникает в том случае, если путем перераспределения усилий между элементами могут быть получены более благоприятные условия для их восприятия, что в конечном итоге приведет к снижению расхода материалов. Эффективным приемом пассивного регулирования напряженного состояния статически неопределимых систем является включение в конструкцию отдельных стержневых элементов и соединений с нелинейной жесткостной характеристикой. Типичным элементом с нелинейной зависимостью деформации от усилия является соединение на высокопрочных болтах. Для узловых соединений, передающих сжимающее усилие непосредственно через фрезерованные торцы, нелинейная характеристика жесткости может быть получена путем установки прокладок, суммарная площадь которых меньше площади торца. Пока напряжения в прокладке меньше предела пропорциональности, такое соединение работает упруго. Начиная с некоторого уровня напряжений, материал прокладки начинает пластически деформироваться, а зазор между торцами<sup>А</sup> закрывается. разработана методика, которая позволяет расчетным путем назначать толщины<sup>А</sup> прокладок, и величины люфтов, для того, чтобы обеспечить требуемое перераспределение усилий между поясами двухъярусного купола.

Отмечено, что большинство строительных металлических конструкций представляет собой статически определимые системы с последовательной работой

элементов, в которых достижение предельного состояния любым из них приводит к предельному состоянию системы в целом. В многосвязных статически неопределимых системах осуществляется параллельная работа стержней. К таким системам относятся, например, структурные конструкции типа стержневых плит. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в ЦНИИСК им.Кучеренко, в центрально растянутых стержнях средней зоны структурных плит может быть допущено развитие пластических деформаций, а в сжатых стержнях - их упругая работа. В еще большей степени свойством приспособляемости и саморегулирования усилий обладают двухъярусные металлические купола, схемы которых остаются геометрически неизменяемыми при удалении любого из их стержневых элементов.

На основе рассмотрения конечного элемента в виде фермы с параллельными поясами и треугольной решеткой получено общее решение, устанавливающее зависимость узловых реакций от перемещений по концам фермы для произвольного очертания диаграммы растяжения-сжатия поясов.

Исследование работы конструкции в упруго-пластической стадии с использованием итерационного алгоритма пошагового нагружения позволяет выявить резервы ее несущей способности.

В восьмой главе дан анализ современного состояния норм проектирования металлических конструкций и приведены результаты сравнительной оценки надежности двух схем металлических куполов: ребристо-кольцевой и сетчатой.

В настоящее время является общепризнанным, что поведение реальной конструкции обусловлено взаимодействием многих случайных факторов, поэтому обоснованный подход к определению надежности и долговечности конструкций возможен только с позиций вероятностных методов. В современной трактовке под надежностью строительных конструкций понимается способность сохранять эксплуатационные качества в заданных пределах в течение определенного времени. Мерой надежности является вероятность безотказной работы, которая может принимать любые значения в пределах от нуля до единицы. Применительно к строительным конструкциям отказ трактуется как событие, после которого невозможна нормальная эксплуатация здания или сооружения без проведения соответствующих ремонтных или восстановительных работ. Отказы вызваны влиянием случайных факторов, которые либо были заложены в систему при ее изготовлении и возведении, либо возникли и воздействуют на нее в процессе эксплуатации.'

Трактовка отказа как случайного события во времени является основной предпосылкой построения теории надежности. Наиболее полную информацию о поведении системы во времени содержит функция надежности, которая определяет вероятность безотказной работы в любой момент времени.

