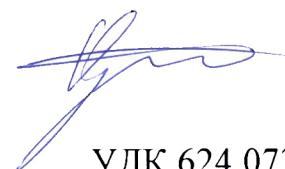


Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи

Оржеховский Анатолий Николаевич



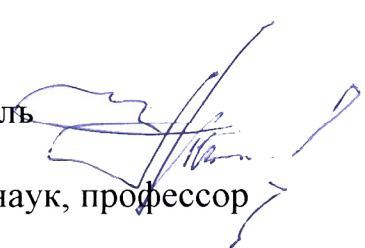
УДК 624.072.21

**ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ПРОЕКТИРУЕМЫХ И
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ РАМНО-КОНСОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
НАД ТРИБУНАМИ СТАДИОНОВ**

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Мущанов В.Ф.
доктор технических наук, профессор



Идентичность всех экземпляров диссертации заверяю
Ученый секретарь
специализированного диссертационного совета Д01.006.02



Я.В. Назим

Макеевка – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	12
1.1. Анализ конструктивных форм покрытий над трибунами стадионов.....	14
1.1.1. Проектные решения рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.....	16
1.1.2. Обзор и классификация причин аварийности металлических конструкций.....	21
1.2. Современные методы обеспечения надежности и живучести при проектировании уникальных конструкций.....	25
1.2.1. Анализ расчетных методов обеспечения надежности сооружений.....	25
1.2.2. Способы современных нормативных документов для обеспечения заданного уровня надежности конструкции.....	31
1.2.3. Методика расчета коэффициентов надежности в современных строительных нормах	33
1.2.4. Современные методы обеспечения живучести металлоконструкций.....	35
1.3. Влияние податливости основания и геометрических дефектов, полученных при монтаже, на напряженно-деформированное состояние рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.....	39
1.3.1. Влияние податливости основания и просадок фундаментов на напряженно-деформируемое состояние конструкции.....	39
1.3.2. Влияние геометрических несовершенств конструкции полученных при монтаже на напряженно-деформируемое состояние.....	41
1.4. Постановка целей и задач исследования.....	42
РАЗДЕЛ 2. ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	44
2.1. Алгоритм определения показателей надежности проектируемого и эксплуатируемого рамно-консольного покрытия над трибунами стадион.....	45
2.1.1. Алгоритм определения группы наиболее ответственных элементов конструкции характеризующих надежность системы в целом.....	47
2.1.2. Выбор наиболее приемлемого метода расчета вероятности отказа конструкции.....	48
2.2. Учет вероятностного характера действия снеговой нагрузки.....	51

2.3. Учет начальных геометрических несовершенств сечений и прочностных свойств металлопроката.....	51 53
2.4. Учет вероятностного характера геометрических несовершенств, получаемых конструкцией на монтаже.....	56
2.5. Учет возможных просадок основания в процессе эксплуатации, в вероятностной схеме метода конечных элементов.....	58
2.6. Выводы по второму разделу.....	59
РАЗДЕЛ 3. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВЫБРАННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ РАМНО-КОНСОЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА.....	62
3.1 Методика анализ живучести стационарных рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов.....	62
3.2. Варьируемые параметры выбранной конструктивной схемы покрытия над трибунами стадионов.....	65
3.3. Анализ живучести рассматриваемой конструктивной схемы.....	69
3.4. Алгоритм вычисления характеристик надежности системы.....	75
3.5. Исследование реальных прочностных свойств металлопроката прямоугольных гнуто-сварных труб.....	78
3.6. Исследование вероятности отказа, обусловленной изменчивостью снеговых нагрузок.....	82
3.7. Исследование изменчивости показателей надежности конструкции, обусловленное податливостью основания и геометрических несовершенств получаемых конструкцией при монтаже.....	85
3.8. Исследование изменчивости показателей надежности конструкции, обусловленное начальными геометрическими несовершенствами плоских сечений металлопроката.....	91
3.9. Учет совместного действия вышеперечисленных факторов, при определении показателей надежности рассматриваемых схем.....	95
3.10. Выводы по разделу.....	96

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ РАССМАТРИВАЕМЫХ СХЕМ РАМНО-КОНСОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРИДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ.....	99
4.1. Разработка алгоритма расчета коэффициента условий работы γ_c и подбора требуемых сечений элементов, основанного на обеспечении заданного уровня надежности элемента, как части системы.....	100
4.2. Нормирование коэффициента условий работы для рассматриваемого типа конструкции.	105
4.3. Обобщенная оценка надежности и живучести конструкции в целом на основании разброса значений характеристики безопасности β	109
4.4. Экономические характеристики конструкции при обеспечении требуемого уровня надежности конструкции.....	113
4.5. Выводы по разделу.....	117
ВЫВОДЫ.....	119
Литература.....	121
Приложение А	
Акты и справки внедрения результатов диссертационной работы.....	134
Приложение Б	
Подбор сечения элементов стального рамно-консольного стационарного покрытия над трибунами стадиона с учетом требований надежности на примере эксплуатируемого деформационного блока покрытия южной трибуны главного игрового поля СК «Олимпик» в городе Донецке.....	137
Приложение В	
Таблица коэффициентов условий работы для стационарных стальных стержневых рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. За последние годы научно-технический прогресс и возросшие требования к спортивно – зрелищным сооружениям дали толчок дальнейшему строительству спортивных сооружений во всем мире.

Для современных стадионов характерна универсальность, выражающаяся в возможности проведения многопрофильных спортивных мероприятий и культурных программ. Наряду с удовлетворением требований спортивной технологии при проектировании стадионов ставится задача обеспечения максимальных удобств для зрителей. Одним из аспектов этой задачи является защита трибун от атмосферных осадков, что достигается введением в состав конструкций стадионов различного рода навесов, козырьков, покрытий.

Наиболее распространенными конструктивными формами покрытий над трибунами, при строительстве новых стадионов, являются рамно-консольные конструкции или, в некоторых случаях, их отдельные элементы (как правило, это консольные фермы, выступающие в качестве основных несущих конструкций покрытия). Наряду с новым строительством, рамно-консольные системы покрытий получили широкое распространение при реконструкции уже существующих сооружений. Наиболее показательными примерами могут выступать стадионы: «Арена-Львов» в г. Львов, «Металлист» в г. Харьков, стадион «Днепр-Арена» г. Днепропетровск и т.д.

Все это делает актуальной задачу разработки методики вычислений характеристик безопасности конструкций стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов и корректировки механизма обеспечения надежности таких конструкций в рамках метода предельных состояний.

Степень разработанности темы исследования. Современные строительные нормы требуют обеспечения заданного уровня надежности всех возводимых конструкций. Но для уникальных конструкций (под определение которых попадают рассматриваемые покрытия) нормативные документы не предоставляют в полной мере инструментов их обеспечения, ссылаясь на вероятностный расчет надежности. При этом методика вычисления характеристик надежности приведена в общем виде

и не имеет четкой структуры или алгоритма действий. Поэтому, значение вероятности отказа запроектированной конструкции, как правило, остается неизвестным для инженера.

Развитие существующих основ теории надежности и вероятностного расчета конкретных конструкций, учета особенностей различных воздействий на эти конструкции, в том числе, обусловленных метеорологическими факторами связаны с такими именами как: Н.С. Стрелецкий, А.Р. Ржаницын, В.В. Болотин, А.Ф.Смирнов, А.А. Чирас, А.П. Кудзис, В.Д. Райзер, С.А. Тимашев, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин, В.Ф. Мущанов, В.А. Пашинский, Б.Н. Кошутин, А.М. Айзен, Otto F., F. Thoft-Christensen, Soltani M., Taylor R.Y. [2, 46, 50, 59, 60, 62, 65, 66, 68, 70, 76, 89, 95]. По результатам обзора работ приведенных авторов выявлены основные факторы, влияющие на надежность рассматриваемых конструкций: отклонение геометрических характеристик плоских сечений и прочностных свойств металлопроката от нормативных значений, геометрические несовершенства, получаемые конструкцией на монтаже, стохастическая изменчивость снеговой нагрузки, просадки основания и фундаментов. Исходя из этого, можно сделать вывод о необходимости дальнейших исследований в области разработки методики численного определения характеристик надежности уникальных конструкций.

Теоретической базой для разработки данного исследования стали работы ученых и их учеников: Хога Э., Комкова В., Шпете Г., Райзера В.Д., Мущанова В.Ф., Рудневой И.Н., Прядко Ю.Н., Пашенко А.Н. [50,55,56,63,74,93,96].

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик:

1. Д-2-02-13 «Разработка уточняющих методов расчета напряженно-деформированного состояния элементов стальных строительных конструкций зданий и инженерных сооружений» (2013-2014 гг., гос.рег. №0113 U 001918), Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДонНАСА);

2. Д-2-02-11 «Разработка комплексной модели обеспечения надежности большепролетных покрытий над трибунами стадионов на стадии проектирования, изгото-

товления, монтажа и эксплуатации» (2011-2012 гг., гос.рег. №0111 U 001808), ДонНАСА;

3. Д-1-01-17 «Разработка концепции создания социального жилья и восстановления объектов инфраструктуры на территориях пострадавших от военных действий» (2017-2018 гг., гос.рег. №0117 D 000217), ДонНАСА;

а также кафедральной темы К-2-07-16 «Усовершенствование аналитических и численных методов расчетов строительных конструкций, их элементов и соединений на действие статических и динамических нагрузок с учетом воздействия факторов износа и фактической нелинейной работы материала» (2017-2020 гг., гос.рег. № 0117D000262), ДонНАСА.

Цель работы: разработка методов расчета и проектирования стальных стержневых рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов на основе численного определения показателей надежности с учетом изменчивости значимых проектных и эксплуатационных факторов.

Задачи исследования:

- разработать алгоритм определения показателей надежности проектируемого или эксплуатируемого рамно-консольного покрытия над трибунами стадиона, основанного на вероятностной схеме метода конечных элементов с учетом возможной просадки основания и случайного характера значимых факторов (прочностные характеристики и геометрические несовершенства фасонного металлопроката, геометрические несовершенства, получаемые конструкцией при монтаже, снеговые нагрузки).

- путем экспериментальных исследований (замерами фактических геометрических размеров сечений прокатных профилей, испытаниями образцов на разрыв) сформировать выборки значений случайных факторов для проведения статистического анализа.

- осуществить мониторинг несущих конструкций стационарных покрытий над трибунами стадионов с целью формирования выборки данных о фактических геометрических несоответствиях положения узлов конструкций заданной геометрии.

- выполнить анализ влияния случайного характера значимых факторов проектирования на показатели надежности запроектированных конструктивных форм рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов на основе разработанного алгоритма.

- разработать рекомендации по проектированию рассматриваемых схем рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов с использованием метода предельных состояний, в частности: разработать алгоритм расчета и предложить уточненные значения коэффициента условий работы γ_c для основных групп элементов рассматриваемых покрытий, а также, разработать критерий для оценки склонности конструкций к лавинообразному разрушению.

Объект исследования – стержневые конструкции стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.

Предмет исследования – показатели надежности стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов и методика их вычислений.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые на основе анализа полученных схем разрушения стальных рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов предложен алгоритм расчета и проектирования конструкций и их отдельных элементов с учетом геометрической и конструктивной нелинейности работы системы, позволяющий обеспечить требуемый уровень надежности конструкций повышенной ответственности;

- впервые установлены зависимости степени влияния вероятностных параметров проектирования на надежность исследуемой конструкции;

- на основе анализа возможных схем разрушения и учета влияния изменчивости случайных факторов для наиболее ответственных элементов рассматриваемой конструкции уточнен алгоритм вычисления коэффициента условий работы γ_c ;

- впервые предложен подход к анализу живучести проектируемой конструкции и ее склонности к лавинообразному разрушению на основании изменения параметра характеристики безопасности (дальности отказа) $\Delta\beta$.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

- на основе разработанного алгоритма получено выражение для вычисления корректного значения коэффициента условий работы конструкции γ_c , для наиболее ответственных элементов, обеспечивающее требуемый уровень надежности в рамках метода предельных состояний;

- для исследуемой конструкции предложена методика определения верхней и нижней границ надежности;

- разработана общая методика расчета и проектирования стальной шарнирно-стержневой рамно-консольной конструкции покрытия над трибунами стадиона, с конечным определением показателей надежности проектируемой или эксплуатируемой конструкции;

- предложен алгоритм определения обобщенной характеристики резерва прочности, на основании которой выполняется оценка склонности системы к лавинообразному обрушению.

Методология и методы исследования. Поставленные в работе задачи решаются с использованием следующих методов:

- методы математического моделирования;
- метод конечных элементов;
- метод физического моделирования с применением методов теории подобия;
- экспериментальные методы исследования, в том числе разрушающие методы определения прочностных характеристик материала;
- методы математической статистики.

Также используются универсальные программные пакеты MATLAB, MATCAD, Microsoft Excel.

Личный вклад соискателя заключается в следующем:

Наиболее существенные научные результаты, полученные автором, состоят из анализа, обобщения, систематизации и статистической обработки результатов численных и экспериментальных исследований, а также заключаются в следующем:

- сбор, анализ, обобщение теоретических и экспериментальных данных, по расчету конструкций стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов[111];

– подготовка и проведение исследований прочностных и геометрических характеристик фасонного металлопроката в виде гнутых замкнутых сварных прямоугольных труб [12, 53];

– разработка методики оценки надежности рамно-консольных стационарных покрытий над трибунами стадионов, в том числе, на предмет возможности возникновения лавинообразного разрушения системы [52, 54];

- разработка методики подбора сечений стержневых элементов рамно-консольных стационарных покрытий над трибунами стадионов с учетом требований надежности [73, 111];

На защиту выносятся:

- алгоритм расчета и проектирования стальных стержневых конструкций и их отдельных элементов с учетом геометрической и конструктивной нелинейности работы системы;

- методика вычисления скорректированного коэффициента условий работы γ_c , для уникальных стальных конструкций рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов;

- комплексный подход к анализу живучести проектируемой конструкции и ее склонности к лавинообразному разрушению на основании изменения параметра характеристики безопасности (дальности отказа) $\Delta\beta$;

- результаты исследования геометрических свойств плоских сечений и прочностных характеристик гнуто-сварных прямоугольных труб некоторых украинских производителей.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты работы и материалы исследований докладывались и обсуждались на шести научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка) в 2012-2016 гг.,

конференции «Энергоэффективность и устойчивое развитие в гражданском строительстве» (SPbEES-2017, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2017 г.).

В полном объеме диссертация доложена на расширенном заседании кафедры теоретической и прикладной механики ДонНАСА (31.08.2017 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 5 научных работах, из которых 1 публикация – в рецензируемом научном издании, утвержденном перечнем ВАК МОН ДНР, 3 – опубликованы в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины, 1 публикация – в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук в Российской Федерации. Общий объем публикаций 2,3 п.л., из которых 1,0 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из вступления, четырех разделов, выводов, списка использованных источников и трех приложений. Работа изложена на 144 страницах, в том числе 109 страниц основного текста, 11 полных страницы с рисунками и таблицами, 13 страниц списка источников, 11 страниц приложений.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Современные строительные конструкции должны в полной мере отвечать требованиям надежности и живучести. К сожалению, в нормативной литературе [26, 32, 104] отсутствуют четкие методики анализа надежности и живучести конструкций.

Одним из первопроходцев в области надежности строительных конструкций выступал Н.С. Стрелецкий [82,83]. В своих работах он впервые ввел понятие статистического учета надежности сооружений по средствам ввода в расчет коэффициента запаса надежности.

В 50- тых годах большой вклад в развитие вероятностных методов расчета сделали такие известные ученые как :В.А. Балдин, А.А. Гвоздев, И.И. Гольденблат, В.И. Коченов, М.Я Пильдиш, Н.С. Стрелецкий [6, 13, 14, 17, 49, 84].

Дальнейшими вопросами усовершенствования методов предельных состояний и вопросами надежности занимались Н.С. Стрелецкий, А. Р. Ржаницын [71, 72, 82]. В дальнейшем в этом направлении проводил исследования В.В. Болотин. Он значительно продвинул научные изыскания как в области численного определения характеристик надежности, так и методику расчета по предельным состояниям [9, 10]. Под его руководством в 1990 г. был разработан и внедрен ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения» [25].

Рассмотрим некоторые работы по тематике надежности металлических конструкций применительно к рамно-консольным конструкциям покрытия над трибунами стадионов.

В работе Пашенко А.Н. [63] предложен и детально рассмотрен алгоритм вычисления характеристик безопасности элементов конструкций промышленных зданий, базирующийся на методе конечных элементов в вариационной постановке. Но совершенно не рассматриваются вопросы живучести и ее оценки. Не учитываются особенности вычисления надежности при ранжировании конструкций по классам и категориям ответственности.

В работе [101] рассмотрена методика оценки надежности строительных железобетонных конструкций, приведены основные факторы, влияющие на надежность, но полностью опущен момент обеспечения живучести рассматриваемых конструкций. Детально рассмотрены численные способы вычисления надежности, но связь с инженерной методикой прослеживается слабо.

В работе [67] разработаны методики определения надежности индивидуальных элементов в составе металлических конструкций, а также металлических конструкций в целом, отличающиеся от существующих тем, что позволяют определять надежность при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах на основе теории возможностей, но вызывает тревогу, тот факт, что автор допускает развитие пластических деформаций в элементах системы, а это неминуемо приведет к уменьшению надежности системы в целом. Вопросы обеспечения живучести так же не были рассмотрены.

Делая выводы по краткому выполненному анализу результатов проведенных ранее исследований, следует отметить:

1. Анализ надежности и живучести конструкций является важной составляющей инженерного расчета конструкций, который требуют выполнять современные нормы строительства, особенно для таких ответственных сооружений как конструкции покрытий над трибунами.

2. Вопросы обеспечения живучести и надежности таких конструкций повышенной ответственности, как покрытия над трибунами стадионов, на данный момент не достаточно рассмотрены и нуждаются в изучении.

1.1 Анализ конструктивных форм покрытий над трибунами стадионов

Наилучшие достижения архитектурной и инженерной мысли, «подталкиваемые» все более ужесточающимися требованиями UEFA и FIFA, реализовалось в стадионах новой формации, так называемого уровня «5 звезд», которые представляют собой уникальные сооружения, включающие в себя многофункциональные культурно-развлекательные комплексы, являющиеся архитектурной, культурно-

досуговой и, естественно, спортивной доминантой города, которому они принадлежат.

Таблица 1.1

Перечень пятизвездочных стадионов UEFA

Название стадиона	Город	Страна	Вместимость
Amsterdam Arena	Амстердам	Нидерланды	51 620
Ataturk Olimpiyat	Стамбул	Турция	80 000
Olympiastadion	Мюнхен	Германия	63 573
Camp Nou	Барселона	Испания	98 000
O Dragao	Порто	Португалия	50 000
Ernst Happel Stadion	Вена	Австрия	50 000
OAKA Spiros Louis	Афины	Греция	72 080
Olimpico	Севилья	Испания	57631
Feijenoord	Роттердам	Нидерланды	52 000
NSH Nordbank Arena (AOL Arena)	Гамбург	Германия	57 274
Hampden Park	Глазго	Шотландия	52 054
Ibrox	Глазго	Шотландия	50 500
Jose Avalade XXI	Лиссабон	Португалия	50 000
ALuz	Лиссабон	Португалия	65 000
Luzhniki	Москва	Россия	84 000
Millenium	Кардиф	Уэльс	72 500
Old Trafford	Манчестер	Англия	67 400
Olympic Stadium	Берлин	Германия	74 228
San Siro	Милан	Италия	85 700
Oimpico de Montjuic	Барселона	Испания	56 000
Santiago Bemabeu Stadium	Мадрид	Испания	80 400
Signal Iduna Park	Дортмунд	Германия	67 000
Stade de Trance	Париж	Франция	78 782
Vicente Calderon	Мадрид	Испания	54 500
Sukru Saracoglu	Стамбул	Турция	50 509
Veltins-Arena (Arena Auf Schalke)	Гельзенкирхен	Германия	61 481
Donbass Arena	Донецк	Украина	51 504
NSK Olimpiyskiy	Киев	Украина	70 000
Stadion Narodowy	Варшава	Польша	65 500

В источнике [19] приведен перечень пятизвездочных стадионов UEFA. Они перечислены в таблице 1.1. С точки зрения конструктивного решения 36% покрытий представлены балочными и рамно-консольными покрытиями, 14% - вантобалочные покрытия, 18% - подвешенные оболочки и структуры, 25% - стержневые оболочки покрытий, 7% - висячие покрытия (вантовые сети и мембранные оболочки). Рассмотрим более детально эти виды конструкции.

Стержневые оболочки покрытий имеют выразительную архитектурную форму, достаточную жесткость и довольно просты в изготовлении, но кольцевые выпуклые покрытия такого масштаба некруглой формы плана, как правило имеют значительные изгибающие моменты из плоскости покрытия, что значительно утяжеляет конструкцию и они сильно подъемисты. Это приводит к затенению поля, плохой вентиляции арены и не защите зрителей первых рядов от «косого» дождя. Висячие оболочки покрытия так же имеют выразительный архитектурный вид, материал конструкции работает наиболее экономично, имеют малую собственную массу. Но анализ построенных кольцевых покрытий над трибунами стадионов показал их основные недостатки: у висячих систем в виде кольцевых мембран или сетчатых оболочек есть сложности с отводом воды и, как правило, неизбежен значительный подъем опорного контура над трибунами для обеспечения обзора арены с верхних рядов. К тому же достаточно сложен процесс монтажа этих систем. Материал в вантобалочных и подвешенных покрытиях работает более рационально, чем в балочных и рамных конструкциях, но их недостатком является массивность фундаментов и базовых узлов для жесткой фиксации мачт, к которым подвешиваются конструкции покрытия, а также некоторая «загроможденность» опорными мачтами и оттяжками пространства за пределами стадиона, при их выносе в эту зону.

