

На правах рукописи

АТТАЛЬМАНАН АБУСАМРА АВАД ЮСИФ

**ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ КОНСТРУКЦИЙ
ДВУХПОЯСНЫХ СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ НА ИХ НЕСУЩУЮ
СПОСОБНОСТЬ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2007

Работа выполнена на кафедре металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Ростовского государственного строительного университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Веселев Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пшеничкина Валерия Александровна,
кандидат технических наук, доцент
Токарев Александр Альбертович

Ведущая организация: ООО «Ростовское отделение ЦНИИ-
Проектстальконструкция»

Защита состоится « 22 » июня 2007 г. В 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.207.02 при Ростовском государственном строительном университете по адресу: 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, корпус 1, ауд. 232.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ростовского государственного строительного университета.

Автореферат разослан « » мая 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Л.В. Моргун

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы большое внимание уделяется изучению влияния начальных несовершенств строительных конструкций на их прочность и устойчивость. Интерес к этой проблеме начал расти после того, как исследователи нашли большие несоответствия между теоретическими и экспериментальными результатами. Все механические системы так или иначе имеют некоторые начальные несовершенства, несмотря на тщательность их изготовления, и именно эти неизбежные несовершенства служат причиной иногда больших различий между теоретическими и экспериментальными данными. Так, например, реальные несовершенства пространственных систем могут существенно изменить величину их критических нагрузок, хотя сама форма потери устойчивости в большинстве случаев остается такой же, как и при их отсутствии.

Особенно сказывается влияние этих несовершенств на несущую способность многоэлементных систем, какими являются двухпоясные сетчатые купола. Такими куполами перекрываются, как правило, значительные пролеты. Простое накопление систематических несовершенств при изготовлении элементов купола может привести к отклонению полученной формы купола от проектной и тем самым понизить запроектированную надежность сооружения. В случаях, когда опорные крепления таких куполов не являются свободными, влияние этих несовершенств на несущую способность куполов увеличивается.

Самый распространенный вид отказа большепролетных сетчатых куполов – потеря устойчивости при достижении нагрузками критических величин. Во многих исследованиях изучается распределение критической нагрузки для сферических оболочек со случайными геометрическими несовершенствами. В большинстве этих исследований определяется среднее значение и дисперсия критических нагрузок с использованием данных о несовершенствах ранее изготовленных оболочек подобного типа. При отсутствии

данных о начальных несовершенствах конструкции оцениваются как идеальные по форме.

Однако сложная геометрия, не одинаковые по периметру основания контурные условия, обилие стержней разных типоразмеров для поясов и решетки, присущие двухпоясным сетчатым куполам, не позволяют получить приемлемые в конкретных случаях аналитические решения для критических нагрузок, тем более, если эти нагрузки распределены по покрытию неравномерно. Большие деформации, предшествующие потере устойчивости, требуют привлечения геометрически нелинейных расчетов методом конечных элементов для определения этих нагрузок.

Все эти вопросы являются актуальным направлением для исследований, тем более что для многоэлементных систем существующая методика расчета по предельным состояниям пока не может гарантировать минимально допустимый уровень надежности.

Задачами исследования являются:

- разработка методики приближенной оценки первоначальной надежности двухпоясных сетчатых куполов как многоэлементных систем, с учетом начальной погнби сжатых элементов;
- моделирование систематических начальных несовершенств по длине элементов двухпоясных сетчатых куполов с использованием современных программно-вычислительных средств;
- изучение влияния нормируемых несовершенств элементов на несущую способность некоторых двухпоясных сетчатых куполов с разными типами поясных сеток и решеток;
- сравнение двухпоясных сетчатых куполов нескольких типов по несущей способности, надежности и стоимости;
- выработка предложений по применению двухпоясных сетчатых куполов с шестью разновидностями решеток на основе проведенных численных исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена методика приближенного определения первоначальной надежности двухпоясных сетчатых куполов, в которой делается акцент на наиболее опасные узлы сопряжения элементов, с учетом начальной погиби сжатых элементов и унификации сечений элементов.

2. Разработана и реализована на ЭВМ численная методика учета систематических начальных несовершенств по длинам элементов при расчете двухпоясных сетчатых куполов с использованием высокоэффективных вычислительных комплексов.

3. Приведена сравнительная характеристика несущей способности и надежности двухпоясных сетчатых куполов с шестью различными типами решеток, но с одинаковыми генеральными размерами и нагрузками.

Автор защищает:

- методику приближенного определения первоначальной надежности двухпоясных металлических сетчатых куполов;

- методику учета систематических начальных несовершенств с использованием современных высокоэффективных вычислительных комплексов в статических расчетах и расчетах на устойчивость двухпоясных сетчатых куполов;

- результаты сравнения результатов численных расчетов на прочность, устойчивость и надежность двухпоясных сетчатых куполов с шестью типами решеток, но одинаковых генеральных размеров.

Практическая ценность. Изложенные в работе методики учета начальных систематических геометрических несовершенств в расчетах двухпоясных сетчатых куполов могут быть использованы при проектировании большепролетных конструкций. Это позволит увеличить надежность вводимых в строй объектов с использованием многоэлементных конструкций типа большепролетных структур и сетчатых куполов.

Реализация работы. Разработанные методики и рекомендации проектирования двухпоясных сетчатых куполов как многоэлементных сис-

тем приняты для использования в ООО «Ростовское отделение ЦНИИПроектстальконструкция».

Материалы работы внедрены в учебном процессе на кафедре металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Ростовского государственного строительного университета при чтении курса лекций «Основы теории надежности строительных конструкций» для студентов специальности «Промышленное и гражданское строительство».

Апробация результатов работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных Международных научно-практических конференциях, проводимых в Ростовском государственном строительном университете (Ростов-на-Дону, 2004 -2006 гг.)

Публикации: По материалам выполненных исследований опубликовано 4 работа, в том числе 1 в рекомендованном ВАК рецензируемом издании.

Структура и объем диссертации. Диссертация объемом 149 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка 108 использованных литературных источников. Работа имеет 50 иллюстраций, 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследований, указываются научная новизна и практическая значимость выполненной работы.

В первой главе рассматриваются история развития куполов и применение двухпоясных сетчатых куполов в практике гражданского строительства. Конструкции куполов классифицируются следующим образом: ребристые, ребристо-кольцевые, ребристо-кольцевые со связями, сетчатые, пластинчатые. Выявлено, что сетчатые купола для основных диапазонов нагрузок и пролетов имеют меньший расход стали, чем другие типы куполов.

Рассматриваются разные конструктивные решения узловых соединений, применяемых для пространственных конструкций. Выявлено, что тип элементов купольных покрытий влияет на выбор вида соединений (болтовые или сварные).

Изложены два подхода к расчету сетчатых куполов. В соответствии с первым подходом купол рассматривают как сплошную осесимметричную оболочку, поскольку он повторяет форму сплошной оболочки. В соответствии со вторым подходом сетчатый купол рассматривают как дискретную стержневую систему и рассчитывают известными методами строительной механики пространственных стержневых систем. Для куполов значительных пролетов естественным становится применение для их расчета высокоэффективных вычислительных средств на ЭВМ, включая этапы формообразования, статического расчета, расчета на устойчивость.