Для построения функции надежности металлических куполов в работе использован метод статистических испытаний (Монте-Карло), который обладает целым рядом особенностей, выгодно отличающим его от других известных в настоящее время вычислительных методов: наглядная вероятностная трактовка, применимость к исследованию систем принципиально любой сложности, простая вычислительная схема, возможность оценки точности получаемых результатов, малая чувствительность к отдельным ошибкам, отсутствие накопления ошибок, малая связность статистических алгоритмов. Метод статистических испытаний наиболее перспективен для исследования таких реальных процессов, аналитическое исследование которых либо чрезвычайно громоздко, либо вообще невозможно. Единственным существенным недостатком метода Монте-Карло является большой объем вычислений и, следовательно, большой расход процессорного времени ЭВМ. Однако, вычислительная техника развивается настолько быстрыми темпами, что ситуация в последние годы изменилась кардинальным образом. В настоящее время исследование надежности сложных строительных конструкций может быть выполнено не персональном компьютере. Время, необходимое для выполнения требуемого количества испытаний, обеспечивающего достаточную точность вычислений, не превышает времени подготовки и ввода в компьютер исходных данных для обычного статического расчета той же конструкции.

Разработана программа TEST, реализующая методику статистических испытаний металлических куполов с любой расчетной схемой. В качестве исходных данных используются известные распределения нагрузок и усилия в стержнях каркаса от нагрузок единичной интенсивности. В программе TEST учтены случайные изменения следующих величин: площади сечения, предела текучести стали, эксцентриситета приложения продольного усилия для каждого из стержней конструкции, абсолютных величин постоянной, снеговой и ветровой нагрузок, степени неравномерности распределения снеговой нагрузки по поверхности купола, ориентации максимума снеговой нагрузки, направления ветра. Дискретизация непрерывного временного процесса загрузки произведена с интервалом один месяц.

По программе TEST выполнено большое число серий статистических испытаний полусферических куполов диаметром 130 м, сечения которых, подбирались по нормативной методике для различных снеговых нагрузок. Рассмотрены две расчетные схемы - ребристо-кольцевая и сетчатая. Экспериментальные зависимости

средней долговечности от величины нормативной снеговой нагрузки для обеих расчетных схем практически совпадают. Запроектированные для одних и

700 .в '

- 650 о

7 650 в

а 500 о

о 400 Ч

•с 300 х

Ч 250 •

& 200 о

150 100

500 1000 1500 2000 2500 3003

нормативная снеговая нагрузка (Па)

Рис.10. Средняя долговечность сетчатых куполов диаметром 1-3Э м, сечения которых подобраны для различных снеговых нагрузок по нормативной методике (скачкообразное изменение коэффициента надежности по снеговой нагрузке с 1.4 до 1.6).

тех же условий по нормативной методике, ребристо-кольцевой и сетчатый купола равнонадежны. На рис.10 приведены результаты испытаний сетчатого купола. Из графика видно, что при постоянной величине коэффициента надежности средняя долговечность уменьшается с увеличением величины снеговой нагрузки.

Характерным является увеличение долговечности в 3 раза в области нормативной снеговой нагрузки 1400 Па, что обусловлено скачкообразным изменением коэффициента надежности, заложенным в-нормах. Вместо ступенчатой функции для-вычисления коэффициента надежности по снеговой нагрузке подобрана линейная функция, которая обеспечивает равнонадежность куполов для всех снеговых районов. Отмечено, что для обеих схем куполов функция надежности может быть аппроксимирована экспоненциальным законом, поэтому задача построения функции надежности сводится, по-существу, к вычислению одного параметра - средней дого-вечности.

Испытания показали, что подбор сечений по нормативной методике не обеспечивает равнонадежности стержневых элементов куполов, т.к. преобладают отказы всего лишь одного-двух стержней каркаса. Предложена методика подбора сечений по критерию равнонадежности, которая позволяет при том же расходе стали добиться увеличения средней долговечности конструкции в полтора-два раза.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ зарубежного опыта строительства металлических куполов показывает, что эта конструктивная форма большепролетных покрытий получила большое развитие. Построены тысячи зданий и сооружений различного назначения пролетом до 100 м. Наиболее часто используются разнообразные схемы односет-чатых и двухсетчатых куполов. Ребристые купола используются в настоящее время редко и для перекрытия небольших пролетов. Самые большие однопролетные здания в мире пролетом 200 и более метров перекрыты сетчатыми куполами.