Наибольшую долю покрытий над трибунами стадионов составляют балочные и рамные конструкции. Это может быть объяснено тем, что конструкции такого типа имеют ряд преимуществ. Они обладают достаточной жесткостью, довольно просты в изготовлении и монтаже (относительно остальных конструктивных решений), а также для них имеется большой мировой опыт проектирования. Основным недостатком рамно-консольных покрытий является менее рациональная работа материала

ла конструкций, по сравнению с другими конструктивными решениями. Но он компенсируется, в некоторых случаях, простотой получаемой системы. Так же, следует отметить, что не всегда возможно или целесообразно применение других видов покрытий (в силу экономических, геологических или каких либо других требований). В качестве основного достоинства следует привести возможность монтажа конструкции по секциям, причем каждая секция может выступать как отдельно стоящая конструкция. Это актуально в условиях непостоянного финансирования строительства.

Данный тип покрытия над трибунами удобно применять при реконструкции устаревших стадионов, каких имеется большое количество на постсоветском пространстве. В нашем регионе примером могут выступить стадионы «Металург» г. Донецк и «Авангард» г. Макеевка.

1.1.1 Проектные решения рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов

В связи с проведением Евро-2012 в Украине и Польше количество стадионов отвечающих требованиям международных футбольных федераций увеличилось. Не претендуя на полноту обзора, рассмотрим основную часть из них, имеющих рамно-консольную конструкцию покрытия над трибунами.



Рис 1.1. Стадион «Донбасс Арена» в городе Донецк.

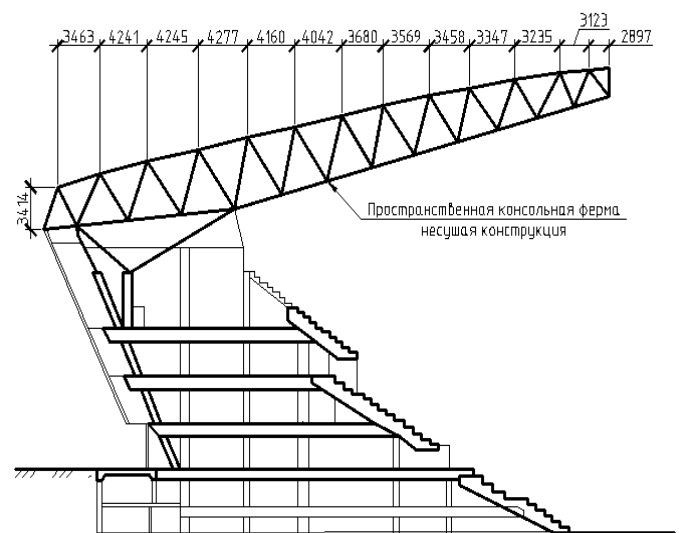


Рис. 1.2. Разрез по трибунам стадиона «Донбасс Арена» в городе Донецк.

Домашний стадион донецкого футбольного клуба «Шахтер»- «Донбасс Арена», является стадионом удовлетворяющим всем требованиям UEFA (рис. 1.1, 1.2) [18, 19]. Общая вместительность которого составляет 51504 человек. Строительство стадиона было начато в 2005 году.

Почти все работы на стадионе оказались уникальными, возведение такого рода объекта в Украине осуществлялось первый раз. Трибуны стадиона на 93 процента накрыты массивной, несколько куполообразной крышей. Крыша не накрывает 3800 зрительских мест. Отметим, что вес всех металлоконструкций крыши более шести тысяч тонн. В то же время, высота крыши составляет порядка 54 метров. Крыша сконструирована так, что нет не только консольных крепежей снаружи арены, но и опор на внутренней поверхности чаши стадиона. Для того чтоб обеспечить попадание на поле максимального количества света солнца, а также более хорошего обеспечения проветривания футбольного газона, и крыша, и трибуны стадиона сделаны с небольшим наклоном в сторону юга. Конструкции крыши представляют собой пространственные структурные блоки, опирающиеся на пространственные консольные фермы.



Рис. 1.3. Внутреннее поле стадиона «Арена-Львов».

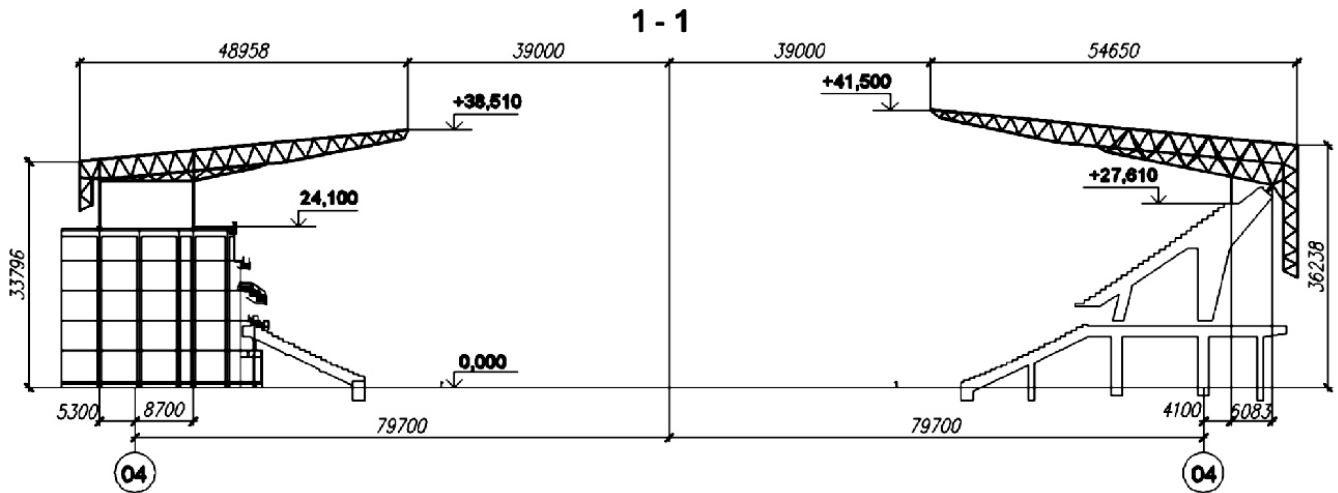


Рис. 1.4. Поперечный разрез по трибунам стадиона «Арена-Львов» (запад-восток).

Одним из четырех стадионов принимавшего матчи чемпионата Европы является львовский стадион «Арена-Львов». Основные проектные решения стадиона разработаны с учетом стандартов УЕФА (рис. 1.3, 1.4) [19].

Покрытие разделено на одиннадцать конструктивных блоков, каждый из которых включает прогоны, структурные конструкции, стропильные фермы, опорные стойки и опоры. Прогоны служат креплением конструкций кровли и стенового ограждения. Структурные конструкции покрытия и фасадов имеют ортогональное расположение поясов и образуют прямоугольные ячейки размерами около 3,3 x 3 м. Структурные конструкции покрытия опираются на консольные фермы переменной высоты, расположенные с шагом 10 м в центральных и 11,25 градуса по радиусам кругов в угловых секторах. Стропильные фермы консоли длиной до 19 м опираются на железобетонные пилоны трибун с использованием удаленных на 6 м друг от друга специально разработанных опор. Опоры крепятся к железобетонным пилонам трибун с помощью анкерных болтов.

Стадион «Металлист» может принять 43000 зрителей (рис. 1.5, 1.6) [19, 87]. Каркас покрытия решен в виде замкнутого опорно-подстропильного контура, состоящего из опирающихся на железобетонные фундаменты с шагом от 16 м до 64 м V-образных опорных стоек высотой 22,3 м и связывающих эти стойки подстропильных ферм высотой 6 м с отметкой оси верхнего пояса 24 м (рис. 1.6).



Рис. 1.5. Стадион «Металлист» в городе Харькове.

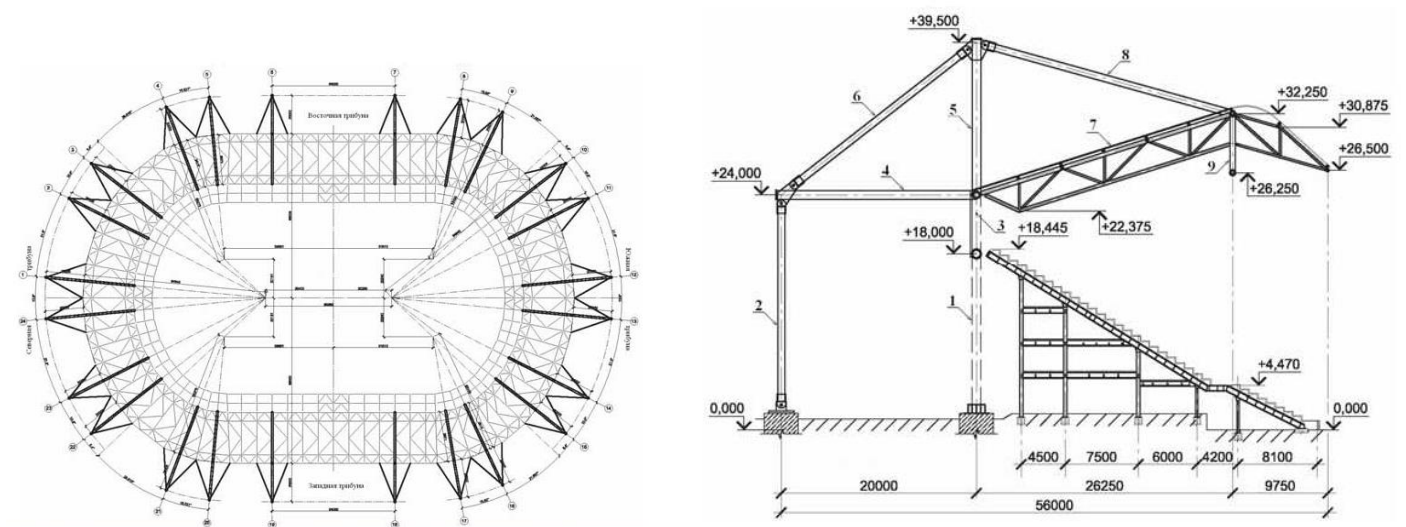


Рис. 1.6. Конструкции покрытия стадиона «Металлист» в городе Харькове: 1 – V-образная опорная стойка; 2 – внешняя опорная стойка; 3 – опорно-подстропильный контур; 4 – распорка; 5 – стойка-надстройка; 6 – раскос; 7 – стропильная ферма; 8 – раскос; 9 – подстропильная ферма.

В 20 м от опорно-подстропильного контура расположены внешние опорные стойки поперечных рам, также объединенные в общую систему каркаса. В свою очередь, к внешним опорным стойкам через систему раскосов подвешены стропильные фермы над трибунами. К стропильным фермам поперечных рам на расстоянии 26,25 м, от V-образных опорных стоек, подвешены подстропильные фермы высотой 6 м с отметкой верхнего пояса 32,25 м, разделяющие стропильные фермы на две части – ос-

новную пролетом 26,25 м и консольную вылетом 9,75 м. Шаг стропильных ферм принят от 8,0 м до 9,0 м, а в отдельных местах достигает 12,0 м. Основная часть стропильных ферм запроектирована высотой 3,0 м с параллельными поясами, уклон которых составляет $17,8^\circ$ от футбольного поля, и длиной панели 4,375 м.



Рис. 1.7. Стадион Днепр-Арена в городе Днепр.

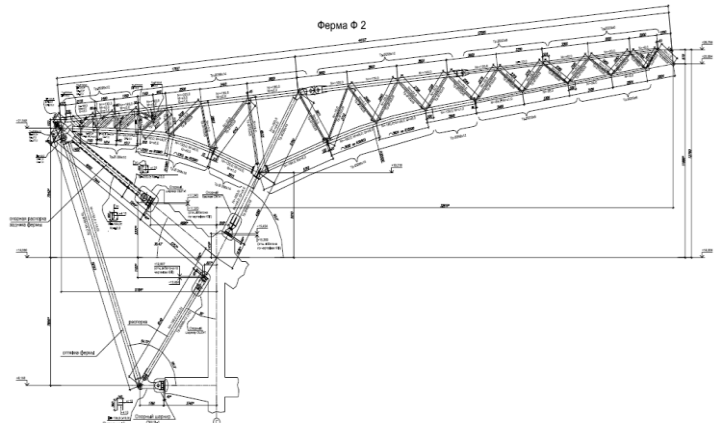


Рис. 1.8. Схема несущей консольной фермы с системой опирания и оттяжек.

Стадион Днепр-Арена имеет вместимость 31000 зрителей. Несущий каркас козырькового покрытия над зрительскими трибунами решен в виде системы двухконсольных решетчатых ферм, расположенных по периметру стадиона с шагом 10,2 - 10,7 м, который соответствует шагу рам каркаса нижерасположенных опорных железобетонных конструкций (поперечников трибун, каркаса VIP-корпуса). Общее количество несущих ферм козырькового навеса – 56. В пролетах между фермами с шагом 3,0 - 3,6 м устанавливается регулярная система решетчатых прогонов, по которым укладывается кровельное покрытие. Несущие двухконсольные фермы запроектированы плоскими, переменной высоты, из трубчатых профилей. Для ферм над трибунами вылет передней козырьковой консольной части от опор оставляет 27 м, а вылет задней (хвостовой) консоли составляет 17,15 м. Для ферм над VIP-корпусом эти вылеты составляют соответственно 32,8 м и 14,0 м.

Делая выводы по пункту 1.1.1, можно сказать о значительном распространении рамно-консольных стальных конструкций стационарных покрытий над трибунами стадионов в реальной практике проектирования и строительства, как применяемых самостоятельно, так и совместно с другими конструктивными системами, в качестве

основных несущих конструкций. Этот факт объясняется рядом преимуществ, к которым относятся: малая трудоемкость при расчете конструкций (по отношению к другим конструктивным формам), меньшая трудоемкость при изготовлении и установке, простота обслуживания, возможность поэтапного строительства (в некоторых случаях), большая инженерная «проработанность». К сожалению, имеется и ряд недостатков, основными из которых являются: массивность конструкций при перекрытии больших площадей, материал конструкций работает наименее рационально (по сравнению с другими видами покрытий).

Исходя из того, что большая часть конструкций покрытий над трибунами стадионов являются все-таки балочными и рамными конструкциями (несмотря на их недостатки), в данной работе будут рассматриваться рамно-консольные системы покрытий.

1.1.2 Обзор и классификация причин аварийности металлических конструкций

Наиболее разработанным в теории надежности строительных конструкций является направление, развивающее представление о надежности, как о функции коэффициента запаса прочности, при этом сами понятия «коэффициент запаса» и «прочность» толкуются в достаточно обобщенном смысле. На первый взгляд такой подход выглядит разумным, но при более детальном анализе выясняется, что в числе причин отказов конструкций, кроме случая превышения случайной нагрузкой случайного значения несущей способности (т.е. недостаточность коэффициента запаса), присутствуют и многие другие (недостаточная изученность работы конструкции, ошибки при проектировании, изготовлении и монтаже, нарушения правил эксплуатации и т.п.) [8, 35, 45,75]. Подтверждением сказанному выше могут служить причины аварий стальных конструкций, данные о которых, заимствованные из различных источников [64] и относящиеся как к зданиям и сооружениям общего назначения, так и к специальным объектам, приведены в таблице 1.2. В таблице 1.2 учтены только отказы, приведшие к аварийному обрушению конструкций. При рассмотрении статистики причин аварий следует считаться с определенным перекосом оце-

нок в сторону завышения причины «Неудачное проектное решение, ошибки проекта».

Таблица 1.2

Статистика аварий стальных конструкций.

Причины аварий	Причины аварий (%) зданий и сооружений различного назначения в различных источниках						Усреднение
	1	2	3	4	5	6	
Недоработка норм проектирования	5,6	8,2	10,0	-	-	-	4,0
Неудачное проектное решение, ошибки проекта	25,0	26,2	35,0	19,6	34,0	11,0	25,1
Низкое качество материалов	5,6	14,7	2,0	-	-	14,0	6,0
Дефекты изготовления и монтажа	38,8	41,0	39,0	57,2	48,9	65,0	48,3
Нарушение норм эксплуатации	25,0	9,9	12,0	23,1	17,1	7,0	15,7
Прочие причины	-	-	2,0	-	-	-	0,3

Это связано с тем, что в отличие от других участников строительного процесса проектировщики находятся в невыгодном положении, особенно в тех случаях, когда причина аварии не очевидна и ее сразу не удалось установить. Конкретный дефект изготовления или монтажа обрушившейся конструкции (например, дефектный сварной шов или отсутствие требуемого количества болтов) трудно отыскать в груде исковерканного металла. В то же время проект, по которому было возведено сооружение, может быть детально и всесторонне проанализирован и наличие даже незначительных ошибок, фактически, быть может, и не приведших к аварии, всегда будет обнаружено квалифицированной экспертизой и отмечено в акте расследования аварии.

В таблице 1.3 отображен характер связей между сроком эксплуатации и аварийностью. Данные таблицы 3 не дают основания для вывода об относительном падении аварийности с возрастом конструкции, хотя элементы такой тенденции имеются.

Дело в том, что «выбытие» неудачных конструктивных решений и объектов, изготовленных с дефектами, обычно происходит при небольших сроках эксплуатации.

Поэтому «выжившие» конструкции живут дольше (кроме того за очень старыми конструкциями часто устанавливается более тщательный уход и щадящий режим эксплуатации). Данная статистика рассмотрена в работе [115], где собраны данные по 594 случаям обрушения стальных конструкций, произошедшим в Германии примерно за 50 лет.

Таблица 1.3

Зависимость количества аварий от срока эксплуатации сооружений.

Продолжительность эксплуатации до обрушения, лет	Число аварий	%
1-10	142	32,4
11-20	87	19,9
21-30	38	8,7
31-40	17	3,9
41-50	33	7,5
51-60	21	4,8
61-70	29	6,6
71-80	11	2,5
Более 80	9	2,1
Не установлено	51	11,5
Всего	430	100,0

Если рассматривать статистику обрушений уникальных сооружений (к которым относятся покрытия стадионов большой вместительности) можно привести следующие примеры.

В 2011 год в Голландии обрушилось покрытие одной из трибун стадиона футбольного клуба Твенте во время реконструкции. Покрытие обрушилось во время реконструкции сооружения с целью расширения вместимости. Причиной обрушения стали ошибки во время выполнения строительно-монтажных работ, в результате чего две несущие балки не выдержали нагрузки и потеряли свою несущую способность (рис. 1.9а).

В 2010 году в Малайзии обрушился недостроенный стадион (рис. 1.9б). Конструкции исполнены только год. Вскоре здесь было запланировано проведение открытых игр, аналога универсиады, которые привлекают обычно тысячи зрителей и спортсменов. Причиной обрушения была названа халатность организации генпод-

рядчика при проведении строительно-монтажных работ. Ущерб оценивается в 25 миллиона малазийских ринггит, примерно 223,2 млн рублей.

а)



б)



Рис. 1.9. Аварии покрытий над трибунами стадионов:

а – стадион футбольного клуба Твенте в Голландии; б – стадион в Майлазии.

Среди известных примеров [4, 37, 113] частичных или общих отказов большепролетных покрытий также можно выделить: “Фонте-Нова” (Бразилия, 2013), “Фонте-Нова” (Бразилия, 2017), Grolsch Veste (Нидерланды, 2011), Minnesota Metrodome (1983), Миланский велотрек (1985) и т.д.

Согласно [3] главная причина отказов в строительстве с вероятностью 50% – ошибки проектирования. Другими причинами названы: нарушения технологии монтажа (17.5%); низкое качество материалов и конструкций (14.5%); недоработка нормативных документов (4%); прочие причины и их сочетания (14%). В работе [4]

приведены несколько иные данные: ошибки проекта – 25%; дефекты изготовления и монтажа – 48%; низкое качество материалов – 6%; недоработка норм проектирования – 4%; неправильная эксплуатация – 16%; прочее – 1%. Отличия данных в различных источниках можно объяснить нехваткой статистических материалов, несовершенством методики оценки причин аварий и т.п.

Анализируя рассматриваемые статистики можно сказать, что ошибки и несовершенства, полученные конструкцией при монтаже, негативно влияют на последующую эксплуатацию сооружения. Процент обрушений от данного типа дефектов значителен и пренебрегать данными фактами нельзя. При возведении ответственных сооружений контроль качества строительного-монтажных работ, а так же поступающих материалов и изделий на строительную площадку, должен быть значительно жестче, чем для конструкций имеющих меньшую степень ответственности. Несомненно, важную роль в вопросе улучшения качества монтажных работ играет выбранная технология монтажа. Следует максимально уменьшить число монтажных работ проводимых на высоте и перейти к посекционному монтажу, со сборкой секции на уровне отметки земли. Это позволит улучшить качество сборки и исключить значительное количество геометрических несовершенств конструкции.

1.2 Современные методы обеспечения надежности и живучести при проектировании уникальных конструкций

1.2.1 Анализ расчетных методов обеспечения надежности сооружений

Надежность - способность объекта выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени [34]. То есть служить заданный промежуток времени, без наступления каких-либо аварийных ситуаций.