Рассматриваются факторы, влияющие на надежность куполов как при проектировании, так и при производстве изготовительных, монтажных или общестроительных работ. Отмечается, что надежность собранных из стандартных и унифицированных элементов конструкций будет существенно зависеть от количества элементов и наличия начальных несовершенств.

Во второй главе сделано описание нагрузок, чаще всего действующих на купола, и рассмотрены основные виды сочетаний этих нагрузок, требующихся для расчета большепролетных купольных покрытий.

Показано приведение стержневых систем куполов к континуальным оболочками для оценки напряженно-деформированного состояния исходных куполов. Приведен метод сплошной аналогии сетчатых куполов, состоящих из системы связанных друг с другом стержней в виде правильной треугольной сети. Для расчета сетчатого купола необходимо сначала определить жесткостные характеристики приведенной сплошной оболочки, затем вычислить напряжения в сплошной оболочке от заданной нагрузки и, наконец, по напряжениям установить усилия в стержнях купола. При этом возникают неравномерности нагрузок и ряд других факторов.

Показывается применение современных программно-вычислительных комплексов для расчета пространственных шарнирно-стержневых систем. К таким комплексам относятся и программные комплексы **FORMIAN**, **SAP 2000** и **Robot Millennium**, которые применялись в настоящей работе. Две последние расчетные программы являются независимыми.

Рассматривались шесть типов решеток двухпоясных металлических сетчатых куполов, геометрия которых была разработана с использованием программы «Formian» (рис.1-6). Назначение сечений стержневых элементов было произведено с использованием разумного числа типоразмеров сечений элементов для поясов и решетки после предварительных расчетов шарнирно-стержневых систем с одинаковыми сечениями элементов и последующих уточняющих перерасчетов. Статический расчет производился для трех сочетаний нагрузок, включающих в себя постоянную, снеговую и ветровую нагрузки, принятые в соответствии с нормами. Купола были разбиты на несколько кольцевых зон по уровню возникающих усилий в элементах. В соответствии с этими зонами были назначены типоразмеры элементов. Последующие линейные и нелинейные расчеты производились уже с уточненными сечениями элементов.

В главе приведено сравнение результатов расчета рассматриваемых типов двухпоясных сетчатых куполов по двум названным независимым программам. Расчет куполов велся также с учетом геометрической нелинейности. Для всех сочетаний нагрузок нелинейный расчет показал увеличение продольных усилий, действующих в элементах куполов, по сравнению с линейным расчетом.

Результаты нелинейного расчета сетчатых куполов на устойчивость, полученные при использовании названных программ, показывают, что сочетание нагрузок I (постоянная и снеговая нагрузки) является наиболее опасным, дающим минимальный коэффициент запаса устойчивости по сравнению с другими сочетаниями нагрузок (сочетания с ветром).