2. Выполнено сравнение металлоемкости двух расчетных схем полусферического купола в широком диапазоне размеров и нагрузок. Сравнение показало, что



металлоемкость сетчатых куполов практически не зависит от величины нормативной ветровой негрузки, тогда как расход стали ребристо-кольцевых куполов возрастает на 15 - 40 % с ее увеличением. Во всем диапазоне нагрузок и пролетов сетчатые купола имеют меньший расход стали, чем ребристо-кольцевые. Причем, при малых величинах скоростного напора ветра (230 - 380 Па) разница показателей незначительна, но быстро растет с его увеличением.

3. Разработано и внедрено в практику строительства новое конструктивное решение каркасно-обшивных односетчатых алюминиевых оболочек, а также методы их геометрического формообразования: метод сетей с равносторонними ячейками и метод изометрического преобразования, которые позволяют из сборных элементов с ограниченным количеством типоразмеров создавать покрытия пролетом от 20 до 60 метров с любой формой поверхности и очертанием в плане.

4. Разработан метод геометрического формообразования двухсетчатых оболочек вращения с любой формой меридиана из однотипных двухпоясных элементов. Теоретически обоснована и практически доказана осуществимость навесного монтажа большепролетных сетчатых куполов крупными блоками полной строительной готовности без вспомогательных опор. Установлено, что областью рационального применения этого решения являются покрытия пролетом от 60 до 500 метров, а также башенные градирни высотой 100 - 250 м.

Предложен и реализован в программе GECON общий метод решения геометрических задач проектирования пространственных металлических конструкций.

5. Обоснована возможность эффективного использования метода дискретного аналога для статического линейного расчета больших стержневых систем при решении оптимизационных задач и вариантном проектировании.

Разработан приближенный интерполяционный метод расчета регулярных стержневых конструкций типа структурных плит и сетчатых оболочек, который дает возможность осуществлять линейный расчет любых по сложности пространственных систем, с учетом необходимой для каждой конкретной задачи точности вычислений и технических возможностей используемой вычислительной техники.

6. На основе анализа существующих методик проверки устойчивости сетчатых оболочек показано, что известные решения, основанные на использовании критерия нижней критической нагрузки и полученные в предположении упругой работы материала дают завышенные значения критических нагрузок. Для практических расчетов рекомендуется применять верхнюю критическую нагрузку, которую следует определять с учетом несовершенств формы, неравномерности загрузки и величины предела текучести материала. - . ,

7. На основе проведенных исследований зависимости верхней критической нагрузки от параметра относительной густоты сети установлены границы примени-

мости континуальной и дискретной расчетных схем. Разработан метод дискретного расчета пологих шарнирно-стержневых оболочек, основанный на использовании симметрии пологих сетчатых поверхностей с ячейками, близкими к равностороннему треугольнику. С использованием этого метода исследованы кососимметричные формы потери устойчивости. Выявлено существование вторичных бифуркационных точек в системах, имеющих начальные несовершенства формы при неравномерном нагружении.

Установлена возможность существенного повышения устойчивости одно-сетчатых оболочек путем создания больших начальных отклонений отдельных узлов каркаса.

Предложен критерий нормативной жесткости сетчатых оболочек, гарантирующий устойчивость и обеспечивающий высокий уровень коэффициента использования прочностных свойств материала.

3. Разработана практическая методика пассивного перераспределения усилий между поясами большепролетных двухсетчатых куполов за счет неупругой податливости узловых соединений.

Предложен и экспериментально проверен конструктивный прием, обеспечивающий контролируемую величину узловой податливости.

9. Разработан алгоритм расчета двухпоясной фермы с треугольной решеткой на заданные перемещения ее торцов при произвольной диаграмме деформирования поясной панели. Использование этого алгоритма в программе, реализующей один из итерационных алгоритмов, позволяет выполнять анализ напряженно-деформированного состояния большепролетных двухсетчатых конструкций с учетом реальных характеристик физической и конструктивной нелинейности работы элементов каркаса.