Статистика аварий высоконадежных строительных конструкций не является настолько массовой, чтобы можно было получить на ее основе вероятностные параметры надежности конструкций. Поэтому широко применяется подход, когда на основании статистических исследований нагрузок, прочности материалов, свойств конструкций составляются вероятностные условия безотказной работы или отказа конструкций, из анализа которых получают оценки их надежности [5, 9, 10, 25,

26, 71, 72, 96, 102, 103, 106, 114] . В более конкретной постановке, обобщенное условие безотказной работы (неразрушимости) записывается в следующем виде:

$$\hat{Y}(t) = \check{R}(t) - \hat{S}(t) > 0; \quad (1.1)$$

где: $\check{R}(t)$ - обобщенная несущая способность конструкции или элемента (в большинстве случаев – случайное значение уровня предела текучести стали); $\hat{S}(t)$ - обобщенная нагрузка на конструкцию (в большинстве случаев - случайное значение напряжения (усилия) от внешних воздействий); $\hat{Y}(t)$ - характеристика резерва прочности или резерва несущей способности;

Отказом элемента будем считать переход резерва несущей способности в отрицательную область. Вероятность отказа $Q(t)$ определяется различным образом в зависимости от принятых вероятностных моделей нагрузок и прочности. Функция резерва несущей способности зависит от ряда случайных аргументов, в том числе от времени:

$$\hat{Y} = Y(t, \check{X}_1, \check{X}_2, \dots, \check{X}_n); \quad (1.2)$$

Вероятность отказа $Q(t)$ определяется различным образом в зависимости от принятых для рассмотрения вероятностных моделей нагрузок и прочности, а так же жесткостных характеристик элементов конструкции. Если аргумент и функция $\hat{Y}(t)$ представлены в виде случайных процессов [64, 66] (это происходит при условии представления нагрузок в виде стационарных и квазистационарных процессов), то вероятность невыполнения условия (1.1), то есть вероятность отказа, оценивается как число выбросов случайного процесса обобщенной нагрузки за случайный или постоянный уровень обобщенной несущей способности.

$$Q(t) = \omega_q f_Y(\beta) t (\beta \omega \sqrt{2\pi}); \quad (1.3)$$

где: ω_q и $f_Y(\beta)$ - эффективная частота и плотность распределения ординаты случайного процесса $\hat{Y}(t)$; $\beta = Y/\dot{Y}$ - характеристика безопасности; где Y - математическое ожидание, \dot{Y} - стандарт резервной несущей способности элемента; t - наработка элемента (отличная от его срока службы); β_ω - коэффициент широкополосности случайного процесса $\hat{Y}(t)$, учитывающий спектр частот реальных нагрузок.

Если нагрузка и прочность являются нормальными, формула (1.3) упрощается:

$$Q(t) = \omega_q t \exp(-0,5\beta^2)/(2\pi\beta\omega); \quad (1.4)$$

Широко применяется в этом случае также экспоненциальная формула вероятности безотказной работы за время l , использующая в качестве аргумента - интенсивности отказов - частоту выбросов случайного процесса:

$$v(\gamma) = \frac{\omega f(\gamma)}{\sqrt{2\pi}}; \quad (1.5)$$

Распределение абсолютных максимумов, введенное впервые В.В.Болотиным [9], определяется хвостовой частью распределения выбросов случайного процесса, расположенной выше уровня характеристического максимума γ_0 . Для оценки в этой технике вероятности отказа Пичугиным С.Ф. получена лаконичная формула [66]:

$$Q(t) = f(\gamma) / f(\gamma_0); \quad (1.6)$$

где: $f(\gamma) = f(X)/\dot{X}$; - нормативная плотность распределения нагрузки;

γ - нормативный уровень выбросов случайного процесса;

Представление работы элемента при действии случайной нагрузки в виде схемы независимых испытаний, получившее широкое распространение, было развито А.П. Кудзисом [46] в виде метода обобщенной ковариации. Случайный процесс $\hat{Y}(t)$ заменяется случайной последовательностью, между сечениями \hat{Y}_k которой учитываются парные коэффициенты корреляции ρ_{kl} , по которым вычисляются усредненный ρ_{m1} и обобщенный ρ коэффициенты корреляции:

$$\rho_{m1} = \frac{2}{r(r-1)} \sum_{k<1} \rho_{ki}; \quad (1.7); \quad \rho \approx \rho_{m1} \left(2 - \left[\rho_{m1} + \frac{(1-\rho_{m1})(3-lgr)}{1-0,1\rho_{m1}^2(3-lgr)^2} \right] \right); \quad (1.8);$$

где r - число расчетных сечений случайной последовательности. Вероятность безотказной работы элемента за время l определяется приближенно как:

$$P(t) \approx \rho P_{min} + (1 - \rho) \prod_{k=1}^r P_k; \quad (1.9)$$

где: P_k - вероятность выполнения условия (1.1) в k -м сечении случайной последовательности. Частотную структуру этой модели описывает интенсивность X , равная

числу независимых испытаний на отказ (сечений) элемента в единицу времени, основная расчетная формула имеет вид:

$$Q(t) = \lambda t Q(\gamma); \quad (1.10)$$

где $Q(\gamma)$ - вероятность отказа в отдельном нагружении.

Экстремумы в задачах надежности обычно описываются двойным экспоненциальным распределением (законом Гумбеля первого типа) [70], при использовании которого вероятность отказа определяется как:

$$Q(t) = 1 - \exp(-\exp(-y)); \quad (1.11)$$

где аргумент равен $y = a_n(\gamma - u_n)$, u_n - характеристический экстремум, a_n - экстремальная интенсивность.

Дискретное представление рассматривает в качестве основной частотной характеристики среднюю длительность отказа $\bar{\Delta}(\gamma)$, основная формула записывается как:

$$Q(t) = Q(\gamma)t / \bar{\Delta}(\gamma); \quad (1.12)$$

В технической теории надежности оценка надежности сложных систем обычно сводится к рассмотрению двух основных видов соединений элементов [9, 70, 72]:

а) *последовательного* соединения, вероятность безотказной работы которого при независимых элементах определяется как:

$$P_m = \prod_{i=1}^m P_i; \quad (1.13)$$

где P_i - вероятность безотказной работы i -го элемента;

б) *параллельного* соединения:

$$P_m = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i); \quad (1.14)$$

Последовательное в вероятностном смысле соединение элементов может быть применено для описания работы статически определимых систем, например, строительных стропильных ферм.

Однако практическая оценка надежности реальных конструкций не может быть сведена к использованию простой формулы (1.13) вследствие наличия корреляции между условиями отказа элементов.

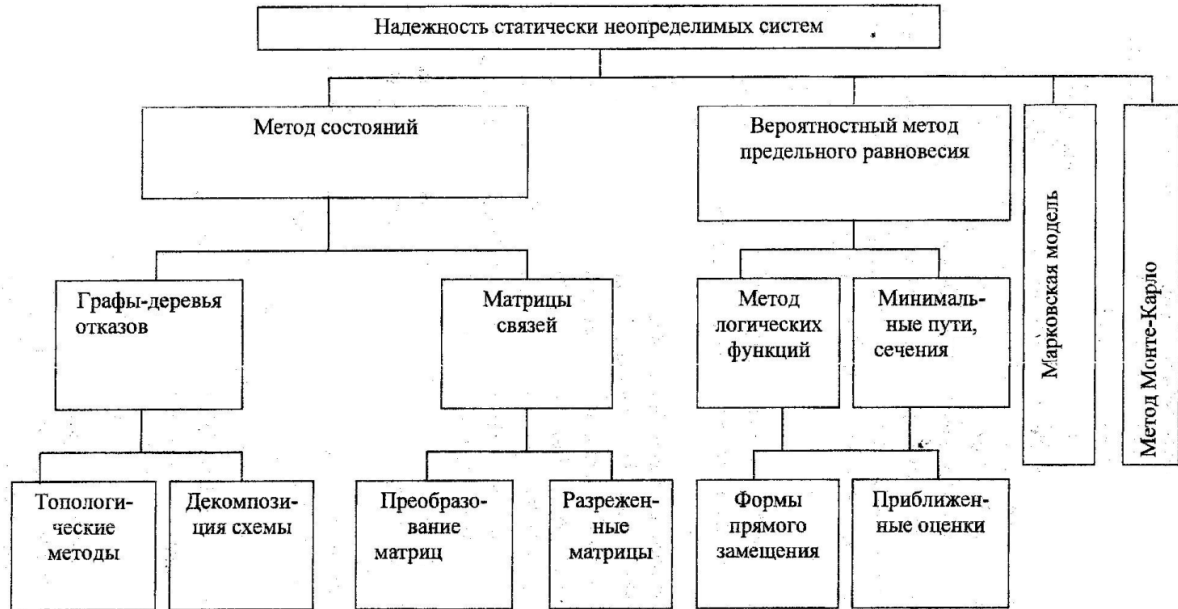


Рис. 1.10 Методы оценки надежности статически неопределимых систем.

Поэтому в практике оценки надежности стальных конструктивных систем используются более простые модели отказов [9, 20, 50, 55, 56, 57, 72, 107]. Аналитические и вычислительные методы, используемые в рамках технической теории надежности к расчету сложных систем, которые могут быть применены для анализа надежности статически неопределимых систем, указаны на блок-схеме рис. 1.10.

Достаточно обоснованной для стальных конструкций является пластическая модель отказа элементов и статически неопределимых рам, особенности, которой изучены в многочисленных работах, из которых отметим труды Е.О. Патона, С.А. Бернштейна, А.В. Геммерлинга, И.И. Гольденבלата, Б.Н. Горбунова, Н.П. Жудина, Л.И. Мгламента, Н.С. Стрелецкого, В.С. Туркина, Н.Л. Чернова, В.С. Шебанина, В.Н. Шимановского.

Вероятность отказа может быть представлена в виде интеграла:

$$Q(t) = \int_0^{\infty} R(t)p_S(t)dt; \quad (1.15)$$

где: $R(t)$ - функция распределения вероятности случайной величины R ; $p_S(t)$ - плотность распределения вероятностей S .

Для вычисления вероятностей отказа в виде интеграла (1.15), используются следующие методы:

- *Метод двух моментов*- используется, если $\check{R}(t)$ и $\hat{S}(t)$ распределены по нормальному закону:

$$Q(t) = 1/2 - \Phi(\beta) = 1 - Q_S; \quad (1.16)$$

где: $\Phi(\beta)$ - интеграл Гауса с пределами от 0 до характеристики безопасности β .

- *Метод статистической линеаризации*- основан на разложении функции резерва несущей способности в ряд Тейлора. Пусть $Y=f(x_1, x_1, \dots, x_n)$, разложим функцию Y в ряд Тейлора в окрестностях точки «А»:

$$Y = f(a_1, a_2, \dots, a_n) + (\tilde{x}_1 - a_1) \frac{\partial Y}{\partial x_1} + (\tilde{x}_2 - a_2) \frac{\partial Y}{\partial x_2} + \dots + (\tilde{x}_n - a_n) \frac{\partial Y}{\partial x_n} + W; \quad (1.17)$$

где: $\frac{\partial Y}{\partial x_i}$ - значения частных производных, которые берутся при $\tilde{x}_i=a_i$; W - нелинейные члены ряда, которыми пренебрегают в практических расчетах. Тогда математическое ожидание функции надежности (\bar{Y}) определяется, как функция Y , вычисленная от математических ожиданий случайных аргументов:

$$\bar{Y}(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n); \quad (1.18)$$

- *Метод «горячих» точек*- используется в случае, если исходные величины распределены не по нормальному закону, и основан на приведении исходных распределений к нормальному. Аппроксимация производится в «горячей точке» (точке подгонки).

- *Метод статистических испытаний*- основан на достаточно большом числе (5000...10000) статических испытаний по схеме Бернулли. Для i -х значений x_i выполняется детерминированный расчет значений R и S и проверяется условие $S > R$. Если условие выполняется, то эта реализация засчитывается в качестве отказа. Частота появления отказа (v) рассматривается, как оценка его вероятности $Q(t)$, т.е

$v=k/m \approx Q(t)$; где: k - число отказов; m - число испытаний. Метод крайне прост и универсален, но требует оценки близости v к $Q(t)$. Тогда $Q(t) \leq \eta_s^k v$; где η_s^k - доверительный коэффициент определяемый по таблицам в зависимости от уровня доверительной вероятности Q_s и числа отказов k .

• *Метод Монте-Карло*- является модифицированным методом статистического моделирования. Так как интеграл (15) есть не что иное, как математическое ожидание функции отказа F_k , то :

$$Q(t) = \bar{F}(S) \approx 1/m \sum_{i=1}^m F_k(S_i) \quad (1.19)$$

т.е при каждом испытании:

а) по заданной плотности вероятностей величины S моделируется ее реализация S_i ; б) по значению аргумента S_i определяется значение R ; в) проверяется условие $R_i - S_i = F_k$; г) определяется $Q(t)$.

Как и в предыдущем случае, необходимой операцией является оценка близости v к $Q(t)$. При реализации метода Монте-Карло наиболее приемлемым подходом является формирование ряда выборок $Q(t)$ (до $i=20$) и формирование на их основе значений оценки вероятности $Q(t)$. Для определения доверительного интервала $\Delta Q(t)$ используется критерий Стьюдента [70].

$$\Delta Q(t) = \pm t_p \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Q(t))^2 - m \cdot (\bar{Q}(t))^2}{m \cdot (m - 1)}} \quad (1.20)$$

где: m - объём выборки; t_p - значение коэффициентов для различных уровней доверительной вероятности. При большей ширине доверительного интервала следует увеличить объём выборок или их число.

1.2.2 Способы современных нормативных документов для обеспечения заданного уровня надежности конструкции

Для оценки несущей способности упруго-пластических статически неопределимых систем широко используется метод предельных состояний [14, 15, 32, 33, 34], позволяющий, минуя рассмотрение промежуточных состояний, анализировать

непосредственно состояния пластического разрушения, определяя характеристики предельной прочности. Метод легко формализуется и допускает применение линейного программирования на ЭВМ. Именно этот метод заложен в основе расчета на прочность реализуемого в соответствии с требованиями ДБН В.2.6-163:2010 (в частности расчет конструкций по предельным состояниям первой группы). При использовании этого метода надежность любых металлоконструкций, в том числе и конструкций покрытий над трибунами стадионов, обеспечивается путем ввода в расчет различных коэффициентов запаса. Рассмотрим некоторые из них более детально.

Коэффициент надежности по ответственности (коэффициент надежности) γ_n , выбирается исходя из требований ДБН В 1.2-14-2009. В этом документе даны коэффициенты надежности для соответствующих классов последствий, категорий ответственности конструкций и соответствующих расчетных ситуаций. Классы ответственности зданий и сооружений определяются уровнем возможных материальных убытков или социальных потерь, связанных с приостановкой эксплуатации или потерей целостности объекта. Несомненно, класс ответственности спортивных арен и стадионов должен приниматься самым ответственным - ССЗ [32]. В зависимости от последствий, которые могут быть вызваны отказом, различают три категории ответственности конструкций и их элементов:

А – конструкции и элементы, отказ которых может привести к полной непригодности к эксплуатации здания (сооружения) в целом или значительной ее части.

Б – конструкции и элементы, отказ которых может привести к осложнению нормальной эксплуатации здания (сооружения) или к отказу других конструкций, которые не принадлежат к категории А.

В – конструкции, отказы которых не приведут к нарушениям функционирования других конструкций или их элементов. Категории ответственности устанавливаются проектировщиком и должны быть приведены в проектной документации.

То есть каждому элементу конструкции присваивается своя категория ответственности. Но чаще всего для конструкций массового пользования устанавливается одно

значение коэффициента γ_n , с которым эта конструкция должна использоваться независимо от классов последствий.

Дополнительный коэффициент надежности по материалу $\gamma_u=1,3$, для элементов конструкций, которые рассчитываются на прочность с использованием расчетных сопротивлений R_u , которое определяется по временному сопротивлению при растяжении.

Коэффициент условий работы элементов конструкций γ_c и коэффициент условий работы соединений γ_b , которые принимаются по таблицам ДБН В.2.6-163:2010 под номерами 1.1.1 и 1.1.2, соответственно.

Помимо обеспечения надежности строительных конструкций путем ввода различного рода коэффициентов надежности, строительной нормативной литературой предусматривается еще и вероятностно-статистический метод обеспечения надежности конструкции. Он основывается на вероятностных методах вычисления надежности и сравнения ее с нормативной величиной [32, 105]. К сожалению, этот метод требует значительной доработки и вызывает ряд спорных моментов, которые требуют уточнений. К тому же единой методики вычисления характеристик надежности в нормативных документах не приведено.

1.2.3 Методика расчета коэффициентов надежности в современных строительных нормах

Следует отметить связь между коэффициентами надежности и характеристикой безопасности конструкции. Эта связь выведена в работе [50]:

$$\begin{aligned} \gamma_f &= \left[1 + S_Q \beta V_Q / (S_R^2 + S_Q^2)^{1/2} \right] / (1 + \mu_Q V_Q) \\ \frac{1}{\gamma_m} &= \left[1 + S_R \beta V_R / (S_R^2 + S_Q^2)^{1/2} \right] / (1 + \mu_R V_R) \end{aligned} \quad (1.21)$$

где:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{S_R^2 + S_Q^2}}; \quad (1.22)$$

β - характеристика безопасности, введенная Ржаницыным А.В.[72]; $S_{R(Q)}$ - стандартное отклонение (число стандартов укладывающееся от $R(Q)=0$ до $R(Q) = \tilde{R}(\tilde{Q})$); $V_R = \frac{S_R}{\bar{R}}$; $V_Q = \frac{S_Q}{\bar{R}}$ - коэффициенты вариации несущей способности и нагрузочного эффекта; μ_R и μ_Q - числа стандартов, на которые расчетные математические ожидания соответствующих величин, сдвинутые по отношению к среднему значению в действующих нормах.

Используя методику, предложенную Н.С. Стрелецким [83], можно вывести связь и между остальными коэффициентами надежности. Исходя из этого, для обеспечения какого-то заданного уровня надежности системы, в расчетах, базирующихся на методе предельных состояний, следует использовать определенную группу коэффициентов надежности отвечающих этому уровню. Анализируя работу [72], следует отметить что, увеличение числа частных коэффициентов надежности в нормах проектирования ведет к снижению затрат материалов, определяемых проектом, стремясь к затратам, индивидуального проекта, решение которого получено методами теории надежности. Следовательно, ввод дополнительных коэффициентов позволяет более гибко учитывающих реальную работу конструкции, приводит к оптимизации конструкции, но чрезмерно усложняет инженерный расчет.

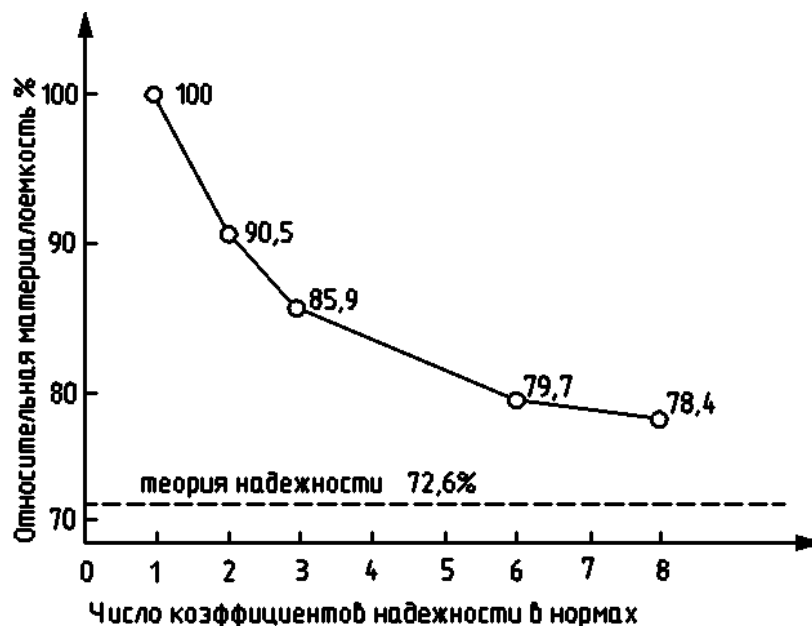


Рис. 1.11- Падение относительной материалоемкости с увеличением используемого числа коэффициентов запаса (надежности) при одинаковой допустимой вероятности отказа.

Исходя из этого, следует выбрать оптимальное число частных коэффициентов надежности, чтобы обеспечить требуемую надежность и по возможности не сильно увеличить материалоемкость. Используя график работы [96], можно сказать, что 6-8 частных коэффициентов надежности полностью отвечают этим требованиям.

Несмотря на требования современных нормативных документов для обеспечения прочности, жесткости, устойчивости конструкций покрытий и их элементов, для рассматриваемого типа сооружений, имеющих повышенный уровень ответственности, на сегодняшний день система частных коэффициентов надежности (коэффициент надежности по назначению γ_n [32], коэффициент условий работы элементов конструкции γ_c [34]) не нормирована в должной мере. Вследствие этого, наиболее логичным является выполнение расчета конструкции покрытия на основе прямых методов теории надежности, которые в дальнейшем могут стать основой для нормирования коэффициента γ_c для требуемого уровня надежности.

1.2.4 Современные методы обеспечения живучести металлоконструкций

Живучесть – способность объекта сохранять (возможно, с ухудшением качества функционирования) работоспособное состояние даже при повреждении его части [34]. Понятие живучести конструкции напрямую связано с понятием чувствительности и, как правило, при проектировании зачастую анализируют именно чувствительность конструкции.