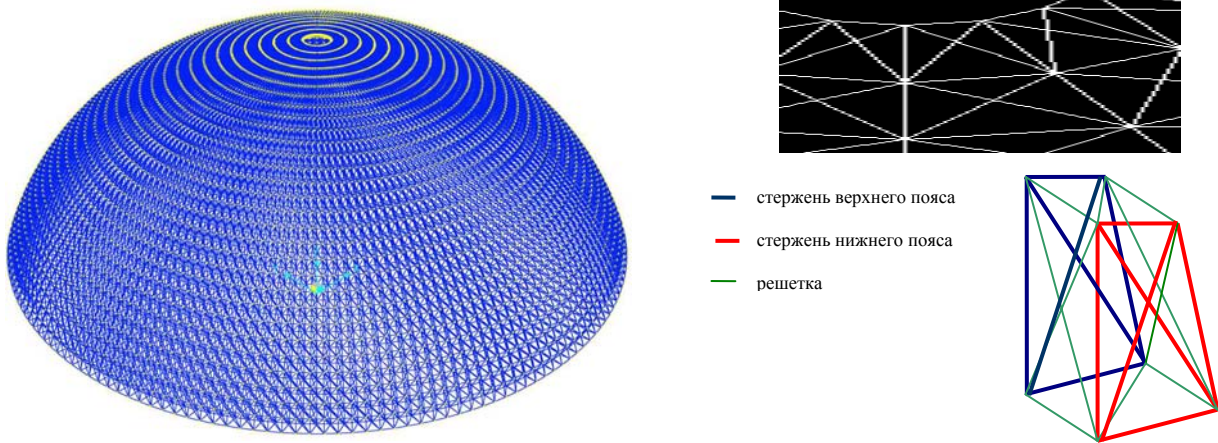


Рис. 1. Двухпоясный сетчатый купол Шведлера

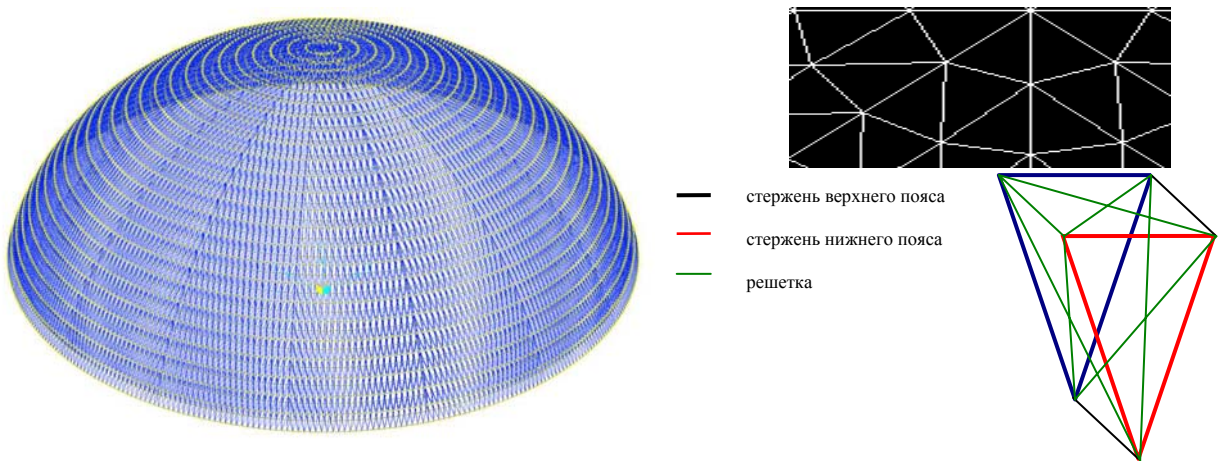


Рис. 2. Двухпоясный сетчатый купол с треугольными сетками

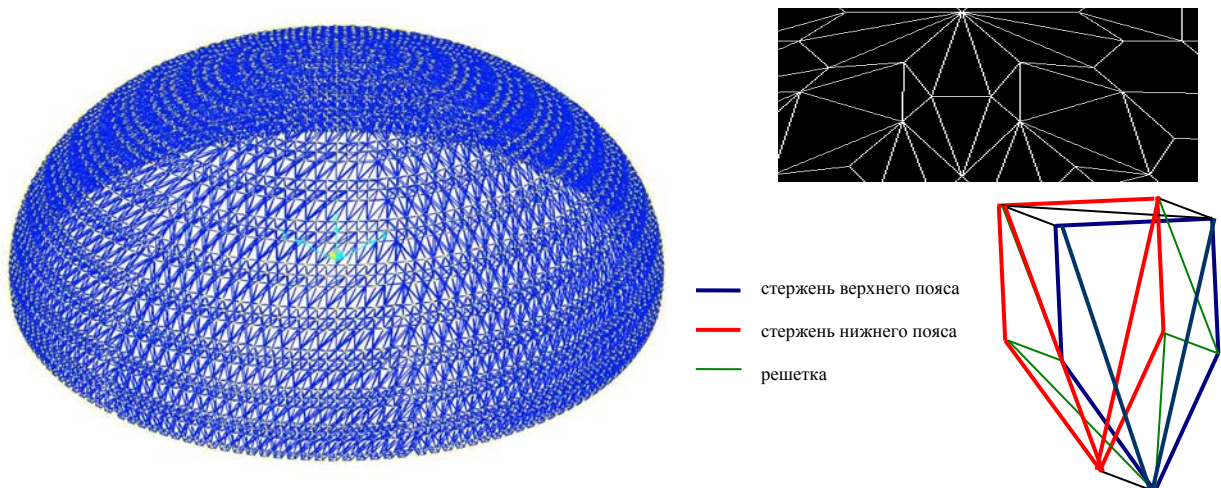


Рис. 3. Двухпоясный сетчатый купол с трапециевидными сетками

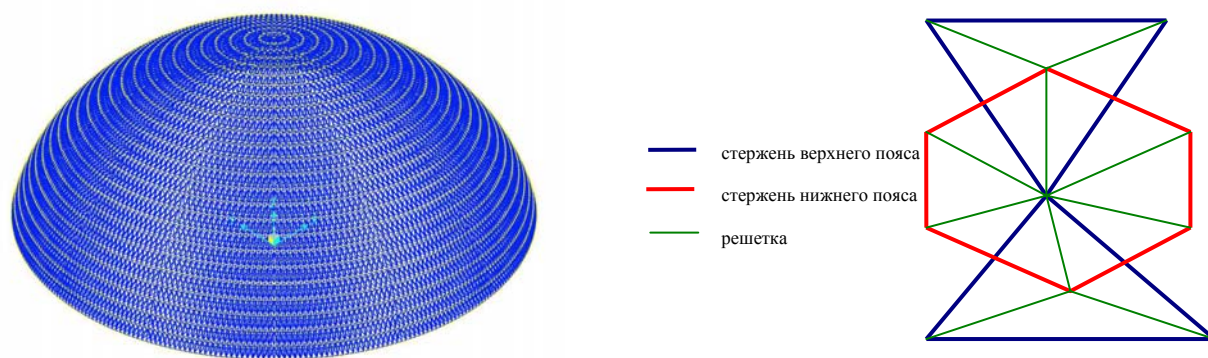


Рис.4. Двухпоясный сетчатый с разными сетками поясов

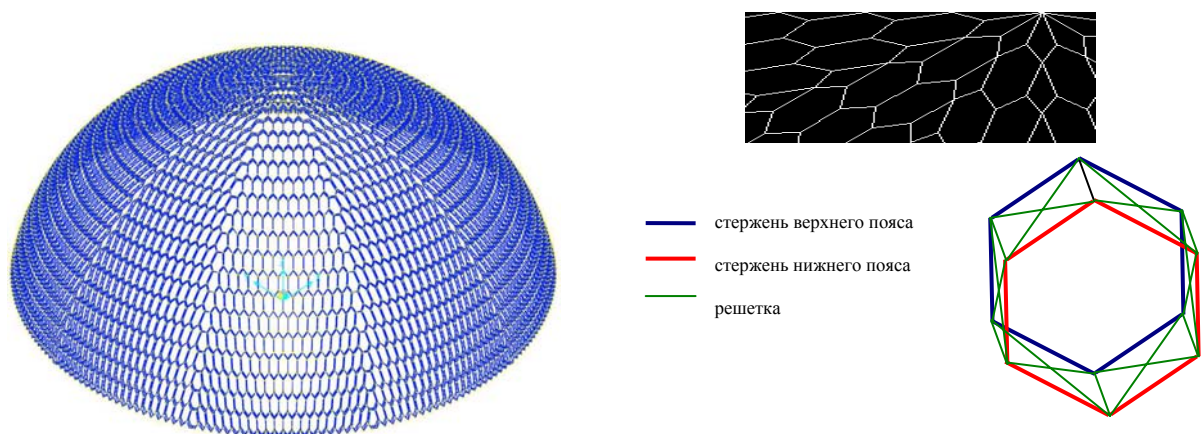


Рис. 5. Двухпоясный сетчатый купол с шестиугольными сетками

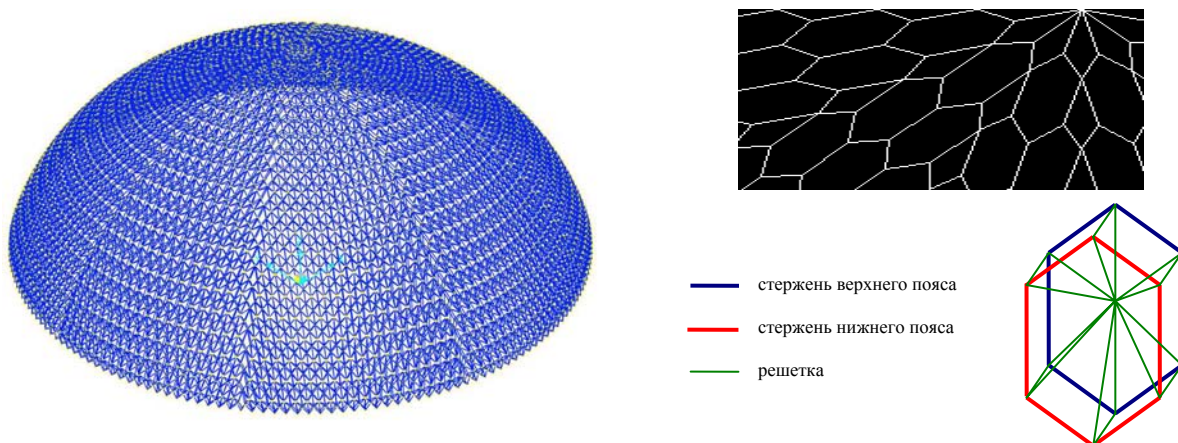


Рис. 6. Двухпоясный сетчатый купол с шестиугольными сетками, в котором внешний и внутренний пояса связаны в узлах распорками и диагональными растянутыми элементами

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с расчетом на надежность двухпоясных сетчатых куполов.

Показывается применение метода статистической линеаризации для определения вероятности отказа отдельных стержневых элементов купола при растяжении и сжатии, в последнем случае с учетом начальной погиби. Определяется вероятность отказа растянутого элемента по формулам.