10. Разработана методика исследования надежности и долговечности пространственных стержневых конструкций методом статистических испытаний. Методика реализована в программе TEST для IBM-совместимых персональных компьютеров. Установлено, что при построении экспериментальной функции надежности с точностью, равной точности исходных данных, достаточно выполнить 400 испытаний. Исследования, выполненные по программе TEST, показали, что запроектированные для одних и тех же условий по нормативной методике, ребристо-кольцевой и сетчатый купола равнонадежны, ко равнонадежность обеспечивается при большем расходе стали у ребристо-кольцевых куполов. Для обеих

схем куполов функция надежности может быть аппроксимирована экспоненциальным законом.

На основе информации о распределении отказов в различных типах стержней разработана методика подбора сечений по критерию равнокачества. Она позволяет добиться при том же расходе стали увеличения средней долговечности конструкций примерно в полтора-два раза.

11. Статистика аварий показывает, что чаще всего обрушения конструкций связаны не с естественным разбросом случайных параметров, а с нарушением норм и технических условий. Ошибки людей возникают чаще, чем большие отклонения прочности материала или нагрузок. Поэтому, уникальные большепролетные покрытия, отказы которых приводят к катастрофическим последствиям, необходимо проектировать живучими. Под живучестью понимается сохранение конструкцией способности воспринимать расчетную нагрузку при выходе из строя любого сплошностенчатого элемента.

Сформулированные и обоснованные в диссертации научные положения, разработанные методы и полученные результаты можно квалифицировать как теоретическое обобщение и решение крупной научной проблемы создания эффективных покрытий большепролетных зданий в виде металлических куполов, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Результаты выполненных исследований докладывались на:

Ш Международной конференции по предварительно напряженным металлическим конструкциям, Ленинград, 1971;

IV Всесоюзной конференции по проблемам надежности в строительной механике, Вильнюс, 1975;

Всесоюзной конференции "Пространственные стержневые металлические конструкции", Красноярск, 1976;

конференции Международной ассоциации по пространственным конструкциям (ИАСС), Алма-Ата, 1977;

симпозиуме Международной ассоциации по мостам и конструкциям (АИПК), Москва, 1978; '

XI Конгрессе Международной ассоциации по мостам и конструкциям (АИПК), Вена, 1980;

Всесоюзном семинаре "Передовой опыт проектирования и строительства зданий и сооружений с применением пространственных конструкций...", Москва, 1980;

научно-технической конференции "Состояние и перспективы применения в строительстве пространственных конструкций", Свердловск, 1980;

научно-технической конференции "Повышение эффективности применения металлических строительных конструкций регулированием усилий и деформаций", Свердловск, 1982;

XVII научно-технической конференции МИСИ им.Куйбышева, Москва, 1983;

совещании "Композиционные возможности применения новых пространственных конструкций в архитектуре", Москва, 1983;

111 Закавказской конференции по применению пространственных конструкций в строительстве, Тбилиси, 1984;

XLVI научно-технической конференции МУСН им.Куйбышева, Москва, 1988;

международном коллоквиуме "Устойчивость стальных конструкций", Венгрия, Будапешт, 1990;

семинаре "Пространственные конструкции", Москва, 1991.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Савельев В.А. Об устойчивости сферической оболочки с начальными неправильностями формы срединной поверхности - Инженерный журнал, 1965, вып.5, т.5, с. 907-915.

2. Савельев В.А. Устойчивость сетчатых куполов. - В кн.: Металлические конструкции. Работа школы проф. Н.С.Стрелецкого. М.: Стройиздат, 1966, с. 325-339

3. Савельев В.А. Влияние начальных несовершенств формы и неравномерности загрузки на устойчивость сетчатого сферического купола с жесткими узлами. Строительная механика и расчет сооружений, 1971, № 5, с.32-34.

4. Савельев В.А. Расчет предварительно напряженных металлических сетчатых оболочек, доклады III международной конференции по предварительно напряженным металлическим конструкциям. - М.: 1971, т.1, с.362-371.'

5. Savetiev VA, Lombardo I.W. Study of non-symmetrical forms of buckling in single-net dômes, - "Proc. Pacif. Symp., Tokyo and Kyoto, Part 2, Tension StrucL and Space Frames", Tokyo, 1972, p.783-792.