Существуют различные методы для анализа чувствительности, базирующиеся на введениях определенных ограничений и условий в алгоритм расчета строительных конструкций методом конечных элементов [66, 70, 93]. Следовательно, для анализа живучести и чувствительности конструкции, нужен конечно-элементный алгоритм расчета. В случае если конструкция является относительно простой, то есть имеющей не слишком большое число элементов, то расчеты можно выполнять вручную (этот процесс займет довольно много времени). Но заметим, что подавляющее количество строительных конструкций содержит большое число элементов и являются много раз статически неопределимыми системами.

Выходом из сложившегося положения может стать выполнение расчета на ЭВМ (метод конечных элементов позволяет выполнить эту процедуру). Но на данный момент ни один программный расчетный комплекс (по крайней мере, из распространенных в нашей стране) в полной мере не может оценивать надежность и живучесть строительных конструкций в явном виде.

Для решения задачи оценки живучести можно воспользоваться другим, более упрощенным, методом. Он основывается непосредственно на определении живучести строительных конструкций. То есть моделируется отказ отдельных конструктивных элементов и производится оценка обеспечения функционального назначения конструкции.

Для проведения этого метода оценки следует выбирать наиболее ответственные элементы пространственной конструкции (как правило, большая часть строительных конструкций являются пространственными системами). Для более детального анализа моделируется пошаговый выход элементов конструкции из строя. Первыми, из расчетной системы, удаляют более ответственные элементы, последующими – менее ответственные. После каждого шага исключения элемента производится расчет и анализ перераспределенных усилий в конструкции, определяется фактическая несущая способность оставшихся элементов и их требуемая несущая способность, а также производится уточнение координат узлов элементов, с учетом уже полученных перемещений. Стержни, вышедшие из строя (переставшие удовлетворять первому предельному состоянию), удаляются, и происходит повторный пересчет усилий в элементах. Удаление элементов производится до того момента пока конструкция не станет механически изменяемой системой или перестанет удовлетворять каким либо заданным условиям (к примеру прогибам). Следует обратить внимание, что, согласно рекомендациям работы [11], вышедшие из строя сжатые элементы просто исключаются из конструкции, а растянутые исключаются, но в узлы крепления стержня прикладываются силы, соответствующие напряжениям в исключаемых элементах, но с противоположным знаком.

Данный способ анализа позволяет упрощенно провести приблизительную оценку живучести конструкции, пользуясь только лишь стандартными вычислительными комплексами САПР, такими как ЛИРА и SCAD, которые получили широкое распространение в нашей стране.

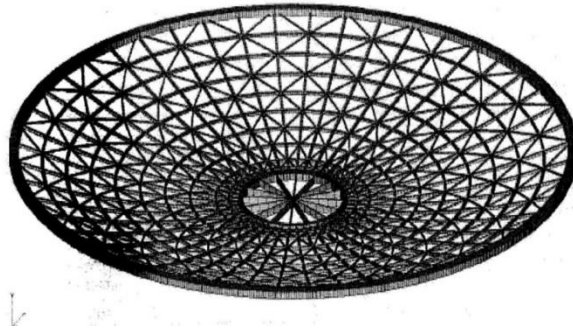


Рис. 1.12. Расчетная схема модели покрытия ЛДС (12812 элементов, 11025 узлов).

Вышеописанный метод был реализован при исследовании живучести конструкций покрытия ледового дворца спорта «Лужники» в городе Москва [31]. В этой работе проверялась адекватность компьютерной программы (реализованной на основе метода конечных элементов) расчета живучести и надежности. Для этого в лаборатории ОАО ЦНИИС Транспортного строительства была изготовлена уменьшенная модель конструкций купольного покрытия в масштабе 1:15. В качестве начальных условий задавались перемещения всех узлов конечно-элементной модели, получаемые в результате статического расчёта модели при нагрузке соответствующего этапа исследования. Реакция модели покрытия на удаление отдельных конструктивных элементов изучалась при разрыве наружного кольца и примыкающих к нему элементов (нитей и раскосов). При этом было получено удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных результатов, что означает подтверждение расчётной методики проверки на живучесть. Следует отметить, что основными параметрами, изучаемыми в этом эксперименте, являлись динамические показатели, а точнее исследовалась динамическая реакция конструкции при мгновенном отказе элемента. Мы же предлагаем использовать данную методику в статической постановке.

Основные выводы по обзору современных методов обеспечения надежности при проектировании уникальных конструкций:

1. Большепролетные покрытия имеют повышенный уровень ответственности, их отказы могут привести к тяжелым экономическим и социальным последствиям. В связи с этим, проектирование уникальных сооружений должно основываться на комплексном подходе выбора рациональных конструктивных решений, увязанных с функциональным назначением, архитектурными решениями, методами изготовления и монтажа, условиями эксплуатации. В полном объеме должны выполняться требования надёжности, технологичности и экономической эффективности, учитываться экологические и социальные факторы.

2. Делая вывод из всего вышеизложенного можно сказать, что теория и практика расчета строительных, в частности металлических конструкций, получила к настоящему времени значительное развитие. Но нынешние нормы проектирования не в достаточной степени учитывают надежность уникальных конструкций. Следовательно, конструкции не являются равно надёжными. Наиболее объективным является численное определение показателей надежности и, как следствие, обоснованное назначение γ_c для обеспечения требуемого уровня надежности конструкции.

3. Классические методы определения живучести (чувствительности) конструкций не всегда реализуемы на практике, особенно в случае конструкций, являющихся много раз статически неопределимыми, к которым относятся стационарные покрытия над трибунами стадионов. Это объясняется значительной сложностью сопутствующих математических расчетов. Но редакции всех (рассмотренных в работе) нормативных документов в области строительства требуют проводить оценку живучести конструкций, во избежание случаев лавинообразного разрушения, но методика расчета не приводится, что вызывает определенное противоречие. Данную проблему предлагается решать, используя упрощенный метод определения живучести конструкций, базирующийся на поэтапной оценки несущей способности составляющих ее элементов после пошагового исключения наиболее важных (чаще всего, для рамно-

консольных покрытий над трибунами стадионов, это наиболее нагруженные элементы).

1.3 Влияние податливости основания и геометрических дефектов, полученных при монтаже, на напряженно-деформированное состояние рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов

1.3.1 Влияние податливости основания и просадок фундаментов на напряженно-деформируемое состояние конструкции

При прогнозировании долговечности зданий и сооружений, возводимых на глинистых грунтах и в особых условиях (таких как шахтные подработки), основными факторами при оценке влияния длительной деформативности основания и ползучести бетона на работу проектируемого (или эксплуатируемого) сооружения являются максимально допустимые для данного типа сооружения деформации (осадки) или же длительная несущая способность конструкции или сооружения в целом, не превышающие некоторой предельной величины [41].

Таким образом, при проектировании сооружений степень их надежности будет оцениваться двумя условиями:

$$v(t)_{\max} < |S|; \quad M(t)_{\max} < |M|; \quad (1.23)$$

где $v(t)_{\max}$, $M(t)_{\max}$ - наибольшие величины перемещений и изгибающих моментов в конструкции, определяемые с учетом ползучести бетона и длительных деформаций основания; $|S|$ - предельно допустимая осадка сооружения; $|M|$ - предельно допустимый изгибающий момент;

При сдвиге основания в результате просадки, карстовых явлений или подработки может иметь место смещение некоторых видов конструкций, например, отдельно стоящих фундаментов каркасных промышленных зданий. В этом случае превышение предельно допустимого перемещения фундамента может неблагоприятно сказаться как на возникновении дополнительных усилий в элементах каркаса, так и на деформативности отдельных конструкций. Во избежание опасности при эксплуатации должно быть выдержано условие

$$\lambda(t)_{\max} < |\delta|; \quad (1.24)$$

$\lambda(t)_{\max}$ – максимальное прогнозируемое (расчетное) перемещение; $|\delta|$ – максимально допустимое перемещение фундамента;

Все вышеизложенное дает возможность учесть влияние ползучести бетона и длительных деформаций основания при проектировании зданий, сооружений и отдельных конструкций.

Следует отметить сложность конкретной численной оценки надежности (или ее показателей) сооружения при использовании выше описанного метода. Гораздо легче использовать уравнение:

$$R(t) = M\varphi(t) - M(\xi) P(t)_f; \quad (1.25)$$

где: M – прочность здания; $M(\xi)$ – прочность здания расходуемая на восприятие деформационного воздействия просадок; $\varphi(t)$ и $P(t)_f$ – функция изменения надежности и вероятности замачивания основания во времени [17,41];

При использовании данной формулы появляются определенные трудности с количественной оценкой прочности здания (сооружения) в целом и прочности здания расходуемой на восприятия деформационного воздействия осадок.

Несколько иной метод предлагает Н.Н. Фролов [92] и использует его для оценки нормативного уровня надежности гидротехнических сооружений. Расчет оснований ГТС по просадочной деформации S_{sl} по I-й группе предельных состояний будет выражаться формулой:

$$S_{sl} \leq S_{пред.}, \quad (1.26)$$

где: $S_{пред.}$ – предельная деформация для сооружения, устанавливаемая нормами или требованиями проекта.

Соблюдение неравенства (1.26) при постоянных (неслучайных) значениях обоих показателей гарантирует надежность системы с вероятностью, равной единице. Однако, учитывая случайный статистически-вероятностный характер S_{sl} и $S_{пред.}$ к тому же являющихся функциями многих случайных аргументов, соблюдение условия (1.25) означает надежность работы просадочного основания с определенной вероят-

ностью P . Эта вероятностная категория и будет количественным показателем надежности H . Если принять, за меру надежности не наступление ни одного из возможных предельных состояний – в данном случае при допредельной просадочной деформации – в заданных условиях эксплуатации в пределах заданного срока, то указанная вероятность будет P_n . Тогда надежность как вероятностная категория выразится соотношением

$$H = P_n. \quad (1.27)$$

Приведенный подход учета просадок фундаментов в общей картине напряженно-деформированного состояния конструкции представляется сложно выполнимым на практике. Более простой в реализации является методика, приведенная в работе [21]. Смысл её заключается в том, что реальные геометрические отклонения от проектной формы моделируется в расчетной схеме конструкции и проводится оценка полученных напряжений с напряжениями, возникшими в недеформированной системе. Данная методика реализуется значительно проще в вероятностных расчетах надежности конструкций, чем приведенные выше.

1.3.2 Влияние геометрических несовершенств конструкции полученных при монтаже на напряженно-деформируемое состояние

В качестве дефектов геометрии конструкции подразумевается отклонение реальных координат узлов от проектного положения. Превалирующая их часть возникает именно при монтаже конструкции. Конечно, существует определенная часть дефектов, возникшая вследствие ряда других причин (нарушение требований эксплуатации, превышение заданного уровня нагрузок на конструкцию, неучтенные воздействия и т.д.), но их процент значительно меньше [86, 88, 106].

Основным фактором, от которого зависит количество и качество дефектов полученных при монтаже рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов, выступает способ монтаже конструкций (имеется в виду методы монтажа по степени укрупнения элементов: мелко элементный, поэлементный, крупноблочный, комплектно блочный). Способы учета монтажных дефектов предложены в работах [42, 77, 98, 99, 100]. Большая работа в этой области проведена под ру-

ководством Мущанова В. Ф., результатом которой были внедрены в нормативные требования [34] в виде коэффициентов условий работы $\gamma_{c(g)}$ для мембранных покрытий, учитывающих влияние геометрических несовершенств полученных на монтаже. Для данной работы наиболее приемлемой является методика Югова А.М. [98, 100] В ней предлагается учитывать геометрические дефекты конструкции, полученные при монтаже, в расчетах напряженно-деформируемого состояния путем вероятностного моделирования и дальнейшего расчета в вероятностной постановке методом Монте-Карло.

Делая выводы по разделу 1.3 можно сказать, что, несомненно, деформации просадки основания имеют влияние на напряженное состояние конструкции в целом, и они должны учитываться при определении надежности и живучести конструкций (особенно таких ответственных как конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов). При определении надежности системы «основание – сооружение» не всегда возможно дать численную оценку надежности, а если это и возможно расчет должен учитывать значительное количество случайных факторов, которые не всегда возможно спрогнозировать. Обойти эту проблему при определении надежности и живучести строительных конструкций, на стадии проектирования, возможно учитывая дополнительные напряжения от максимально возможных деформаций просадки при определении вероятности отказа системы в целом.

Геометрические дефекты конструкции могут значительно влиять на напряженно-деформируемое состояние системы. Их учет, при определении характеристик надежности, возможно провести путем вероятностного моделирования отклонений от проектного положения узлов конструкции.

1.4 Постановка целей и задач исследования

Исходя из всего вышеизложенного, следует отметить недостаточную изученность вопросов обеспечения надежности и живучести столь ответственных конструкций как стационарные покрытия над трибунами стадионов на стадии проектирования и эксплуатации. Следовательно, целью работы является разработка уточненной методики расчета и проектирования стальных рамно-консольных покрытий

над трибунами стадионов с заданным уровнем надежности на основе численного определения показателей надежности с учетом изменчивости значимых проектных и эксплуатационных факторов. При этом предполагается решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритм определения показателей надежности проектируемого или эксплуатируемого рамно-консольного покрытия над трибунами стадиона, основанного на вероятностной схеме метода конечных элементов с учетом возможной просадки основания и таких случайных величин и факторов как: прочностные характеристики и геометрические несовершенства фасонного металлопроката, геометрические несовершенства, получаемые конструкцией при монтаже, снеговые нагрузки.

2. Путем экспериментальных исследований (замерами фактических геометрических размеров сечений прокатных профилей, испытаниями образцов на разрыв) сформировать выборки значений случайных факторов для проведения статистического анализа.

3. Осуществить мониторинг несущих конструкций стационарных покрытий над трибунами стадионов, с целью формирования выборки данных о фактических геометрических несоответствиях положения узлов конструкций заданной геометрии.

4. Выполнить анализ показателей надежности подобранных конструктивных форм рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов на основе разработанного алгоритма.

5. Разработать рекомендации по проектированию рассматриваемых схем рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов с использованием метода «предельных состояний», в частности: разработать алгоритм расчета коэффициента условий работы γ_c для основных групп элементов рассматриваемых покрытий и предложить критерий для оценки склонности конструкций к лавинообразному разрушению.

РАЗДЕЛ 2

2. ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполняя анализ литературы вопросу определений показателей надежности конструкций можно сказать, что ряд авторов рассматривает проблему обеспечения надежности строительных систем в основном как конструктивную (требуемый уровень обеспечивается использованием более прочных материалов либо наиболее надежных конструктивных схем) [103]. Данный подход не всегда может быть применим с точки зрения экономических требований выдвигаемых к конструкции. К тому же открытым остается вопрос численного определения показателей надежности. Он рассмотрен в ряде работ [10, 44, 57, 61, 107, 109, 112]. Данные авторы предлагают различные методики вычисления показателей надежности (в некоторых случаях даже с приведением примеров расчета), но для сложных много раз статически неопределимых систем они тяжело реализуемы, а в некоторых случаях нереализуемы вообще. Так же данная тема обширно освещена в работах А.В. Перельмутера и С.Ф.Пичугина под руководством, которых была проведена большая исследовательская работа в этом направлении, использованная в дальнейшем в ДБН [32, 34]. К сожалению, авторы не привели единого четкого алгоритма вычисления показателей надежности. Выше перечисленные работы базируются на классических трудах (в этой области) Г. Шпете, В.Д. Райзера, А. Р. Ржаницына, В. В. Болотина. В них детально разобрана методика вычислений вероятности отказа и характеристики безопасности (как показателей надежности системы), но так же на примере простых конструкций, что вызывает ряд спорных моментов при расчете данных показателей для сложных многоэлементных систем.

Целью данного раздела является разработка единого универсального метода определений показателей надежности стержневых рамно-консольных систем покрытий над трибунами стадионов.

2.1 Алгоритм определения показателей надежности проектируемого и эксплуатируемого рамно-консольного покрытия над трибунами стадиона

Для решения статических задач в строительной механике использование точных методов расчета не всегда целесообразно, а в некоторых случаях невозможно. Чем сложнее у рассматриваемой конструкции расчетная схема, тем сложнее использовать точные методы. Поэтому, довольно часто, применяют приближенные методы расчета, в частности, метод конечных элементов.

Численный метод конечных элементов в статических детерминированных расчетах целесообразен тем, что для разной сложности и набора параметров исходных данных сохраняется общая процедура вычислительных действий для каждого элемента расчетной схемы. Данный плюс позволяет осуществлять применение метода в программных комплексах и алгоритмах ЭВМ. Ряд авторов рассматривал применения метода начальных параметров в вероятностных расчетах надежности, с различной степенью глубины проработки вопроса: Соболев Д.Н., Ким В.Е., Королев В.П., Муцанов В.Ф., Югов А.М. Наиболее показательной является работы [50, 51] Муцанов В.Ф., в них рассматривается методика оценки параметров безотказности работы мембранных конструкций. Автор отмечает, что практически все факторы, воздействие которых исследуется в надежности стальных мембранных конструкций, кроме нагрузок, представляют собой аргументы левой части уравнения метода конечных элементов, то есть учет действия случайных факторов производится на стадии формирования матрицы жесткости конструкции. В данном случае матрица жесткости рассматривается как нелинейная функция случайных аргументов:

$$[\bar{K}] \approx [\bar{K}_0(\bar{t}_0, \bar{t}_k, \bar{z})] + [\bar{K}_\sigma(\bar{t}_0, \bar{t}_k, \bar{z})] + [\hat{K}_0]; \quad (2.1)$$

$$[\tilde{K}_0] \approx [\tilde{K}_0^t] + [\tilde{K}_0^g]; \quad (2.2)$$

где: $[\tilde{K}_0^t]$, $[\tilde{K}_0^g]$ – дисперсии матрицы жесткости, которые обусловлены изменчивостью начальной толщины проката стальной конструкции, коррозионным износом, геометрическими несовершенствами конструкции.

В работе [50] автор приводит основные этапы вероятностного расчета мембранных конструкций:

- 1- формирование матрицы жёсткости мембранной конструкции $[\bar{K}]$ на основании математических ожиданий входных параметров;
- 2- расчет элементов дополнительной матрицы жесткости $[\hat{K}]$, которая учитывает изменчивость различных входных параметров;
- 3- с помощью ряда Тейлора определяется математическое ожидание вектора узловых перемещений и его возможное среднеквадратическое отклонение;
- 4- вычисляются компоненты вектора узловых реакций;
- 5- на основе вектора узловых реакций определяется значение математического ожидания $\{\bar{\sigma}\}$ и дисперсии нормальных напряжений в конечных элементах $\{\tilde{\sigma}\}$;
- 6- определение показателей надежности для конструкции в целом и для отдельных конечных элементов.

Следует отметить, что в работе [50] предложено два подхода для определения значений среднеквадратических отклонений вектора узловых перемещений. В первом подходе автор предлагает определять статистические стандарты вектора узловых нагрузок путем разложения правой части основного уравнения метода конечных элементов в ряд Тейлора. Во втором подходе предлагаются прямые вычисления соответствующих статистических значений вектора перемещений на основе рассмотрения основного выходного матричного уравнения с учетом стохастических добавок к элементам матрицы жесткости и вектора узловых перемещений. Автор приводит основные преимущества и недочеты обоих методов, но использует второй подход для вычисления параметров надежности, который является более простым и проще реализуемым. Именно он и лег в основу алгоритма вычисления показателей надежности стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов, приведенным в работе.

2.1.1 Алгоритм определения группы наиболее ответственных элементов конструкции характеризующих надежность системы в целом

Так как система много раз статически неопределима, наиболее целесообразно вычислять показатели надежности для наиболее ответственных элементов. С этой целью производится итерационный геометрически и конструктивно нелинейный расчет конструкции, алгоритм расчета описан в разделе (1.2.3), итогом которого, является список элементов поочередно вышедших из строя.

Если система неравнопрочна, разрушение ее может происходить длительно и постепенно: сначала выйдет из строя один, наиболее напряженный элемент, затем другой и т.д. до тех пор, пока не разрушатся все элементы, поддерживающие равновесие системы. Тогда система теряет свою геометрическую неизменяемость – свою несущую способность – и дальнейшая эксплуатация ее становится невозможной. Этот момент будем рассматривать как разрушение системы покрытия.

При оценке напряженного состояния оценку прочности записываем как условие не превышения напряжениями предела текучести ($\sigma < \sigma_T$). Следует отметить, что при нарушении указанного условия фактически стальной элемент не разрушается, а переходит в упруго-пластическую стадию деформирования, т.е. при сформулированном подходе не учитывается фактическое развитие пластических деформаций.

После получения порядка выхода из строя элементов определяется группа стержней для которой будут насчитываться характеристики надежности, в частности вероятность отказа и β -характеристика безопасности (дальность отказа [21]).

Универсального программного продукта определения рассмотренной выше совокупности элементов конструкции в данный момент нет. Большинство программных комплексов САПР (система автоматического проектирования), таких как SCAD Office, ЛИРА САПР и т.д. осуществляют только статический расчет усилий и перемещений, но не учитывают (или учитывают в не полной мере) геометрическую нелинейность работы конструкции. Корректное исключение элементов конструкции, в этих комплексах осуществить вообще не возможно. В некоторой степени эту проблему позволяет решить программный комплекс ANSYS, но готового программного

продукта разработчики не предоставляют. Этот комплекс является универсальным для расчета МКЭ (метод конечных элементов) и имеет готовые программы для широкого спектра инженерных задач, но в силу специфики вопроса, рассматриваемую нами задачу не охватывает. Возможно самостоятельное программирование алгоритма решения поставленной задачи в среде ANSYS, но в силу ряда причин этот подход крайне сложно реализуем. Основываясь на выше приведенных аргументах для определения последовательности выхода элементов из строя и фактического набора элементов, определяющих способность системы противостоять лавинообразному разрушению, необходима разработка алгоритма расчета исследуемой конструкции методом конечных элементов с учетом геометрической и конструктивной нелинейности. Наиболее приемлемым для решения этой задачи представляется высокоуровневый язык программирования MATLAB.