Для центрально растянутого элемента функция неразрушимости:

$$\tilde{Z} = \tilde{\sigma}_T - \frac{\tilde{N}}{\tilde{A}} > 0, \quad (1)$$

где знак «~» означает случайные величины.

Математическое ожидание и дисперсия функции неразрушимости в соответствии с методом линеаризации:

$$\bar{Z} = \bar{\sigma}_T - \frac{\bar{N}}{\bar{A}}. \quad (2)$$

Дисперсия Z в соответствии с методом линеаризации:

$$\sigma^2(Z) = \left(\frac{\partial Z}{\partial \sigma_T} \right)^2 \cdot \sigma^2(\sigma_T) + \left(\frac{\partial Z}{\partial N} \right)^2 \cdot \sigma^2(N) + \left(\frac{\partial Z}{\partial A} \right)^2 \cdot \sigma^2(A), \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial \sigma_T} &= 1; \\ \frac{\partial Z}{\partial N} &= -\frac{1}{A}; \\ \frac{\partial Z}{\partial A} &= \frac{\bar{N}}{A^2}. \end{aligned}$$

Вероятность отказа элемента в соответствии с нормальным законом распределения:

$$P_F = P(Z < 0) = 0,5 - \Phi \left[\frac{\bar{Z}}{\sigma(Z)} \right], \quad (4)$$

а вероятность безотказной работы (надежность) -

$$P_s = 0.5 + \Phi \left[\frac{\bar{Z}}{\sigma(Z)} \right].$$

Вероятность отказа сжатого элемента определяется с учетом суммарного максимального выпучивания стержня, определяемого как

$$\Delta = f_0 \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{\text{Э}}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{Э}} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$ - Эйлерова критическая сила; f_0 - стрелка начальной погиби.

Условие прочности сжато-изогнутого стержня с подстановкой $M_{\text{max}} = N\Delta$:

$$\frac{N}{A} \left[1 + \frac{f_0}{\rho \left(1 - \frac{N}{A} - \frac{\pi^2}{\lambda^2 E} \right)} \right] \leq \sigma_T, \quad (6)$$

или после преобразований

$$\frac{N}{A} \left[1 + \frac{0,5 \delta \lambda K_1}{1 - \frac{N}{A} - \frac{\pi^2}{\lambda^2 E}} \right] \leq \sigma_T, \quad (7)$$

где δ – относительная начальная погибь стержня.

Для функции неразрушимости:

$$\tilde{Z} = \tilde{\sigma}_T - \frac{\tilde{N}}{\tilde{A}} \left[1 + \frac{c \tilde{\delta}}{1 - b \frac{\tilde{N}}{\tilde{A}}} \right] \geq 0 \quad (8)$$

ее математическое ожидание и дисперсия в соответствии с методом линеаризации:

$$\bar{Z} = \bar{\sigma}_T - \frac{\bar{N}}{\bar{A}} \left[1 + \frac{c \bar{\delta}}{1 - b \frac{\bar{N}}{\bar{A}}} \right]; \quad (9)$$

$$\sigma^2(Z) = a_1^2 \sigma^2(\sigma_T) + a_2^2 \sigma^2(N) + a_3^2 \sigma^2(A) + a_4^2 \sigma^2(\delta), \quad (10)$$

где

$$a_1 = \frac{\partial Z}{\partial \sigma_T} = 1;$$

$$a_2 = \frac{\partial Z}{\partial N} = -\frac{1}{A} \left[1 + \frac{c \bar{\delta}}{1 - \frac{\bar{N}}{A}} + \frac{c \bar{\delta} b \bar{N}}{A \left(1 - b \frac{\bar{N}}{A} \right)} \right];$$

$$a_3 = \frac{\partial Z}{\partial A} = -\frac{\bar{N}}{A} \left[1 + \frac{c \bar{\delta}}{1 - \frac{\bar{N}}{A}} + \frac{c \bar{\delta} b \bar{N}}{A \left(1 - b \frac{\bar{N}}{A} \right)^2} \right] = \frac{\bar{N}}{A} a_2;$$

$$a_4 = \frac{\partial Z}{\partial \delta} = -\frac{\bar{N} c}{A \left(1 - b \frac{\bar{N}}{A} \right)}.$$

Обеспеченность расчетного сопротивления стали принимается

$$P(\tilde{\sigma}_T > R_y) = 0.5 + \Phi \left(\frac{R_y - \bar{\sigma}_T}{v(\sigma_T) \bar{\sigma}_T} \right) = 0.995. \quad (11)$$

Среднеквадратичное отклонение (стандарт) сжимающего усилия в стержне принимается в соответствии с правилом «трех сигма»

$$\sigma(N) = \frac{\bar{N}(\gamma_f - 1)}{3}, \quad (12)$$

где γ_f – средневзвешенный коэффициент надежности по нагрузкам.

Для того чтобы определить первоначальную вероятность разрушения купола в «горячих», наиболее опасных точках, иначе - узлах купола с наибольшей вероятностью разрушения сходящихся в узле элементов, необходимо представить элементы, сходящиеся в этом узле, в виде параллельно-последовательного соединения, при этом одной из определяющих цепей параллельного соединения является последовательная цепь из трех элементов с наименьшей вероятностью разрушения, которые в стержневой конструкции купола не лежат в одной плоскости. Остальные элементы, сходящиеся в узле, представляются как параллельно соединенные (рис. 7).

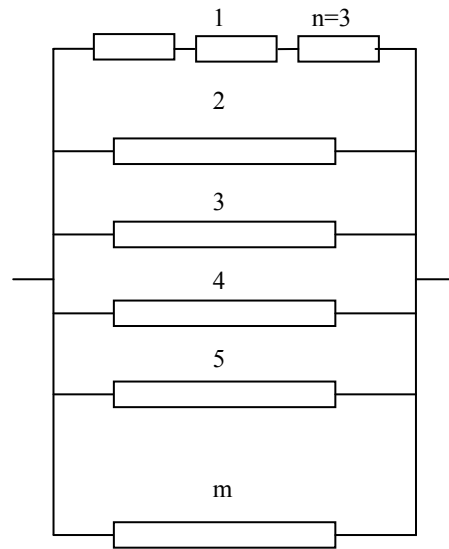


Рис. 7. Фрагмент купола в виде параллельно-последовательного соединения

На следующем этапе определяется количество однотипных опасных узлов в соответствии с геометрией купола и количеством кольцевых зон, принятых по признаку унифицирования типоразмеров сечений. Учитывая только опасные точки, можно оценить приближенные величины вероятности отказа и надежности купола. Для того чтобы определить вероятность разрушения всего фрагмента (узловое сопряжения), необходимо найти вероятность отказа каждой параллельной цепи, а затем получить вероятность разрушения фрагмента по формуле

$$P_F^{фраг}(Q) = \prod_{j=1}^m P_{F,j}^{цепь}, \quad (13)$$

где $P_F^{цепь}(Q) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{Fi})$.

Здесь P_{Fi} - вероятности разрушения i -го элемента; $P_F^{фраг}(Q)$ - вероятность разрушения фрагмента; n - число последовательно соединенных элементов; m - число параллельных цепей.