6. Савельев В.А., Ломбардо И.В. Приближенный метод расчета односетчатых куполов по деформированной схеме. - В кн.: Материалы по металлическим конструкциям, М.: Стройиздат, 1973, вып.17, с.120-126.

7. Савельев В.А., Гвамичава А.С., Ломбардо И.В. Статистический анализ случайных несовершенств формы сетчатых сферических оболочек, - В кн.: Проблемы

- надежности в строительной механике. Тез. докл. IV Всесоюзн. конф., Вильнюс, 1975.
8. Савельев В.А. Интерполяционный метод расчета структурных металлических конструкций. - Труды ЦНИИпроектстальконструкция, 1977, М.: вып.20, стр.30-32.
9. Савельев В.А. Новые конструктивные решения металлических сетчатых оболочек. - В кн.: Исследование и развитие теории конструктивной формы металлических конструкций. Труды ЦНИИпроектстальконструкция, М.: 1977, вып.21, стр.94-104.
10. Мельников Н.П., Савельев В.А., Мухин Б.Г. Формообразование сетчатых оболочек переменной кривизны,- В кн.: Труды ЦНИИпроектстальконструкция, М.: 1977, вып. 22, стр. 2 - 23.
11. Мельников Н.П., Савельев В.А. Новые конструктивные решения металлических сетчатых оболочек. - Международная конференция по облегченным пространственным конструкциям покрытий для строительства в обычных и сейсмических районах. Алма-Ата, 13-16 сентября. Доклады. М.: Стройиздат, 1977, с 326-329.
12. Savetiev V.A. Weitgespannte Netzwerkkuppel. - In: Structures in the USSR. - IABSE Periodica, 2 / 1978 / International Association for Bridge and Structural Engineering, s.25.
13. Melnikov N.P., Savetiev V.A., Kanevski S.K. Kuhlturnroa aus Metall (UdSSR). In: Cooling Towers. IABSE Periodica, 3/1980/ International Association for Bridge and Structural Engineering, s.86-87.
14. Савельев В.А. Пространственные и висячие покрытия. - В кн.: Металлические конструкции. Справочник проектировщика, 2-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1980, с.320-345. , ,
15. Савельев В.А. Устойчивость сетчатых сферических оболочек. - В кн.: Развитие металлических конструкций: Работы ■ школы Н.С.Стрелецкого. Под ред. В.В.Кузнецова; ЦНИИпроектстальконструкция и др. - М.: Стройиздат, 1987, с.440-456.
16. Melnikov N.P., Savelyev V.A. Long-span metal netted shells. - Bulletin of the International Association for Shell Structures, n.86, p.51-56.
17. Sawsljav V.A. Automatisierung der Berechnungen von raumlichen Konstruktionen. - Internationale Vereinigung fur Bruckenbau und Hochbau. XXIII Kongress Helsinki. June 6 - 10, 1988, Schlussbericht s. 209-212.
18. Лебедь. Е.В., Савельев В.А. Математическое моделирование на ЭВМ процесса возведения пространственных сооружений. - М.: 1988, - 37'с. Дел. во ВНИИИС 23.12.88, №9811:
19. Savelyev V.A. Stability of reticulated metal shells. - International Colloquium Stability of Steel Structures, Hungari, Budapest, 1990, vol.UJ, p.99-106.
20. Савельев В.А. Сетчатые оболочки из алюминия. - В кн.: Пространственные конструкции: Материалы семинара.Общество "Знание" РСФСР.Моск. дом научно-технпрэп-ды, М.: 1991, с.62-69.
21. Савельев В.А. Металлические купола. - В кн.: Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник / Под рзд. ЮА Дыховичного, Э.З.Жуковского. - М.: Высш. шк., 1991,-а 187-204.
22. Saveljev V.A. Geometrical Shaping of Reticulated Shells. - International Journal of Space Structures, v.7, No.1, 1992, p.11-24. „ ...