2.1.2 Выбор наиболее приемлемого метода расчета вероятности отказа конструкции

Если в качестве уравнения безотказной работы рассматривать выражение (1.1), а вероятность отказа рассматривать в качестве выражения (1.15), то для рассматриваемых рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов, которые являются пространственными статически неопределимыми системами, целесообразнее применять приближенные методы определения вероятности отказа, как основной характеристики надежности. В разделе 1.2.1 приведены основные из этих методов. С целью определения наиболее приемлемого из них был выполнен сравнительный анализ расчета вероятности отказа для тестового примера в виде однопролетной статически определимой балки, нагруженной снеговой нагрузкой. Рассматривались три различных метода: метод двух моментов, метод статистических испытаний, метод Монте-Карло [54].

В качестве случайных величин рассматривались значение величины снеговой нагрузки, площадь поперечного сечения элемента, прочностные характеристики материала конструкции. Снеговую нагрузку рассматривали как случайную величину распределенную по двойному экспоненциальному закону Гумбеля, в пределах от

1500 Па до 200 Па (что соответствует Донецкому региону). Все случайные величины геометрических характеристик сечений учитывались с нормальным законом распределения и варьировались в рамках допусков нормативных требований металлопроката. В качестве прочностной характеристики материала выступал предел текучести стали, который имел нормальный закон распределения в качестве случайной величины. Характеристики случайной величины принимались исходя из допусков нормативных требований металлопроката. Исходя из условия прочности, поперечным сечением конструкции был принят двутавр №40.

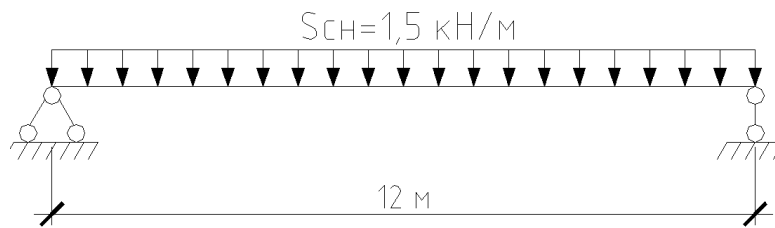


Рис. 2.2. Расчетная схема конструкции.

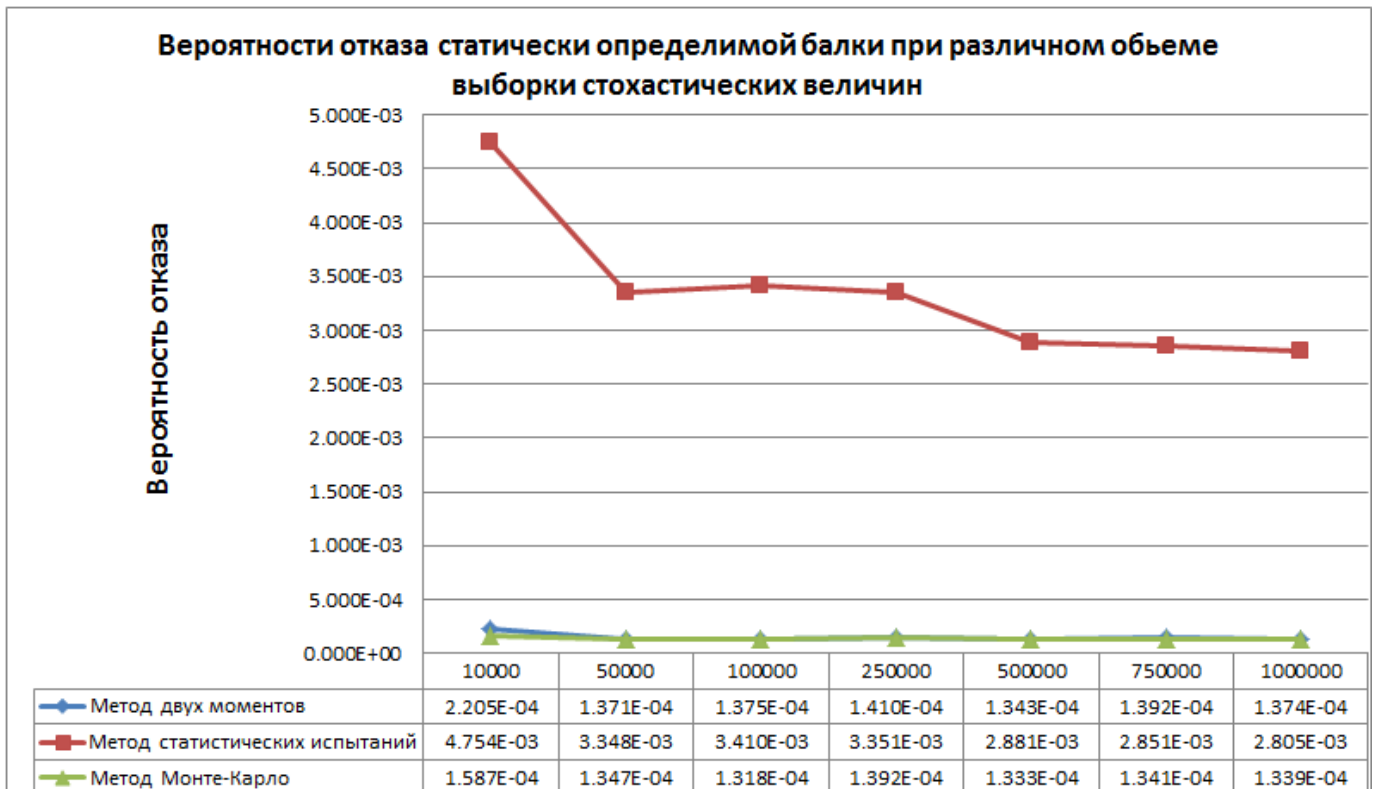


Рис. 2.3. График зависимостей вероятности отказа от объема выборки случайных величин.

Для рассматриваемой в примере (рис. 2.2) балки было выполнено семь этапов расчета вероятности отказа по каждому из методов. На каждом этапе расчета увеличивалось количество выборок стохастических величин от 10000 до 1000000 значений. Данные расчетов приведены на рисунке 2.3.

Как видно из рисунка 3 метод статистических испытаний дает существенно завышенную вероятность отказа конструкции. Это объясняется тем, что в силу своей простоты реализации, при оценке малых вероятностей P_f с приемлемой достоверностью (т.е. требуемых малых значений доверительного коэффициента, а следовательно, достаточного большого числа отказов) требуется большое число испытаний. И если на каждом испытании выполняется сложный детерминированный расчет, то общая потребность машинного времени значительно увеличивается и метод становится не эффективным.

Метод двух моментов и Монте-Карло дают приблизительно результаты одного порядка, что свидетельствует об их большей продуктивности относительно метода статистических испытаний. После превышения объема выборок в 10000 реализаций результаты практически сходятся. Следовательно, приемлемое количество испытаний для получения стабильного значения вероятности отказа рекомендуется принимать не менее 10000.

Метод двух моментов значительно проще метода Монте-Карло в реализации, но он применим исключительно в случае распределения случайных величин по нормальному и экспоненциальному законам распределения, что накладывает определенные ограничения на его использование.

Делая выводы по рассмотренному примеру можно отметить:

- результаты показали, что для получения достоверного значения вероятности отказа объём выборок исходных стохастических величин должен составлять не менее 10000 значений;

- метод двух моментов дает достаточно точные результаты при относительно небольшом количестве испытаний и довольно прост в реализации, но применим ис-

ключительно в случаях распределения исходных стохастических величин по закону Гаусса или экспоненциальному закону распределения.

- наиболее приемлемым методом вычисления вероятности отказа строительных конструкций является метод Монте-Карло, так как дает результаты с достаточной точностью при относительно небольшом количестве расчетных операций. Также, метод применим при любых законах распределения исходных стохастических величин.

2.2 Учет вероятностного характера действия снеговой нагрузки

Среди нагрузок на строительные конструкции наиболее изменчивыми с большим статистическим разбросом являются снеговые [6, 30, 38]. В течение зимы снеговая нагрузка на покрытие сооружения принимает неизвестные заранее значения, т. е. является случайной величиной. Неоднократные обрушения покрытий зданий и сооружений из-за снеговой нагрузки привели к тому, что задача нормирования снеговых нагрузок на покрытия сооружений стала весьма актуальной.

По результатам многочисленных исследований [48-85] среди всех известных моделей, формализующих вероятностный подход к формированию снеговой нагрузки, выявлен наиболее предпочтительный. Он заключается в представлении выборочной последовательности годовых максимумов S_m в виде непрерывной случайной величины, распределенной по закону Гумбеля. При таком способе представления снеговой нагрузки расчетное значение имеет некоторый запас, в отличие от второго способа. Но он не является, каким-либо, значительным или критичным. К тому же, именно первый метод заложен в современных строительных нормах. Основываясь на приведенных аргументах, целесообразно рассматривать снеговую нагрузку как непрерывную случайную величину годовых максимумов, распределенную по закону Гумбеля.

Плотность ее вероятности определяется как:

$$f(S_m) = \frac{1}{\beta} \exp \left[\frac{\alpha - S_m}{\beta} - \exp \left(\frac{\alpha - S_m}{\beta} \right) \right] \quad (2.1)$$

а соответствующая функция распределения:

$$F(S_m) = \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - S_m}{\beta} \right) \right] \quad (2.2)$$

где:

$$\alpha = m_{S_m} - k_\alpha \sigma_{S_m}; \quad (2.3); \quad \beta = k_\beta \sigma_{S_m}; \quad (2.4)$$

σ_{S_m} , m_{S_m} - математическое ожидание и стандарт выборочной совокупности данных метеорологических наблюдений; k_α , k_β - коэффициенты Гумбеля, которые могут быть аппроксимированы формулами (2.5, 2.6) [38].

$$k_\alpha = 0,45 + 0,34N^{-0.69}; \quad (2.5) \quad k_\beta = 0,78 + 1,54N^{-0.75}; \quad (2.6)$$

Для получения реальных зависимостей (2.1, 2.2) следует рассматривать данные по годичным значениям снеговых максимумов за длительный период (в качестве рассматриваемого интервала рекомендуется брать отрезок времени не менее десяти лет).

Учитывая снеговую нагрузку, как вероятностную величину в расчетах на надежность, требуется генерировать выборки случайных чисел на основании выражений (2.1, 2.2). Так как готовых генераторов случайных чисел по распределению Гумбеля, в каких-либо математических или прикладных комплексах не найдено, потребовалось составить его математическую модель. Данная задача была решена с использованием метода инверсии. Для этого функция распределения вероятности случайной величины интегрируется в пределах от выбранного минимально значения снеговой нагрузки (выбирается путем анализа статистических значений годичных снеговых максимумов) и максимально допустимого значения, взятого из нормативных документов, действующих в рассматриваемом регионе. Полученное выражение приравнивается к переменной, которая принимает значения в пределах [0...1], является случайной величиной и имеет равномерное распределение. Математически выражение представлено в формуле (2.7):

$$\int_{\min}^{S_{\max}} \frac{\exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - S}{\beta} \right) \right]}{\beta} dS = R; \quad (2.7)$$

где: \min - минимальное значение снеговой нагрузки, принятое путем анализа статистики выборки годовых максимумов за рассматриваемый период; S_{\max} - максимальное значение снеговой нагрузки (принимается из нормативной документации или данных метеорологических станций); R - генератор равномерно распределенных случайных чисел в интервале $[0 \dots 1]$.

Полученное таким образом случайное значение снеговой нагрузки используется в циклическом расчете конструкции для вычисления характеристик безопасности. На каждом новом цикле расчета моделируется новое значение нагрузки и выполняется детерминированный расчет в пределах цикла, и далее все повторяется. Таким образом, снеговая нагрузка учитывается в расчетах как случайная величина.

Следовательно, наиболее приемлемым, для этой работы, способом учета снеговой нагрузки является способ её представления в виде непрерывной случайной величины, распределенной по двойному экспоненциальному закону Гумбеля. В качестве исходной выборки значений рассматривается статистика годовых максимумов за определённый период лет. Естественно, чем больше рассматриваемый интервал времени, тем точнее моделируется поведение снеговой нагрузки. Для обеспечения удовлетворительного уровня достоверности рекомендуется брать период не менее десяти лет.

2.3 Учет начальных геометрических несовершенств сечений и прочностных свойств металлопроката

Как известно из работ [66, 70, 72, 108] расчеты надежности в обязательном порядке требует наличия в правой части основного уравнения безотказной работы (1.1) статистических данных о прочностных характеристиках материала рассматриваемой конструкции. Данный факт вынуждает быть более внимательными как к прочностным свойствам фасонного металлопроката, так и к его геометрическим характеристикам сечений. Они могут отличаться от нормативных в следствии нарушения технологического процесса производства.

В процессе изготовления труб из листового проката меняются механические свойства стали [47, 69, 81, 91]: предел текучести (вид кривой напряжение-деформация, длина и само наличие площадки текучести и др.), пластичность, удар-

ная вязкость, переходная температура хрупкого разрушения и даже временное сопротивление. Свойства изменяются как в поперечном, так и в продольном направлении (в последнем случае не проявляется эффект Баушингера и предел текучести может только возрастать). Но, наиболее важен предел текучести в поперечном направлении, поскольку он может как увеличиваться, так и уменьшаться при переделе листа в трубу.

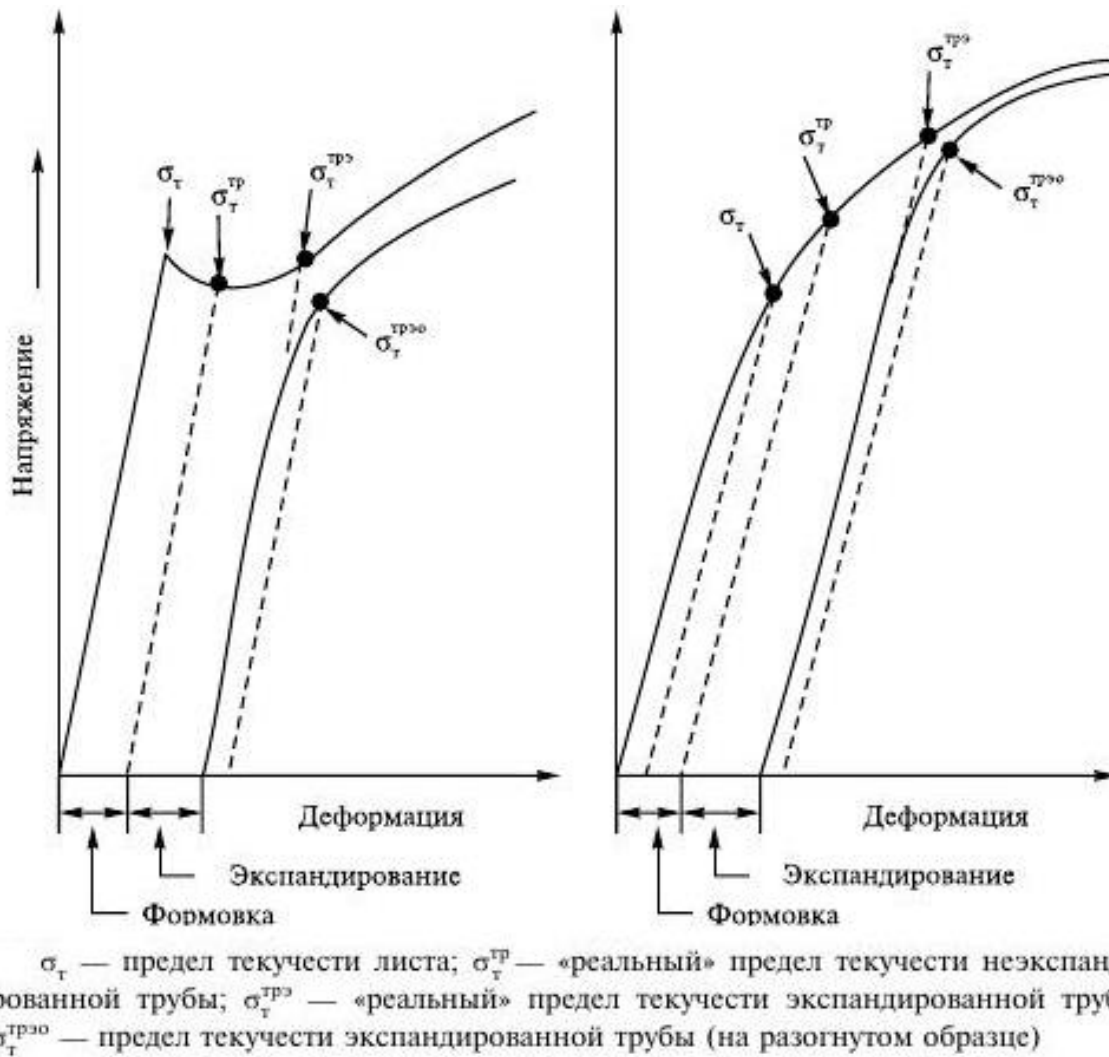


Рис. 2.4. Диаграмма изменения прочностных свойств стали с различными исходными диаграммами растяжения.

Указанные изменения свойств происходят при различных технологических процессах изготовления трубы из листа, в первую очередь при холодной формовке (рис.2.5).

Учет реальных геометрических и прочностных характеристик металлопроката в программном комплексе по определению надежности выполняется на этапе форми-

рования матриц жесткости циклического расчета. Для этого методами математической статистики обрабатывается выборка реальных характеристик металлопроката с целью определения вида распределения случайных величин и вычисления их основных характеристик. Далее, используя генератор случайных чисел, для требуемого закона распределения насчитывается матрица жесткости на каждом цикле.

С целью определения статистического закона распределения геометрических и прочностных характеристик используемого в конструкции металлопроката, посредством проведения эксперимента испытания стали на разрыв [22] формируются выборки прочностных характеристик (E - модуль упругости, R_b - временное сопротивление и R_T - предел текучести) и посредством прямых замеров формируются выборки геометрических характеристик сечений (толщина стенки, высота сечения, ширина сечения). Полученные выборки обрабатываются средствами математической статистики. Если выборка задана в виде X_1, X_2, \dots, X_n ; то математическое ожидание случайной величины определяется как средне выборочное:

$$\tilde{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad (2.8)$$

Дисперсия случайной величины заданной выборкой определяется как выборочная дисперсия:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2}{n - 1}; \quad (2.9)$$

Зная характеристики имеющихся в наличии выборок, возможно выдвинуть гипотезы о соответствии рассматриваемых случайных величин определенным законам распределения. Для этого строится гистограмма относительных частот выборки. Визуально анализируя ее внешний вид, выдвигаются гипотезы о соответствии закону распределения случайной величины, плотность распределения которого наиболее точно описывает верхние точки столбцов диаграмм относительных частот.

Далее выдвинутые гипотезы проверяются с помощью различных статистических критериев. Этих критериев в математической статистике существует немало количество, но наиболее приемлемыми (с точки зрения мощности рассматриваемого критерия, а также способа реализации самого расчета) для данной задачи выступают критерии согласия Пирсона, Колмогорова-Смирнова, Шапиро-Уилка, χ^2 анализ.

Делая вывод по разделу 2.3, следует отметить несомненную важность геометрических и прочностных характеристик металлопроката в общей картине надежности конструкций рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов (или каких либо других стержневых систем).

В силу нехватки статистического материала по разбросу прочностных и геометрических характеристик металлопроката, ставится задача формирования собственных выборок характеристик проката используемого непосредственно на строительной площадке.

2.4 Учет вероятностного характера геометрических несовершенств, получаемых конструкцией на монтаже

Геометрические несовершенства, получаемые конструкцией в процессе монтажа, приводят к отклонениям геометрии конструкции от первоначальной формы. Это может вызывать возникновение дополнительных напряжений в элементах системы. В ряде случаев дополнительные напряжения могут принимать довольно большие значения, что в последствие приведет к превышению критического уровня и может вызвать аварийную ситуацию. Следовательно, соответствие геометрии конструкции проектным значениям (с оговоркой на монтажные допуски) является жестким условием, выдвигаемым к строительно-монтажным работам.

В настоящее время используются два подхода к оценке и учёту дефектов монтажа (сборочных погрешностей) конструкций, состоящих из большого количества элементов (каковыми являются конструкции покрытий над трибунами стадионов):

- на основе выявления размерных связей в конструктивно-технологической схеме конструкции, составления размерных цепей и решения уравнений точности – расчёт точности [24];

- на основе статического расчёта стержневой системы методом Мора, позволяющим определить перемещения узлов по заданным деформациям стержней [76].