В работе каждый рассчитываемый купол был разделен на три зоны, и в каждой зоне были назначены свои сечения отдельно для верхнего, нижнего

поясов и отдельно для решетки. Для того чтобы приближенно рассчитать вероятность разрушения или вероятность безотказной работы всего купола, необходимо узнать вероятность разрушения определяющих узловых сопряжений каждой зоны, а также их общее число в куполе. Считая при этих условиях вероятности разрушения всех остальных узловых фрагментов пренебрежимо малыми (поскольку они являются недогруженными) по сравнению с определяющими фрагментами, ограничимся только последними.

Если m_i – количество различных определяющих сопряжений в i -й зоне, а r_{ij} – общее число одинаковых j -х определяющих сопряжений в i -й зоне, то вероятность безотказной работы (надежность) всего купола выразится следующим соотношением

$$P_S(Q) = \prod_{i=1}^3 \prod_{j=1}^{m_i} (1 - P_{F,ij}^{фраз})^{r_{ij}}, \quad (14)$$

а вероятность разрушения

$$P_F(Q) = 1 - \prod_{i=1}^3 \prod_{j=1}^{m_i} (1 - P_{F,ij}^{фраз})^{r_{ij}}. \quad (15)$$

В результате расчета куполов были получены количественные приближенные величины первоначальной надежности для шести типов куполов (табл. 1). Как видно из результатов, наибольшей надежностью обладают двухпоясные купола с треугольными сетками, с пятиугольными сетками, с разными сетками для поясов и купол Шведлера. Это связано в первую очередь с тем, что в силу унификации типоразмеров сечений элементов по предельным гибкостям и большего количества стержневых элементов на единицу площади куполов многие из элементов недогружены в отличие от двух типов куполов с шестиугольными сетками.

В работе предложен также метод учета систематических несовершенств по длинам элементов куполов в соответствии с категориями точности по нормам. Предполагалось, что длины элементов имеют отклонения от номинальных размеров в соответствии с допусками, регламентированными табл. 1 ГОСТ 21779- 82 “Технологические допуски”. Для различных клас-

сов точности стержневые элементы (длиной от 2,5 м до 4,0 м) могут иметь по длине искажения от 4 до 60 мм, и эти значения принимались как несовершенства по длине.

Для моделирования этих несовершенств производился автоматизированный расчет геометрически «идеального» купола на температурные воздействия, дающие необходимые приращения длин элементов. Полученная деформированная схема приравнивалась к исходной схеме с учетом несовершенств, после чего производился расчет на реально действующие нагрузки. Предложенный способ моделирования систематических геометрических несовершенств был использован также при определении критических нагрузок для куполов.

Для того чтобы приблизительно оценить влияние систематических несовершенств, были выполнены расчеты на надежность таких куполов (рис.8, 9). При увеличении величин несовершенств как надежность, так и несущая способность куполов понижаются, что косвенно подтверждает справедливость предлагаемых численных методик. Что касается геометрически нелинейного расчета, то он показывает меньшие значения надежности и критических сил по сравнению с линейным расчетом для всех шести рассмотренных типов сетчатых куполов.

Путем сравнения результатов расчетов «идеального» и с учетом систематических несовершенств куполов, были сделаны выводы об их прочности и устойчивости.

Как показывают результаты, наименьшей надежностью обладают двухпоясные сетчатые купола с шестиугольными сетками. В связи с тем, что узловые сопряжения таких куполов являются раскрепленными в меньшей степени, чем в других куполах, получаются и меньшие величины коэффициентов запаса устойчивости.

Численные расчеты надежности куполов из условия их общей устойчивости выполнялись из предположения, что начальные несовершенства

формы куполов определены однозначными систематическими несовершенствами длин элементов.

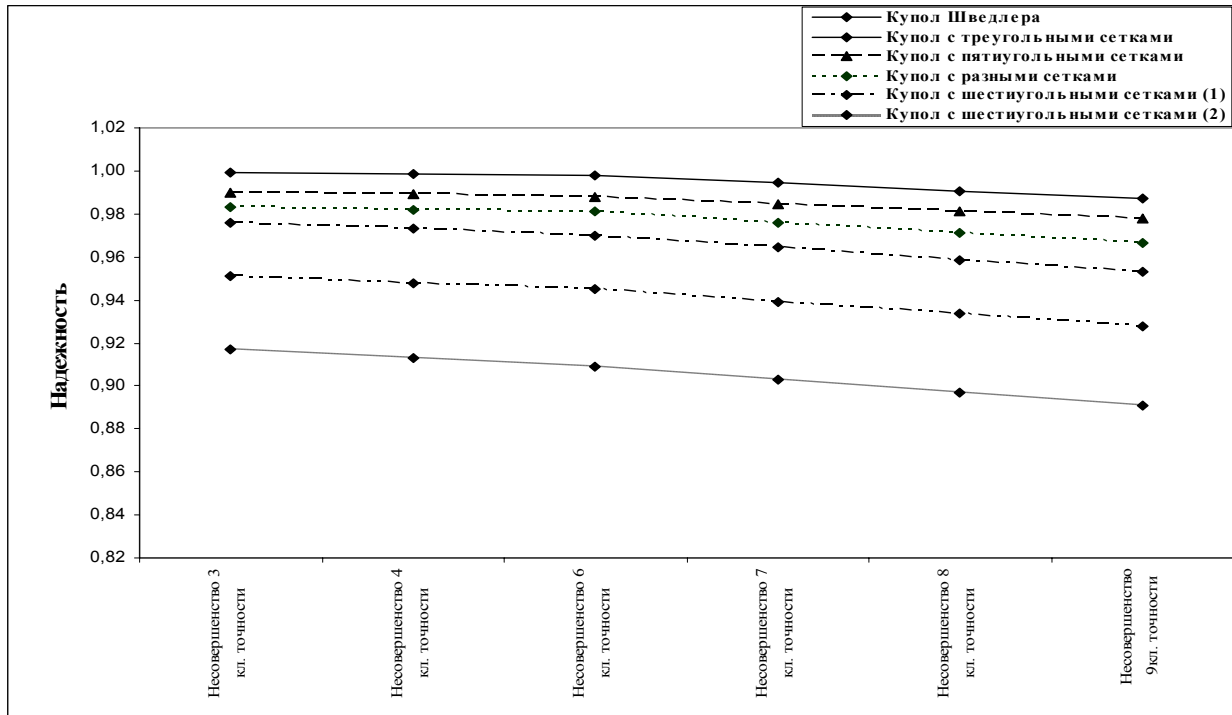
Расчет выполнялся для 10 форм потери устойчивости для каждого из выбранных сетчатых куполов. Для определения вероятности безотказной работы куполов, или вероятности, что критическая нагрузка не будет ниже предельной величины, был использован метод статистической линеаризации. На рис. 10 представлен пример расчета на устойчивость купола Шведлера.

Из результатов расчетов на надежность видно, что сетчатые купола, которые разбиты на шестиугольники, являются более неустойчивыми под нагрузками. Видно также, что наибольшей надежностью обладают двухпоясные купола с треугольными сетками, с пятиугольными сетками, с разными сетками и Шведлера.