Однако использование этих подходов для оценки погрешностей сборки на этапе проектирования пространственных стержневых конструкций сопряжено с существенными недостатками:

- вследствие большого числа элементов конструкции, а так же в некоторых случаях большой степени статической неопределимости системы не удаётся составить адекватные технологической схеме сборки, поэтому результаты такой оценки будут некорректными;

- метод Мора, с одной стороны, не отражает реальной картины погрешностей, так как базируется на неразрывности деформаций в узлах, и с другой стороны, не учитывает способ и последовательность сборки конструкций, что тоже приводит к неверному результату;

В силу сложности реализации математической модели дефектов наиболее целесообразным был бы прямой учет отклонений геометрической формы сооружения от проектного положения, путем представления отклонений в качестве случайной величины. Данный случайный параметр следует учитывать в приведенном выше алгоритме (п. 2.1) на этапе формирования массива координат узлов системы и обновлять данные на каждом этапе расчета.

Возникает вопрос об учете корректных данных в характеристиках рассматриваемой случайной величины. Эту проблему возможно разрешить двумя способами:

- использование статистической информации или непосредственно характеристик случайных величин из уже опубликованных данных;
- непосредственный набор статистики отклонений конструкции от проектной геометрии путем геодезической съемки.

Первый вариант реализуется значительно легче, но при его использовании возникает ряд вопросов, касающихся применимости соответствия стохастических данных к конкретной конструкции. Второй вариант такими минусами не обладает. К тому же, в случае вычисления характеристик надежности уже возведенной системы второй способ наиболее точно учтет параметры отклонений геометрии от проектного положения как случайной величины, что, несомненно, позитивно скажется на точности вычислений.

Делая вывод по разделу 2.4, следует отметить, что учет дефектов конструкции полученных на монтаже целесообразнее всего производить путем представления отклонений реальных значений координат узлов от проектного положения как непрерывную случайную величину и вводить ее в вероятностный расчет характеристик

надежности на этапе формирования массива координат узлов, путем добавки приращения координат, вычисленной с использованием генератора случайной величины по определенному закону.

2.5 Учет возможных просадок основания в процессе эксплуатации в вероятностной схеме метода конечных элементов

Наиболее часто повреждение сооружений происходят из-за ошибок проектировании оснований и фундаментов [36, 49].

Математическая модель поведения основания, в случае точного расчета, для многоэлементных пространственных систем получается слишком сложной, а в некоторых случаях нереализуема вообще. Эту проблему возможно решить используя в расчетах вероятностные характеристики величин просадок основания, полученные путем обработки статистических выборок деформаций узлов крепления конструкции к фундамента.

Геодезические натурные наблюдения за вертикальными и горизонтальными перемещениями сооружений (мониторинг) имеют целью описать картину деформаций с количественной стороны за какой-то промежуток времени. Наблюдения проводятся с начала строительства сооружения и в первые годы его эксплуатации до достижения стабилизации деформаций. Наблюдения выполняются циклично, периодически. При этом стремятся спланировать циклы наблюдений через равные промежутки времени в кратчайшие сроки.

Геодезические измерения горизонтальных и вертикальных перемещений осуществляются по точкам, закреплённым в теле исследуемого сооружения. Это так называемые деформационные марки. Измерения производятся относительно опорных пунктов, которые располагаются вне зоны возможных деформаций, и их положение в пространстве и во времени принимается как стабильное.

Вертикальные перемещения вычисляются по формуле 2.8:

$$S_i = (H_R + [h_i]_1^k) - (H_R + [h_0]_1^k); \quad (2.8)$$

где: H_R – высота исходного репера; $[h_i]_1^k$ и $[h_0]_1^k$ – сумма уравненных превышений соответственно текущего и начального циклов наблюдений по ходу от исходного репера до марки k .

Если нивелирование на станциях выполняется примерно с одинаковой точностью, то можно записать:

$$m_H = m_h \sqrt{k}; \quad (2.9)$$

где: m_h - средняя квадратичная ошибка измеренного превышения на станции; k – число станций от исходного репера до наблюдаемой станции; m_H - средняя квадратичная ошибка с учетом удаленности от станции (точки установки нивелира).

Тогда среднеквадратичная ошибка находится по формуле 2.10.

$$m_S = m_h \sqrt{n}; \quad (2.10)$$

где: n – общее число станций в ходе.

Делая вывод по разделу 2.5, следует отметить:

1. Несомненно, просадочные деформации основания имеют влияние на напряженное состояние конструкции в целом и они должны учитываться при определении надежности и живучести конструкций (особенно таких ответственных как конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов).

2. При определении надежности системы «основание – сооружение» не всегда возможно дать численную оценку надежности, а если это и возможно расчет должен учитывать значительное количество случайных факторов, которые не всегда возможно спрогнозировать. Обойти эту проблему при определении надежности и живучести строительных конструкций на стадии проектирования возможно учитывая дополнительные напряжения от максимально возможных деформаций просадки при определении вероятности отказа системы в целом.

2.6 Выводы по главе

Подытоживая информацию, приведенную в главе 2, можно сделать следующие выводы:

1. На данный момент в нормативной литературе нет единого метода или алгоритма для вычисления вероятности отказа строительных конструкций. Основываясь на обзоре и доводах, приведённых в предыдущих разделах, наиболее целесообразным видится метод вычисления характеристик надежности конструкции, базирующийся на методе конечных элементов в вариационной постановке.

2. Для много раз статически неопределимых систем проблематично, а иногда и невозможно (в силу сложности реализации математического аппарата) вычислить вероятность отказа прямыми методами надежности. В связи с этим предложена методика определения группы наиболее ответственных за надежность элементов конструкции, и предложен к разработке алгоритм вычисления вероятности отказа для рассматриваемой совокупности элементов, как определяющей надежность системы в целом.

3. Наиболее приемлемым методом вычисления вероятности отказа строительных конструкций является метод Монте-Карло, поскольку он позволяет определить результаты с достаточной точностью при относительно небольшом количестве расчетных операций. Так же метод применим при любых законах распределения исходных стохастических величин.

4. Снеговая нагрузка, как дающая наиболее существенный вклад в суммарные напряжения, действующие в элементе, является важным фактором при вычислении вероятности отказа. Наиболее целесообразным является учет ее в вероятностных расчётах как стохастической величины, распределение которой описывается законом Гумбеля.

5. Наличие технологических допусков, а так же существенный процент дефектов и выбраковки при производстве металлопроката, делают геометрические характеристики сечений и прочностные свойства проката значимыми критериями в расчетах конструкций на надежность. В силу отсутствия, каких-либо, существенных статистических данных по геометрическим характеристикам сечений и прочностным свойствам металлопроката следует провести изыскания с целью набора статистического материала.

6. Геометрические несовершенства конструкции, полученные при монтаже, могут приводить к существенному приращению усилий в системе, что влияет на надежность сооружения в целом. В такой же степени это относится к неравномерным осадкам основания, что обуславливает необходимость учета данных факторов при вычислении показателей надежности сооружения.

7. Как правило, конструкция подвержена одновременному воздействию всех выше перечисленных факторов, определяющих надёжность системы (по крайней мере, в зимний период), что вызывает необходимость их комплексного учёта при вычислении вероятности отказа и характеристики безопасности, как основных характеристик надёжности системы.

8. Метод предельных состояний, используемый в качестве основы всех современных строительных норм в области проектирования конструкций, обеспечивает требуемый уровень надёжности путем ввода в расчет различных коэффициентов надёжности. Так как снеговая нагрузка, геометрические несовершенства формы сечения, просадки основания и отклонения геометрии, полученные на монтаже, относятся к факторам, вносящим неточности в расчетную схему сооружения, то коэффициентом, учитывающим их возможные отклонения, является коэффициент условий работы γ_c . Данный коэффициент не учитывает степень ответственности системы и для уникальных конструкций покрытий над трибунами стадионов рекомендуется уточнить его значение по результатам численной оценки вероятности отказа по предлагаемой методике.

РАЗДЕЛ 3

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВЫБРАННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ РАМНО-КОНСОЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

3.1 Методика анализ живучести стационарных рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов

Анализ аварий промышленных и гражданских сооружений показывает, что во многих случаях процесс разрушения конструкции носит лавинообразный характер, если отказ отдельных элементов и подсистем (даже неполный) инициировал возникновение других, более серьезных отказов и разрушений. Однако имеются и многочисленные примеры систем, где изолированные отказы отдельных элементов не приводят к аварии, что связано с некоторыми резервными возможностями, присущими структуре системы. Свойство системы сохранять несущую способность при выходе из строя одного или нескольких элементов естественно называть живучестью.

С целью проведения анализа живучести рассмотренной выше конструктивной формы покрытия над трибунами стадиона выполняется численный расчет покрытия, по результатам которого определяется и фиксируется группа разрушенных элементов, определяющих верхнюю границу надежности конструкции в целом (п. 2.1.1.).

Состоянием разрушения считается момент прекращения возможности дальнейшей эксплуатации сооружения вследствие потери несущей способности. С целью определения порядка выхода из строя элементов конструкции выполняется поэтапный численный расчет покрытия при приведённой к узловому воздействию (с использованием метода грузовых площадей) характеристической временной снеговой нагрузке $S_{\text{норм}}$ для рассматриваемого района строительства. В случае если ни один элемент покрытия не разрушается, временная нагрузка увеличивается этапами по 0.5 кН и выполняется перерасчет.

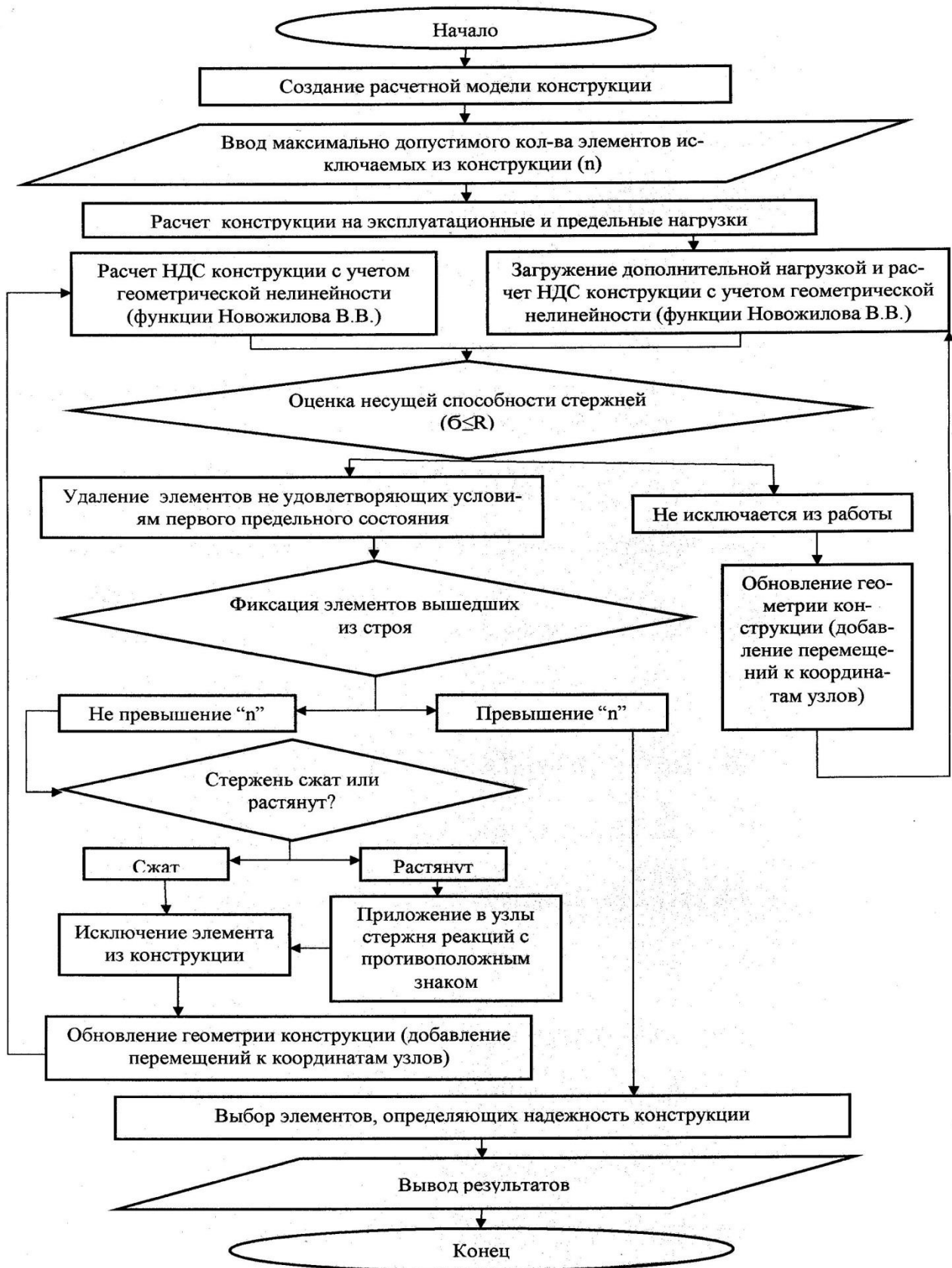


Рис 3.1. Блок-схема определения группы элементов конструкции, характеризующих надежность системы в целом.

Далее, не меняя схему нагружения и удаляя поочередно элементы, в которых наступил отказ, либо вследствие достижения напряжениями предела текучести, либо потери устойчивости (для удаленных растянутых элементов их эффект заменялся величинами внутренних усилий в соответствии с методикой Стрелецкого Н.С. [83]) фиксируется группа разрушенных элементов, при которых дальнейшая эксплуатация покрытия будет невозможной ввиду дальнейшего развития лавинообразных процессов разрушения, а также расположение наиболее напряженных элементов несущих ферм покрытия и их максимальные усилия M и N .

Изучая работу стальных ферм под циклически повторяющейся нагрузкой-разгрузкой, Н.С. Стрелецкий отмечает значительный запас несущей способности растянутых элементов после превышения напряжениями предела текучести в сечениях (30-60% в зависимости от марки стали). Следовательно, исключать полностью из работы такие стержни не корректно, так как их вся несущая способность не исчерпана. В свою очередь, сжатые стержни имеют незначительный запас несущей способности после момента потери устойчивости (3-5%), а значит, практически сразу, перестают воспринимать усилия возникающие в них. Основываясь на этих предпосылках, с целью учета конструктивной нелинейности системы, предложена методика осуществления исключения стержневых элементов из работы всей конструкции. Сжатые стержни просто удаляются из расчетной схемы после момента потери устойчивости конкретно рассматриваемого стержня, а растянутые удаляются после момента превышения напряжениями в сечении элемента значения расчетного сопротивления, но в узлах прикрепления стержня прикладываются сосредоточенные силы равные реакциям опор и направленные в обратную сторону.

Для учета геометрической нелинейности работы конструкции, были использованы функции Новожилова В.В. [58], позволяющие учитывать нелинейную связь между напряжениями, возникающими в элементе, и деформациями. С этой же целью, на каждом этапе расчета, производится обновление координат узлов конструкции, с учетом перемещений полученных на предыдущем этапе.

После получения порядка выхода из строя элементов определяется группа стержней для которой будут насчитываться характеристики надежности, в частности вероятность отказа и β - характеристика безопасности (дальность отказа [32]). Таким образом, выбирается группа из 5-7 стержней, которая и будет определять надежность системы в целом.

Так же следует учитывать явление лавинообразного разрушения конструкции. Если на каком-либо этапе итерационного расчета элементы системы начали выходить из строя без дополнительного приращения нагрузки, то, следовательно, началось лавинообразное разрушение, допускать развитие которого недопустимо. Следовательно, ограничиваются группой элементов, вышедших из строя, до наступления этого явления. Блок-схема определения группы наиболее ответственных элементов приведена на рисунке 3.1.

3.2 Варьируемые параметры выбранной конструктивной схемы покрытия над трибунами стадионов

Для проведения численного эксперимента с целью определения показателей надежности, на основе алгоритма, детально описанного в предыдущем разделе диссертационной работы, принят пространственный блок покрытия над трибунами стадиона, состоящий из шести несущих консольных рам и, соответственно, пяти пролетов. Геометрическая схема несущих консольных рам с маркировкой основных параметров конструкции приведена на рисунке 3.2.

Приведенная конструкция несущих рам покрытия над трибунами стадионов имеет большое распространение при реконструкции старых стадионов, построенных в Советском Союзе (стадион «Авангард» г. Макеевка, стадион «Металург» г. Донецк), а так же на стадионах небольшой вместительности или запасных полях (покрытия над трибунами запасных полей ФК «Олимпик» г. Донецк), но также применимо на стадионах средней вместительности до 10 000 сидячих мест (покрытие над трибунами основного поля ФК «Олимпик»).

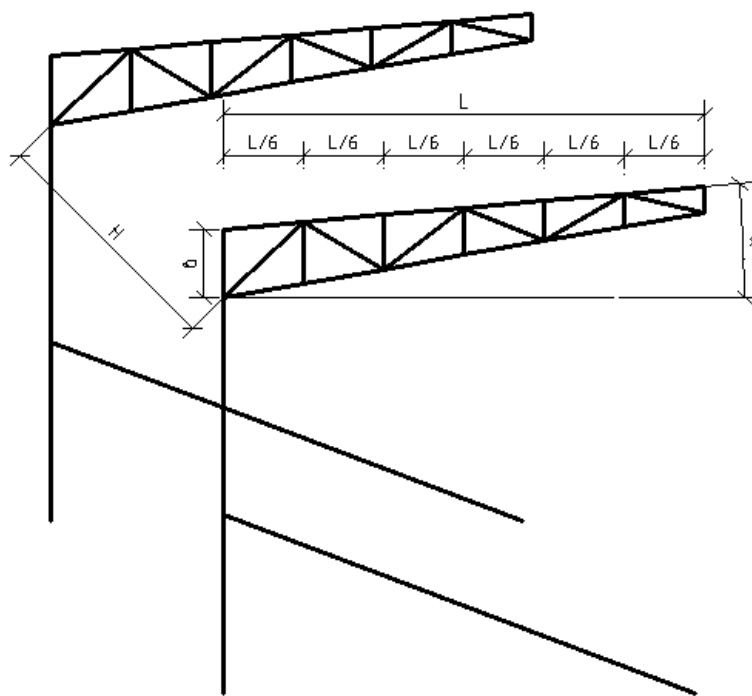


Рис 3.2. Геометрическая схема несущих консольных рам покрытия над трибунами стадиона.

С целью наибольшего охвата диапазона возможных значений параметров рассматриваемой геометрической формы конструкции, были выбраны три наиболее значимых характеристики системы. Для каждой из характеристик, исходя из конструктивных ограничений и требований целесообразности, назначались максимальное и минимальное значение. Следовательно, рассматривалось 8 вариантов комбинаций значений параметров в конструкции (табл. 3.1).

В качестве варьируемых параметров системы рассматривались следующие характеристики (табл. 3.2):

L - вылет консольной фермы покрытия (4-22 м);

α - угол наклона покрытия к горизонтали (0-30°);

H - шаг несущих рам (4-12 м);

Высота фермы для каждого из рассматриваемых вариантов конструкции покрытия вычислялась исходя из конструктивных требований, и хотя изменяла свое значение в рассматриваемых вариантах, но варьируемой величиной не является.

Следует отметить, что в работе рассматривается напряженно-деформируемое состояние только конструкций консольной части покрытия, напряженное состояние опорной стойки рамы не вошло в область изучения. Этот, казалось бы, недочет легко объяснить тем, что при некоторых рассматриваемых значениях вылета консольной фермы (L), шага несущих рам (H) конструкция покрытия становится достаточно габаритной и изгибающий момент, передаваемый на опорную стойку рамы, принимает достаточно большие значения. Следовательно, подобрать для сжато-изогнутого элемента стойки какое-либо прокатное сечение не представляется возможным. В таких случаях наиболее целесообразным решением, с конструктивной точки зрения, было бы замена одного стержня на шарнирно - стержневую конструкцию в виде вертикальной ферменной системы. Во избежание значительного изменения геометрии конструктивной схемы было принято решение рассматривать исключительно конструкцию покрытия.

Таблица 3.1

Рассматриваемые комбинации варьируемых параметров системы

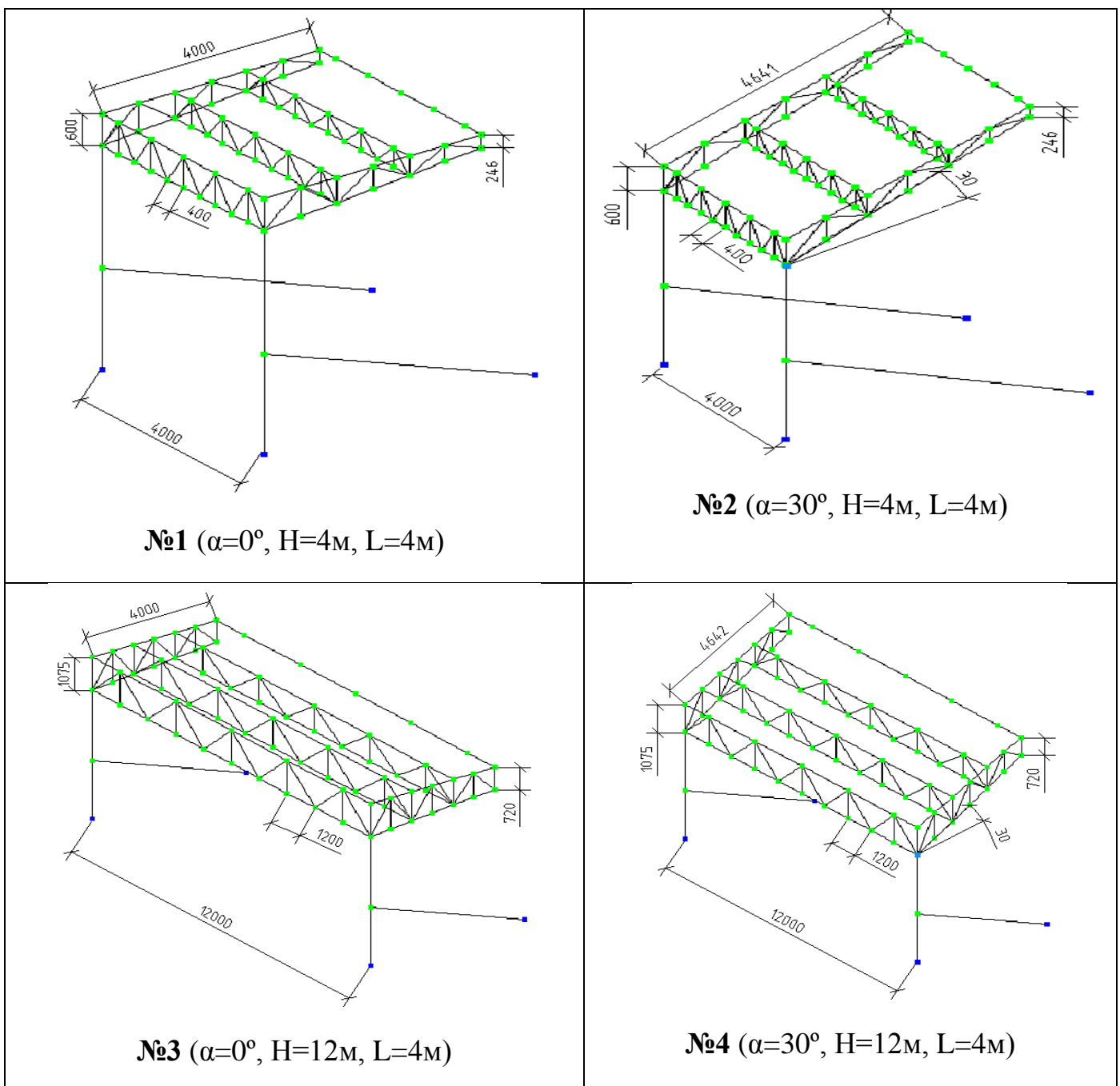
№ варианта конструкции	Угол наклона α (градусы)	Шаг рам H (м)	Вылет фермы L (м)
1	0	4	4
2	30	4	4
3	0	12	4
4	30	12	4
5	0	4	22
6	30	4	22
7	0	12	22
8	30	12	22

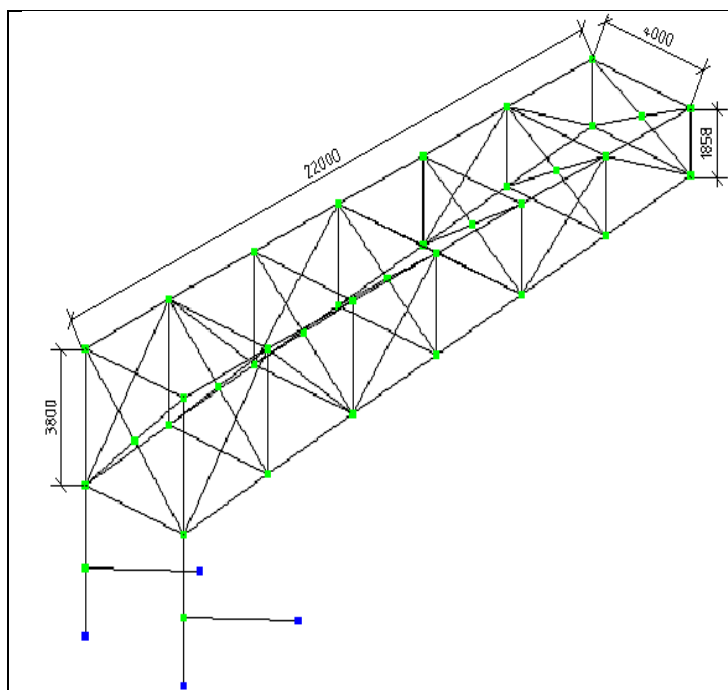
В конструкции покрытия наиболее ответственными являются элементы несущих ферм, вертикальные связи и прогоны имеют меньшую степень ответственности.

Следовательно, в целях уменьшения объема анализа данных, полученных при расчете показателей надежности и порядка выхода элементов из строя методом конечных элементов в вариационной постановке, ограничимся анализом работы именно элементов несущих ферм. С этой целью анализируется работа блока покрытия состоящего из шести несущих рам, соединенных вертикальными связями по покрытию.

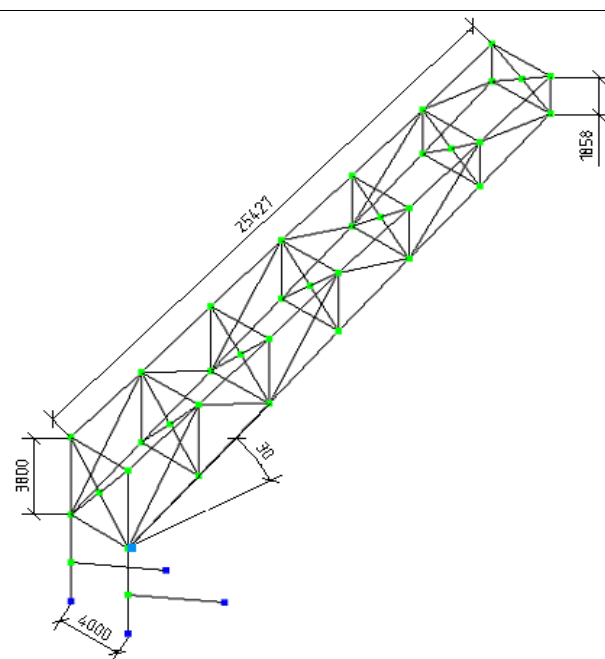
Таблица 3.2

Рассматриваемые конструктивные варианты покрытия над трибунами

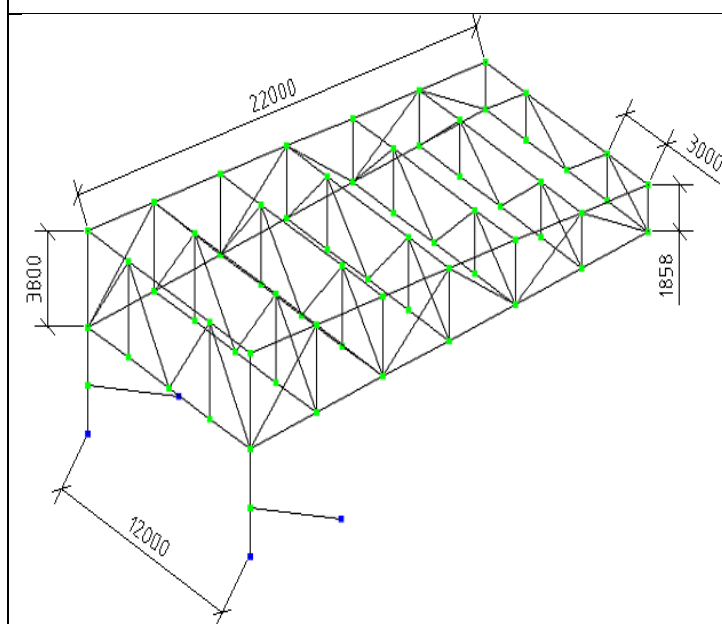




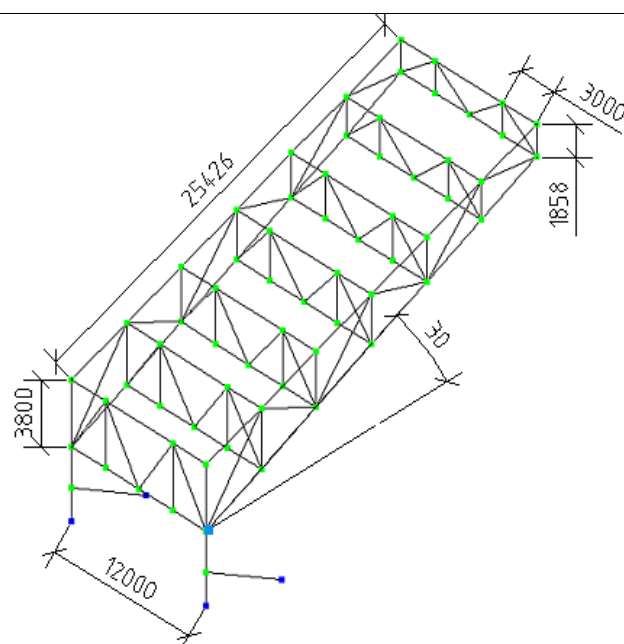
№5 ($\alpha=0^\circ$, $H=4\text{м}$, $L=22\text{м}$)



№6 ($\alpha=30^\circ$, $H=4\text{м}$, $L=22\text{м}$)



№7 ($\alpha=0^\circ$, $H=12\text{м}$, $L=22\text{м}$)



№8 ($\alpha=30^\circ$, $H=12\text{м}$, $L=22\text{м}$)

3.3 Анализ живучести рассматриваемой конструктивной схемы

Расчет системы производится в программном комплексе, разработанном на основе языка программирования MATLAB (п. 2.1). С целью проверочного расчета, усилия в стержнях на первом этапе расчета параллельно пересчитывались в программном комплексе ЛИРА САПР 2013. Первоначальный подбор сечений элемен-

тов, так же производился в программном комплексе ЛИРА САПР 2013. Подбор сечения осуществлялся исходя из требований первого и второго предельных состояний.

Как видно из приведенных гистограмм разрушения вариантов конструкции покрытия, на определенном этапе дополнительного догружения временной нагрузкой происходит выход группы элементов из строя. После этого в конструкции перераспределяются усилия, система стабилизируется и снова догружается дополнительной нагрузкой. После дополнительного догружения, во всех рассмотренных вариантах, начинается лавинообразное разрушение. Далее, на определенном шаге, система опять стабилизируется и требуется следующий этап дополнительного приращения нагрузки. Второй этап лавинообразного обрушения, для вариантов 2,7,8, приводит к полному разрушению конструкции, а для остальных вариантов, фиксируются промежуточные этапы стабилизации системы.

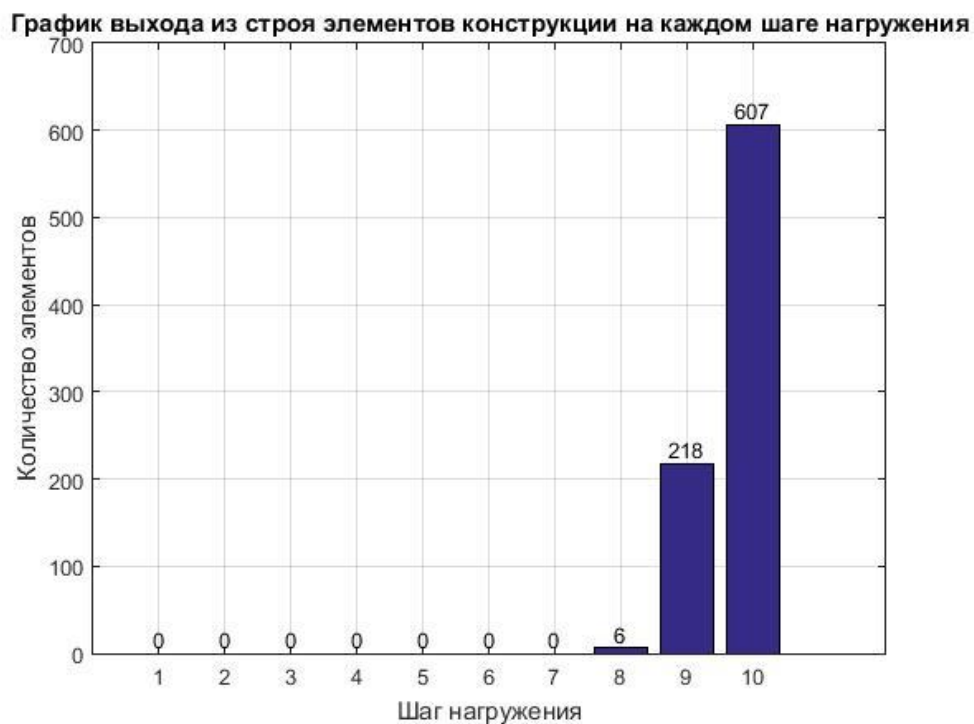


Рис. 3.3. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №1.

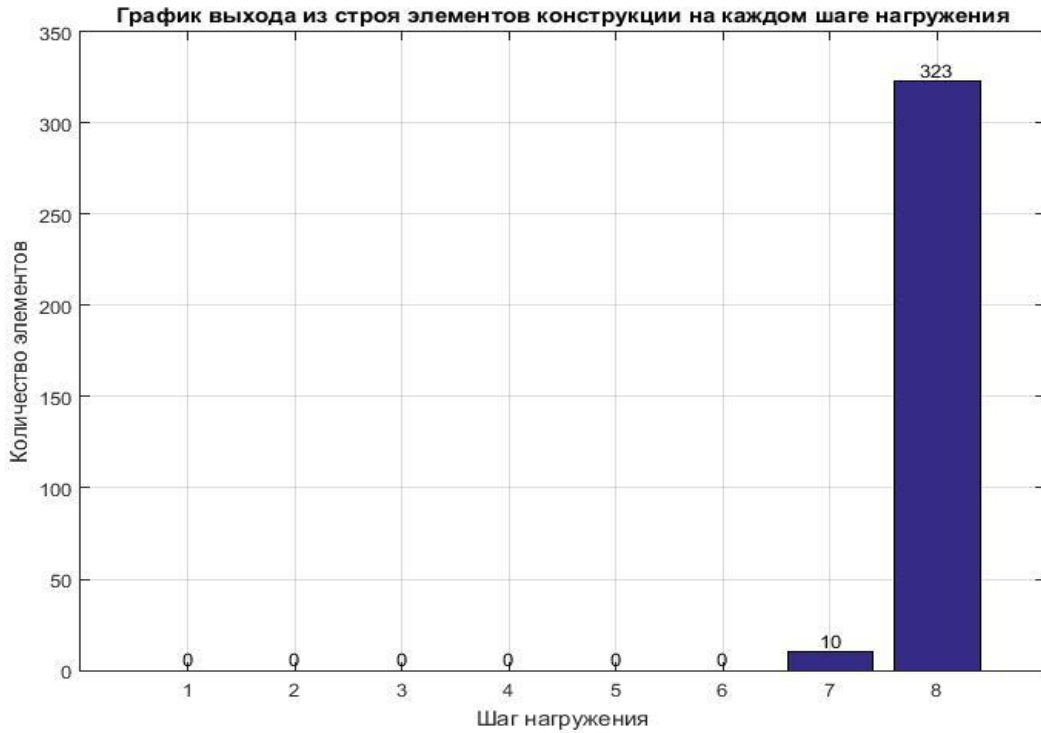


Рис. 3.4. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №2.

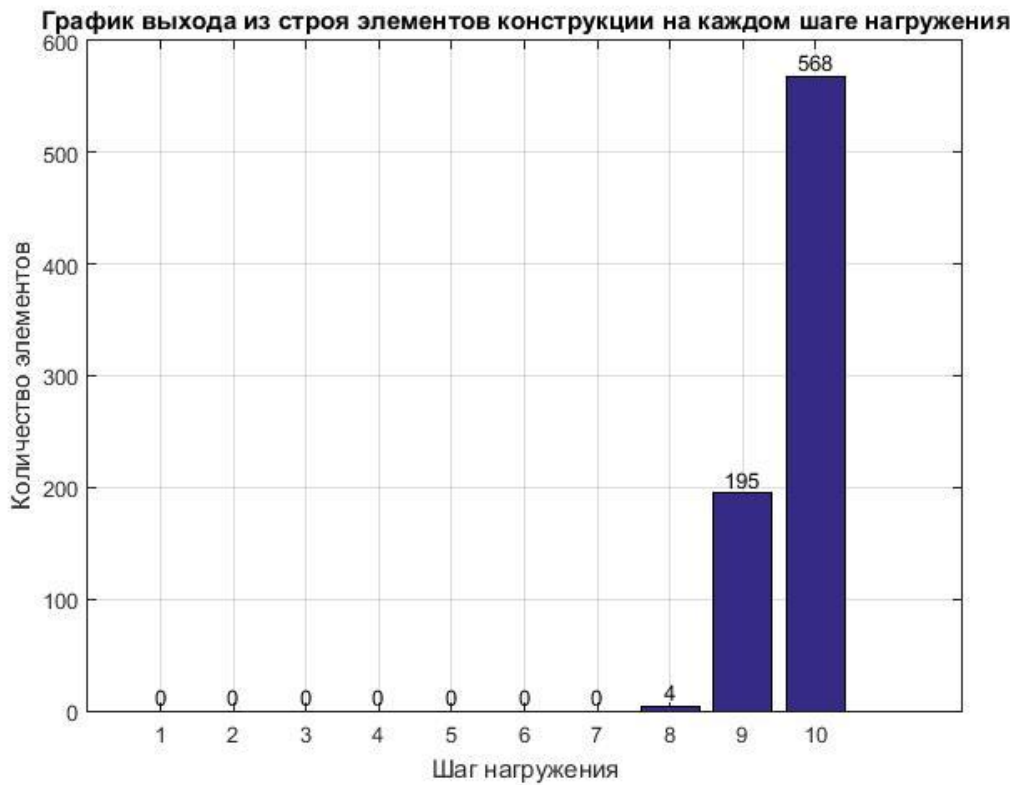


Рис. 3.5. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №3.

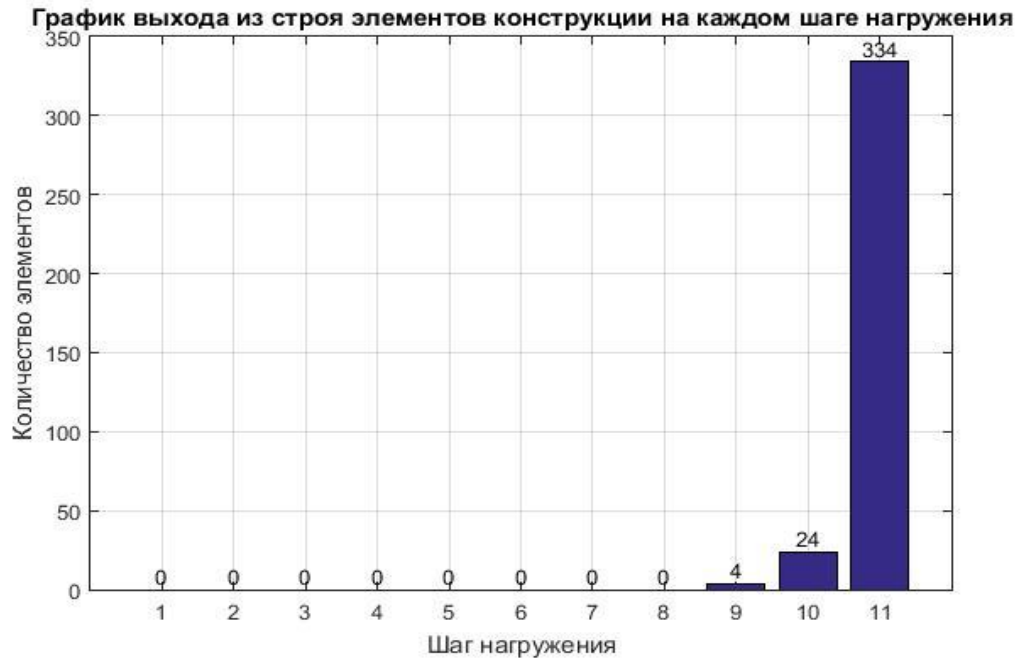


Рис. 3.6. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №4.

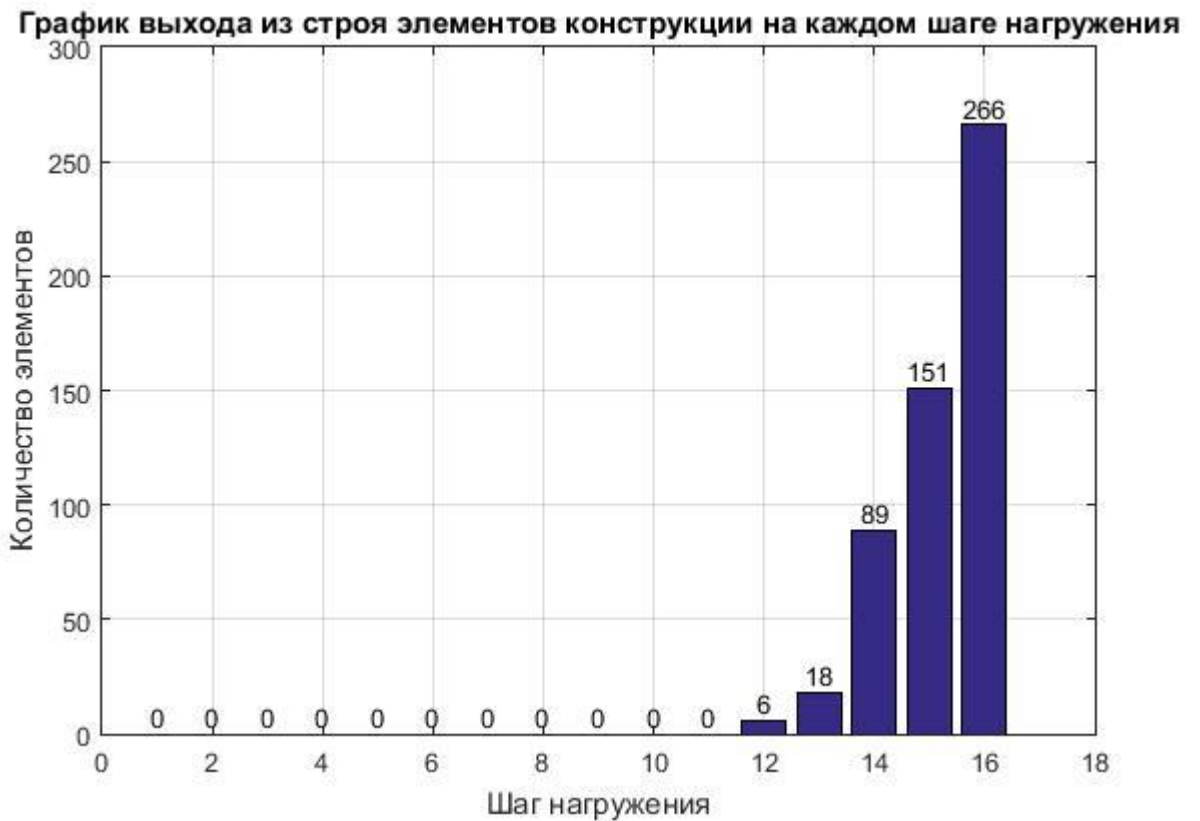


Рис. 3.7. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №5.