Таблица 1. Первоначальные вероятность разрушения и надежность двухпоясных сетчатых куполов с шестью типами сеток с учетом нормируемой погиби сжатых элементов.

Тип купола	Вероятность разрушения купола	Надежность купола
двухпоясной сетчатый купол Шведлера	0.0043	0.9957
двухпоясной сетчатый купол с треугольными сетками	0.0064	0.9936
двухпоясной сетчатый купол с трапециевидными сетками	0.0038	0.9962
двухпоясной сетчатый купол с разными сетками	0.0059	0.9941
двухпоясной сетчатый купол с шестиугольными сетками (1)	0.0439	0.9561
двухпоясной сетчатый купол с шестиугольными сетками (2)	0.0274	0.9726

(a)



(б)

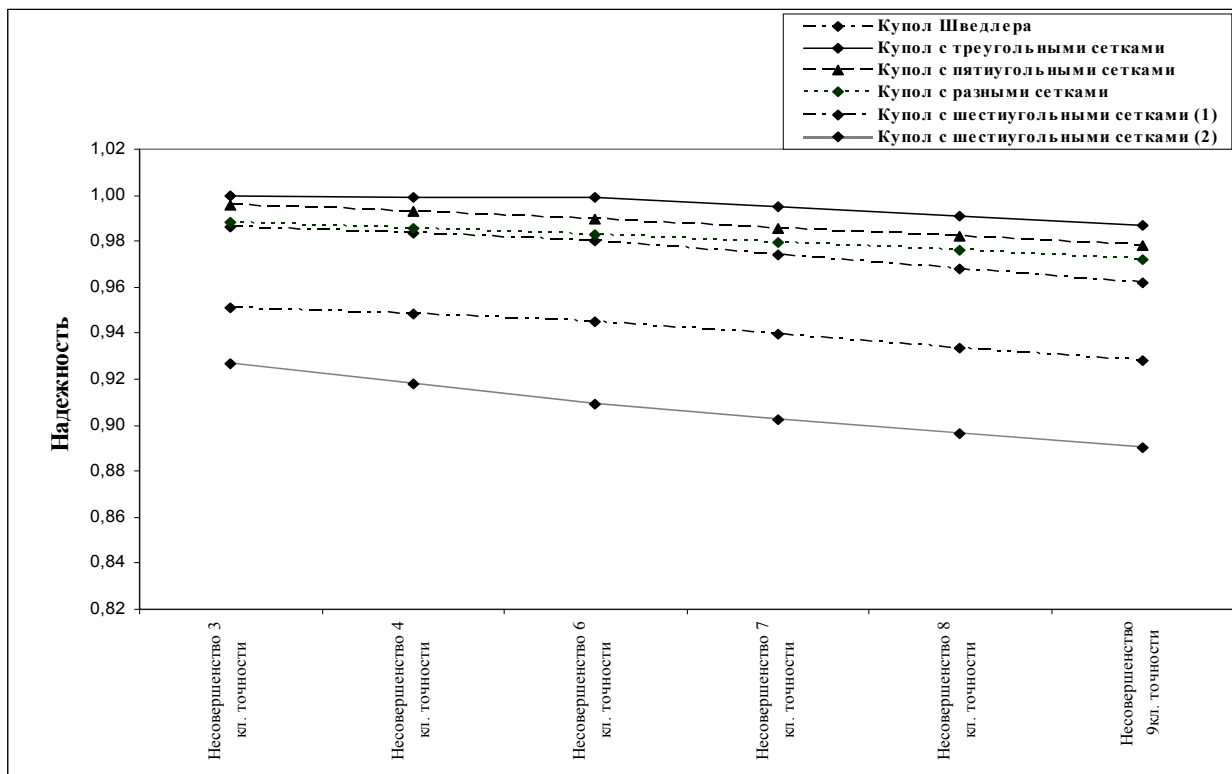
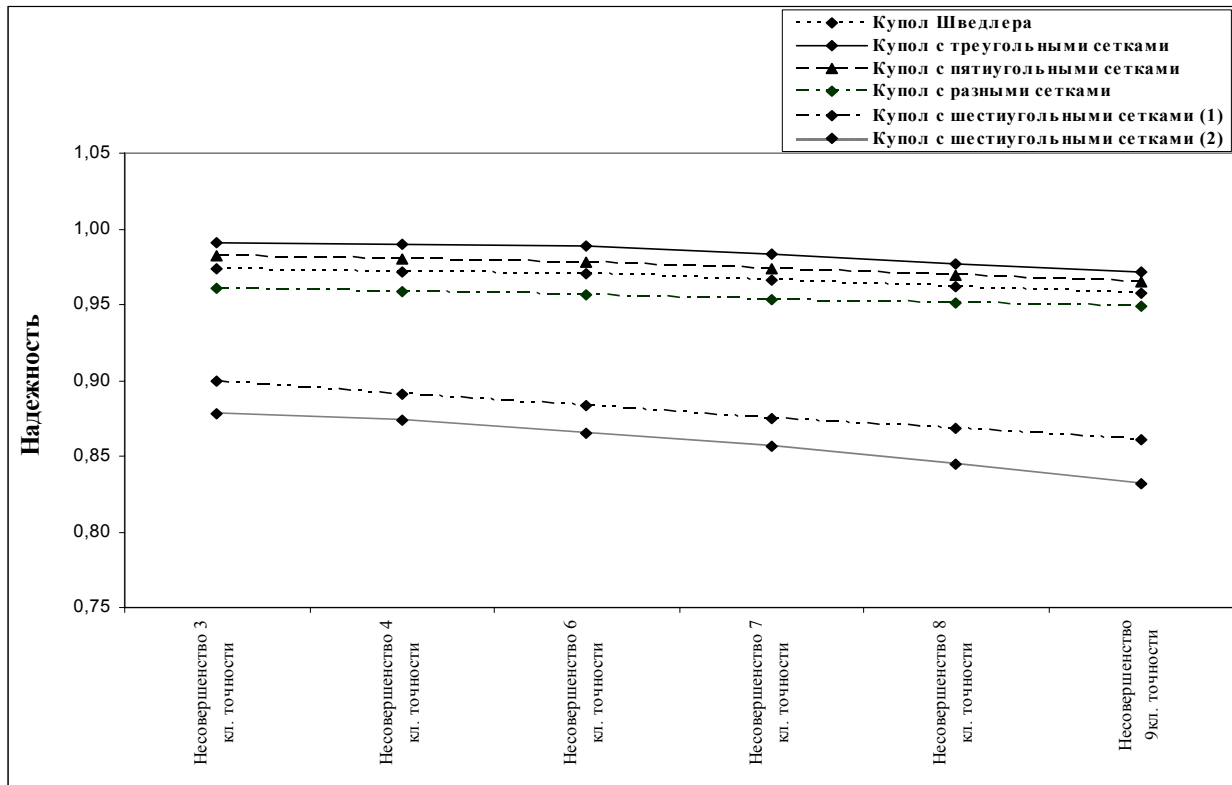


Рис.8. Сравнение величин надежности шести типов двухпоясных сетчатых куполов для шести уровней систематических несовершенств (линейный расчет):

а — сочетание нагрузок (I); б — сочетание нагрузок (III).

(a)



(б)

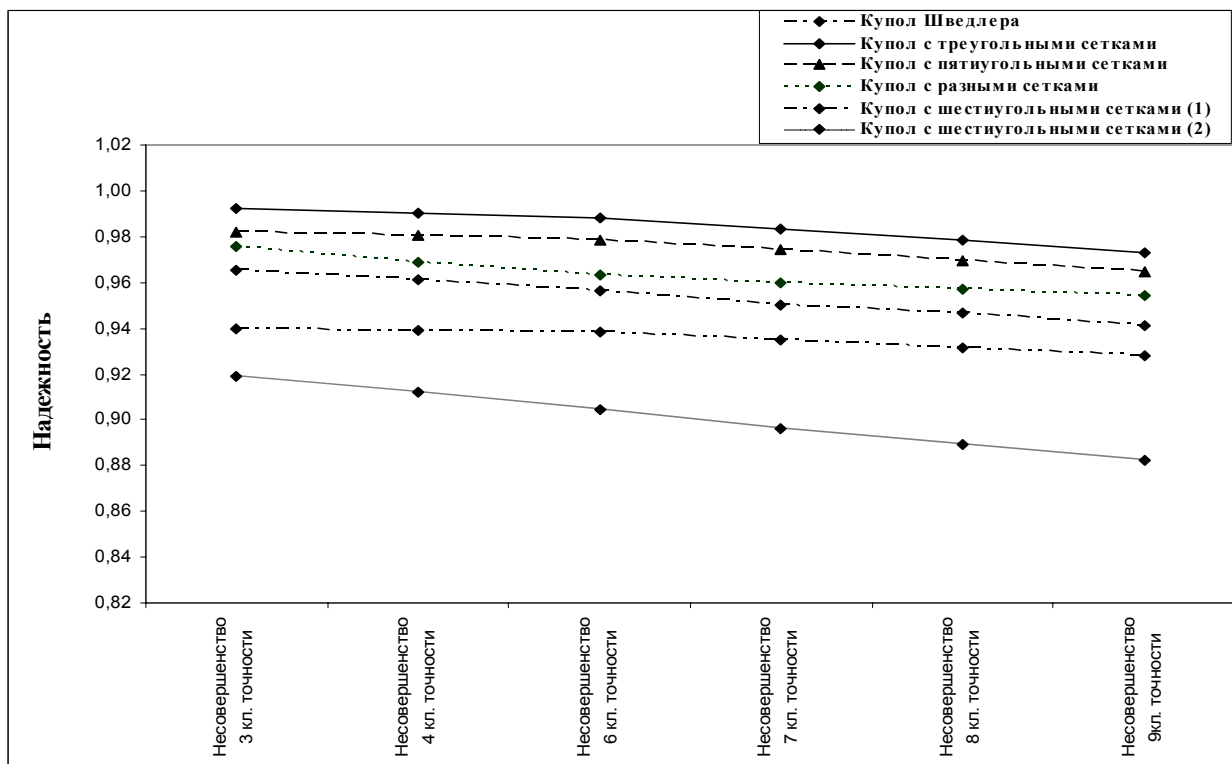
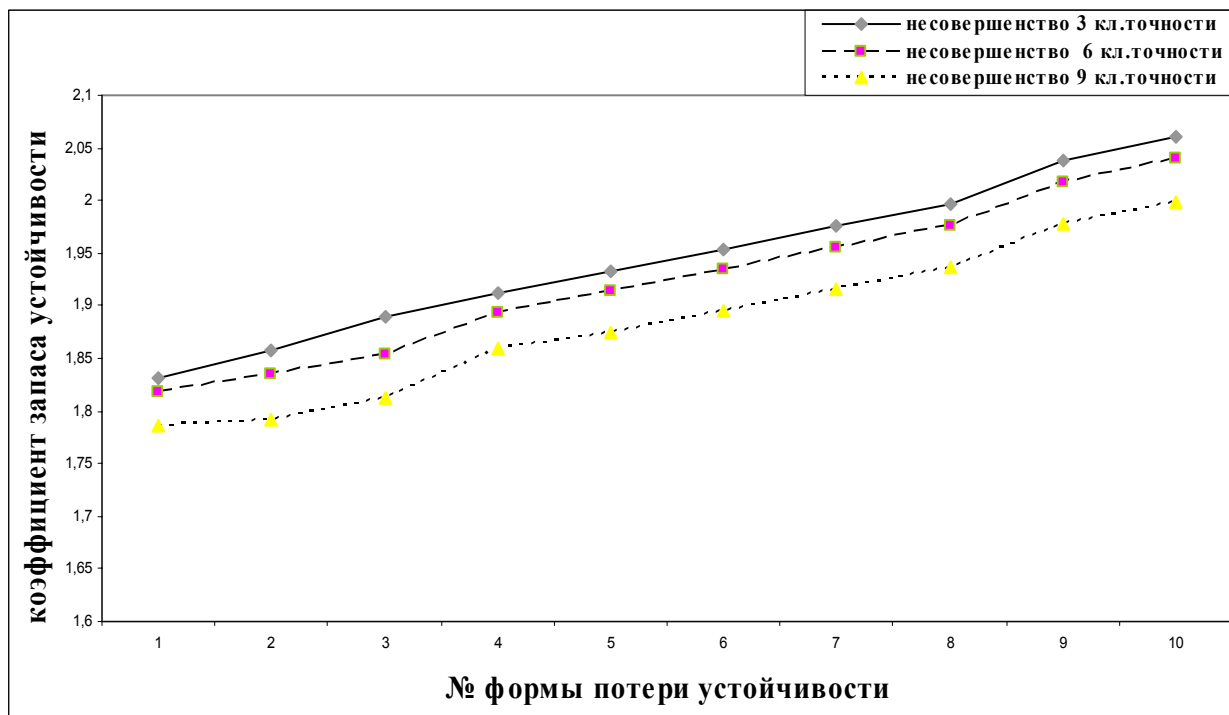


Рис.9. Сравнение величин надежности шести типов двухпоясных сетчатых куполов для шести уровней систематических несовершенств (нелинейный расчет):

а — сочетание нагрузок (I); б — сочетание нагрузок (III).

(а)



(б)

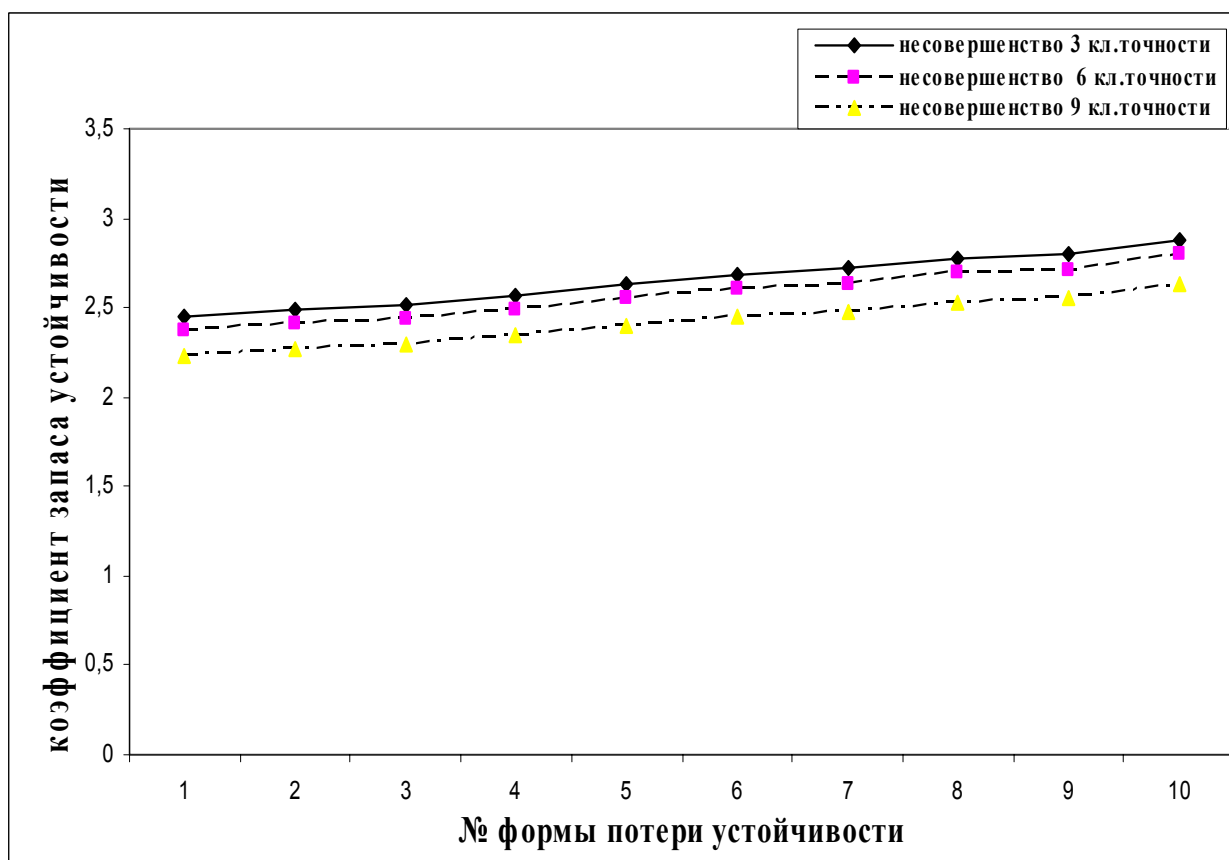


Рис.10. Влияние несовершенств на коэффициент запаса устойчивости в куполе Шведлера:

а — сочетание нагрузок (I); б — сочетание нагрузок (III).

В работе сформулированы некоторые общие рекомендации по назначению геометрических параметров двухпоясных сетчатых куполов, влияющих на их несущую способность и надежность.

В четвертой главе для более объективной оценки рассматриваемых типов куполов проведено их экономическое сравнение по стандартной методике. Это сравнение показало, что сетчатые купола с шестиугольными сетками поясов требует меньших затрат на возведение купола. Из сравнения видно также, что купола с треугольными решетками являются самыми затратными из всех рассмотренных в работе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Применение электронно-вычислительных машин большой мощности дает возможность инженеру выполнить прямой расчет двухпоясных сетчатых куполов значительных пролетов, представляемых как многоэлементные стержневые системы, у которых число узлов и стержней исчисляется десятками, а то и сотнями тысяч. Возможности современных программных комплексов позволяют произвести детальное сравнение распределений усилий и напряжений в куполах различных типов, выявить преимущества и недостатки каждого из этих типов и остановиться на том, который наилучшим образом соответствует специфическим условиям эксплуатации.
2. С использованием программного комплекса **Formian** была смоделирована геометрия двухпоясных многоэлементных сетчатых куполов с сетками шести типов. С помощью программных комплексов **SAP 2000** и **Robot Millennium** были проведены статические расчеты этих куполов без учета и с учетом геометрической нелинейности, а также расчеты их на устойчивость при одинаковых загрузочных условиях и основных геометрических параметрах.

3. Произведен сравнительный анализ несущей способности рассматриваемых в работе типов двухпоясных сетчатых куполов, позволивший в комплексе оценить преимущества и недостатки каждого из куполов.
4. Предложена методика приближенной оценки первоначальной надежности куполов с учетом начальной гибели сжатых элементов. Получены количественные величины надежности для рассматриваемых типов куполов. Выявлено, что наибольшей надежностью обладают двухпоясные купола с треугольными сетками, с трапециевидными сетками, с разными сетками для поясов и купол Шведлера.
5. Предложен прием назначения систематических начальных геометрических несовершенств элементов куполов, связанных с условиями их изготовления, заключающийся в температурном расчете на первоначальном этапе и принятия полученной формы куполов за исходную. Этот прием позволяет сравнительно просто моделировать приемлемые варианты несовершенств и является удобным для вычисления вероятности разрушения многоэлементной конструкции.
6. Способ моделирования систематических геометрических несовершенств был использован при определении критических нагрузок для куполов с использованием компьютерных программ. Произведено сравнение вероятности отказа для различных типов сеток куполов.
7. Произведено экономическое сравнение куполов рассматриваемых типов при использовании стандартной методики и данных зарубежных и российских строительных организаций. Сравнение представлено в табличной форме.
8. Выработаны сравнительные рекомендации по применению разных вариантов двухпоясных сетчатых куполов.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. **Абусамра Аттальяманан А.Ю.** История развития и применения двухпоясных сетчатых куполов/ Ю.А. Веселев // Легкие строительные конструкции: Сборник научных трудов.– Ростов н/Д: РГСУ, 2004. – С. 79-85 (лично автором -5 с.).
2. **Абусамра Аттальяманан А.Ю.** Расчет на ЭВМ двухпоясных сетчатых куполов с различными типами решеток/ Ю.А. Веселев // Строительство-2005: Материалы Междунар. науч-практ. конф. – Ростов н/Д: РГСУ, 2005. – С.40-41 (лично автором -1 с.).
3. **Абусамра Аттальяманан А.Ю.** К вопросу о надежности двухпоясных сетчатых куполов/ Ю.А. Веселев // Легкие строительные конструкции: Сборник научных трудов – Ростов н/Д: РГСУ, 2006. - С. 147-154 (лично автором- 6 с.).
4. **Абусамра Аттальяманан А.Ю.** К вопросу о приближенной оценке надежности двухпоясных сетчатых куполов // Промышленное и гражданское строительство, 2007, №6. - С. 14.

Подписано в печать 08.11.06. Формат 60 х 84/ 16.

бумага писчая. Ризограф. Уч.-изд. Л. 1,0. Тираж 100 экз. заказ 729.

Редакционно-издательский центр

Ростовского государственного строительного университета.

344022, Ростов н/Д, ул. Социалистическая, 162