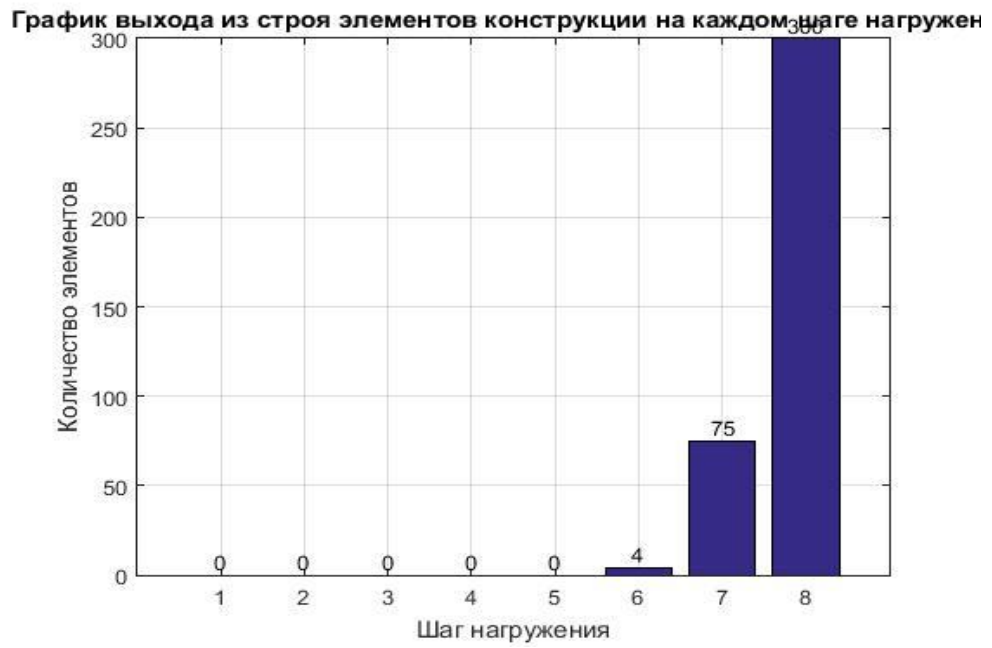


Рис. 3.8. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №6.

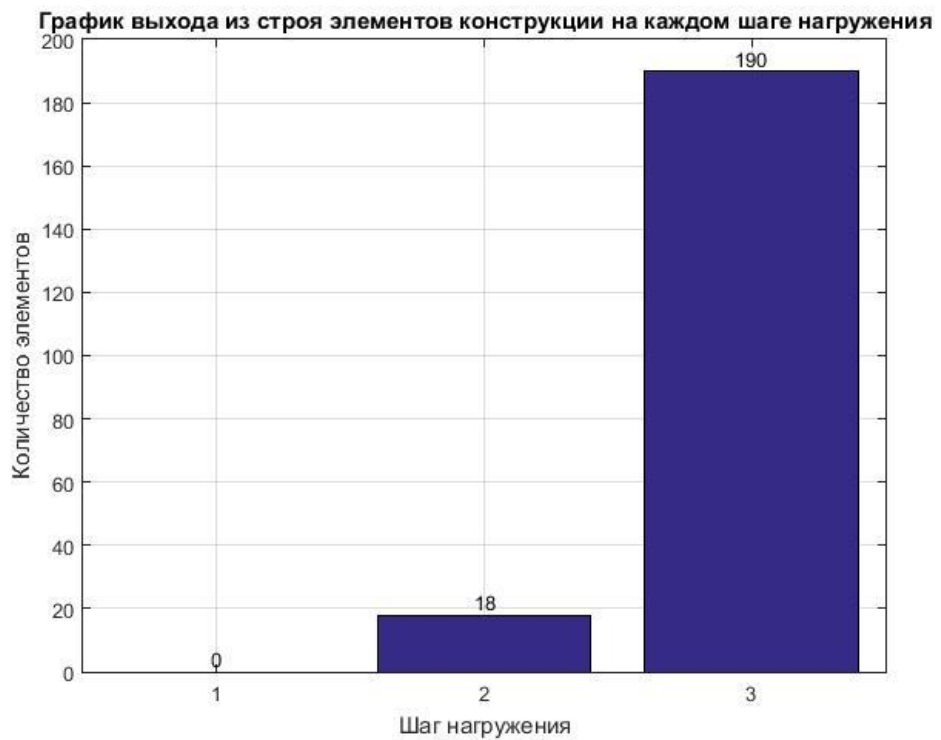


Рис. 3.9. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №7.

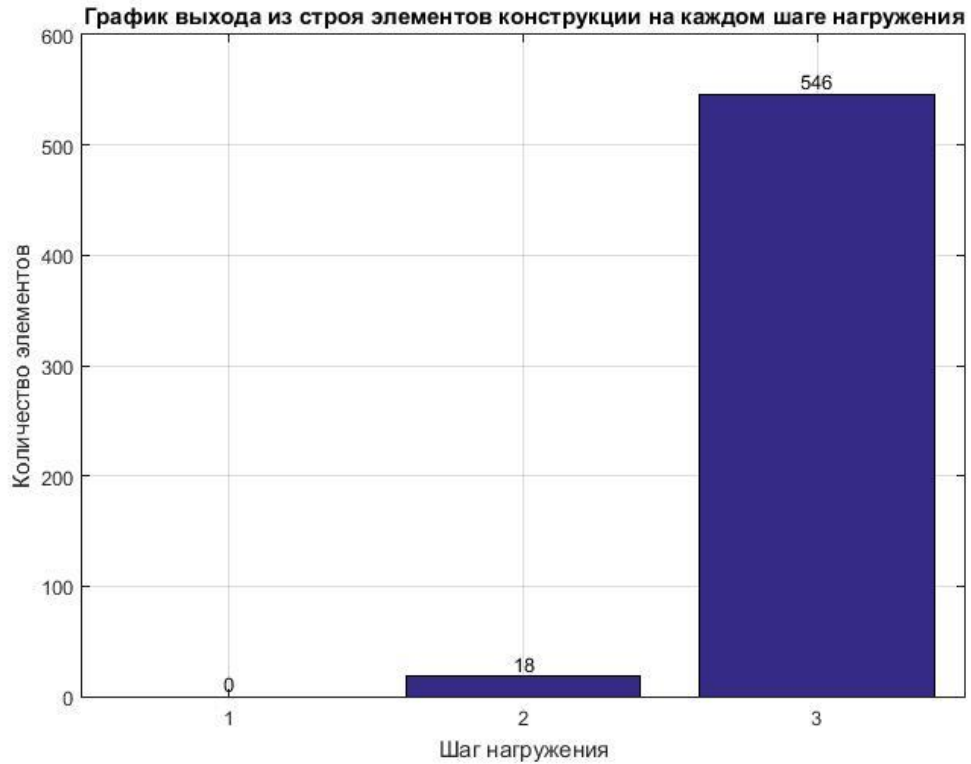


Рис. 3.10. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге дополнительного догружения для варианта конструкции №8.

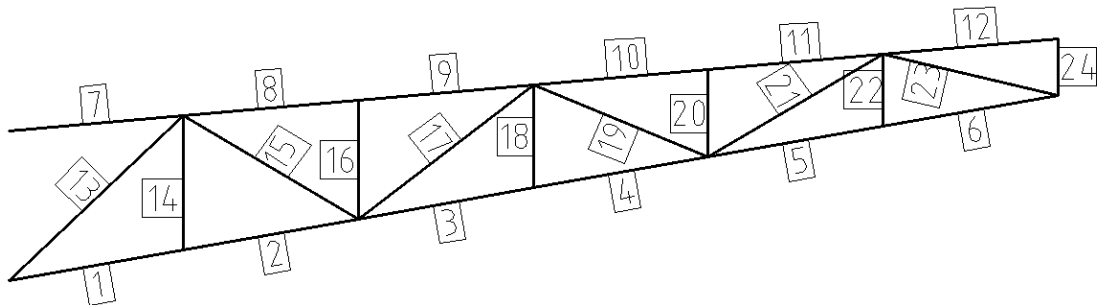


Рис. 3.11. Присвоение порядковых номеров стержням несущей фермы

Если детально проанализировать схему разрушения конструкции, то видно, что стержни, выходящие из строя в первую очередь (до первого этапа лавинообразного разрушения), принадлежат основной несущей конструкции – консольной ферме. В таблице 3.3 приведен список элементов вышедших из строя на первом этапе разрушения системы, но в рамках одной фермы, со стержнями испытывающими наибольшие значения нормальных напряжений.

Информация о выходе из строя стержней фермы, имеющей наибольшие напряжения в элементах

№	Шаг рам H (м)	Вылет фермы L (м)	Угол наклона α (°)	Шаг догру- жения кон- струкции	Количество исключаемых стержней	Номера ис- ключаемых стержней.
1	4	4	0	8	1	1
2	4	4	30	7	3	1,2,7
3	12	4	0	8	1	2
4	12	4	30	9	1	1
5	4	22	0	12	1	7
6	4	22	30	6	1	1
7	12	22	0	2	3	1,2,7
8	12	22	30	2	4	1, 2, 7, 13

В силу симметрии блока покрытия, наиболее напряженные элементы находятся в двух средних фермах.

Следовательно, надёжность всего покрытия может определяться надёжностью элемента или группы элементов приведенных в таблице 3.3 (раз. 2.1.1).

3.4 Алгоритм вычисления характеристик надёжности системы

Следует отметить, что рассмотрение системы покрытия, как статически определимой, позволяет зафиксировать нижнюю границу надёжности системы, определяемую вероятностью отказа одного, наиболее напряженного элемента,. Однако, на самом деле, система покрытия является многократно статически неопределимой, и выход из строя одного элемента не повлечет за собой разрушение всего покрытия. В этом случае оценка надёжности сводится к определению вероятности отказа сово-

купности элементов системы покрытия в целом, которая позволит зафиксировать верхнюю границу надежности исследуемой конструкции. Таким образом, общий уровень надежности покрытия всегда будет в рамках этих двух значений.

Для выбранных в предыдущем этапе расчете элементов выполняется циклический расчет, основанный на методе конечных элементов, с учетом указанных в разделе 2 случайных величин. Количество циклов расчета определяется совокупностью значений выборки входных случайных величин. Таким образом, формируется выборка напряжений для рассматриваемой группы стержней. Выборка должна иметь значительный объем. Исследуя эту проблему ряд авторов (Райзер, Шпетте, Пичугин) приводят числа в интервале 10^4 - 10^8 (что было обосновано в подразделе 2.1.2).

В качестве второй составляющей уравнения (1.1) выступает случайная величина характеристики сопротивления материала конструкции (предел текучести) $\check{R}(t)$, которая формируется на основе анализа статистических данных, полученных на металлургических заводах либо экспериментально.

Полученные две обобщенных случайных величины обрабатываются методами математической статистики (определяются их законы и плотности распределения).

На основе установленных законов распределения случайных величин вычисляются соответствующие статистические характеристик (математическое ожидание, стандартное отклонение). Далее, оперируя плотностью, законами и характеристиками распределений вычисляются вероятности отказа и характеристика безопасности (дальность отказа) для каждого из выбранных элементов в группе. Максимальное значение вероятности отказа является нижней границей вероятности отказа. На рисунке 3.12 изображена блок-схема предложенного алгоритма. Вероятность отказа определяется методом Монте-Карло [70].

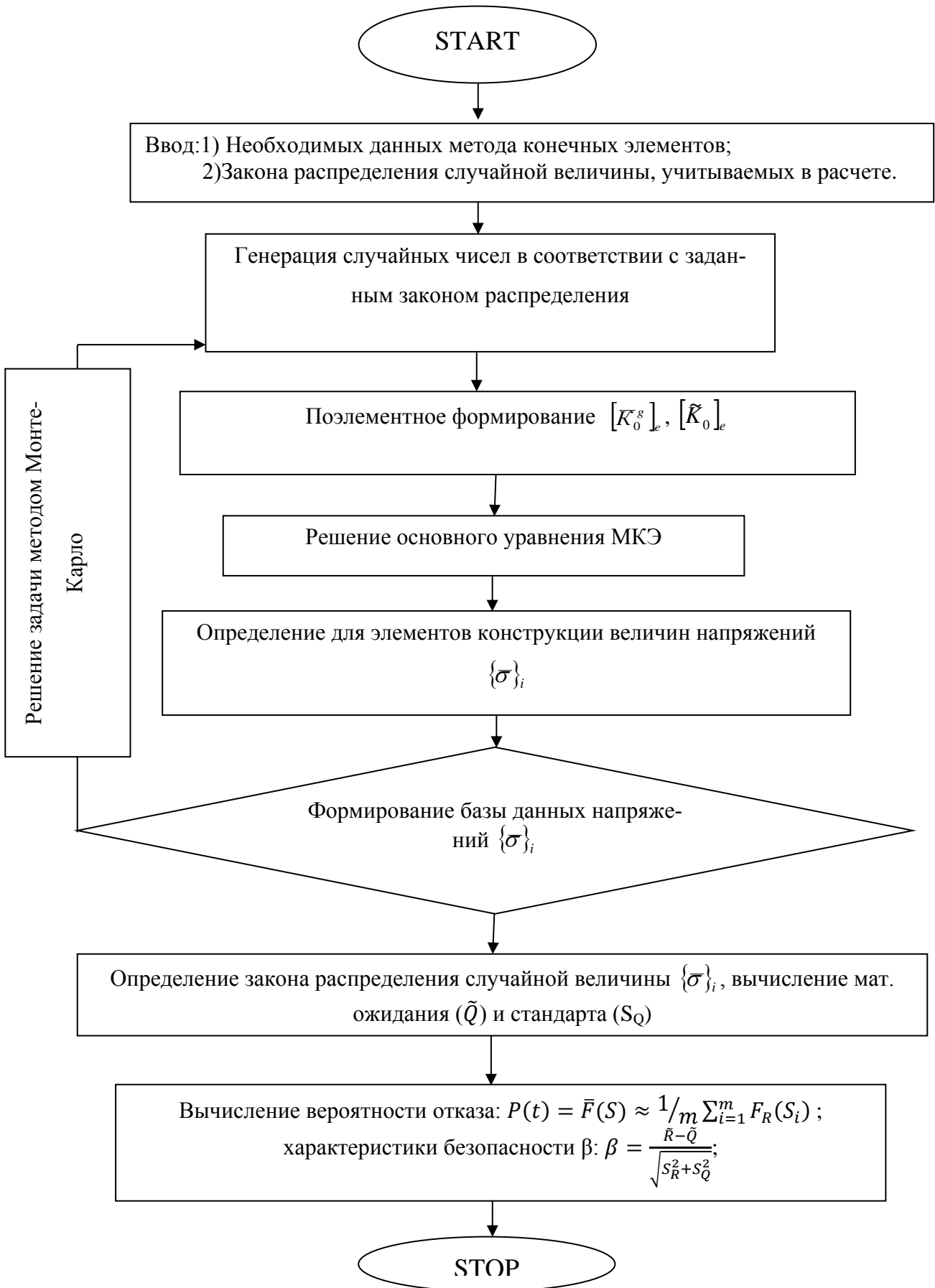


Рис. 3.12. Блок-схема алгоритма определения критериев надежности стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов

$$P(t) = \int_0^{\infty} R(t) p_s(t) dt = F_R(S) \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_R(S_i); \quad (3.1)$$

На каждом испытании по плотности вероятностей величины моделируется ее реализация t_i и определяется значение функции распределения величины R при аргументе t . Затем определяется среднее из этих значений по всем проведенным испытаниям. В нашем случае величина $S(t)$ (напряжение в конструкции) есть функция нескольких переменных, поэтому на каждом испытании по плотностям вероятностей этих величин моделируется их реализация и вычисляется $S(t)$. То есть, имея насчитанные выборки площади сечения и снеговой нагрузки, вычисляются реализации напряжений в конструкции, которые составляют выборку $S(t)$ в объеме не менее 10000 значений. Методами математической статистики определяется закон распределения, который с должной точностью аппроксимирует рассматриваемую непрерывную случайную величину напряжения в сечении элемента конструкции. Для предела текучести материала также определяется соответствующий закон распределения случайной величины. Далее, после подстановки значений напряжений в функцию распределения предела текучести вычисляем среднее значение полученной совокупности и, в соответствии с формулой (3.1), делим полученное число на количество испытаний. Вычисление значения характеристики безопасности β приведено в подразделе (1.2.2).

3.5. Исследование реальных прочностных свойств металлопроката прямоугольных гнутых замкнутых сварных труб

Так как реальные значения прочностных характеристик металлопроката играют важнейшую роль с точки зрения надежности сооружения, следовательно, необходима достаточно представительная статистическая информация о характеристиках проката в виде прямоугольных гнутых замкнутых сварных труб, которые наиболее часто используются в рамно-консольных покрытиях. Эта необходимость объясняется обновлением нормативной документации, изменением технологии производства гнутых замкнутых сварных труб и увеличением числа производителей, что имеет место на современном этапе развития экономики.

Для проведения эксперимента использовалась гнутых замкнутых сварных труба, поставляемая от двух металлургических заводов: «Луганский трубный завод» и «ПАО Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна». Исследовались сечения: 60x40x3 (Ст.3пс, номер плавки 0024198/2, номера пакетов 511-514); 100x100x3 (Ст.1пс, номер пакета 541349, номер плавки 320317); 100x60x30 (Ст.3пс, номер пакета 540879, номер плавки 1222772); 120x60x3 (Ст.3пс, номер плавки 0025232/2, номера пакетов 228-231).



Рис. 3.13. Разрывная машина Р-20 на кафедре сопротивления материалов ДонНАСА.

Эксперимент осуществлялся на сертифицированных разрывных машинах Р-20 кафедры теоретической и прикладной механики ДонНАСА, кафедры металлических конструкций ДонНАСА, а так же на машинах научно исследовательского института ПромстройНИИпроект в г. Донецке. Использовалась шкала с ценой деления 0,08 кН (рис. 3.13).

Было испытано по 100 образцов для каждого типоразмера. Отбор и подготовка образцов выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ [22]. Ширина образца составила 20 мм, длина 300 мм, толщина 3 мм (рис 3.14).

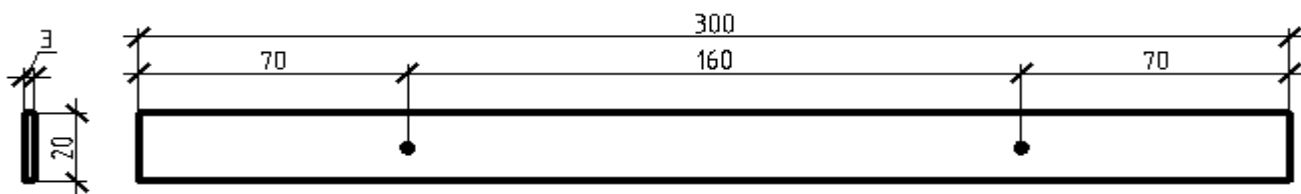


Рис. 3.14. Испытываемый образец.



Рис. 3.15. Образец после разрыва.

Таблица 3.4

Стохастические механические характеристики стали гнутых замкнутых сварных труб полученные опытным путем

№	Сечение	Сталь	Временное сопротивление R_b (мПа)			Условный предел текучести $R_{0,2}$ (мПа)			Модуль упругости E (10^5 мПа)		
			Мат. ожид.	Ст. откл.	Коэф. вар. (%)	Мат. ожид.	Ст. откл.	Коэф. вар. (%)	Мат. ожид.	Ст. откл.	Коэф.вар. (%)
1	60x40x3	Ст3пс	482,58	22,38	4,64	317,44	35,15	11,07	2,188	0,318	14,55
2	120x60x3	Ст3пс	443,67	31,07	7,00	332,21	22,07	6,65	2,063	0,159	7,71
3	100x100x3	Ст1пс	428,85	28,53	6,65	323,63	31,88	9,85	2,084	0,089	4,27
4	100x60x3	Ст3пс	418,54	25,84	6,17	379,03	29,46	7,77	2,129	0,167	7,85

Результаты статистической обработки данных эксперимента [16] представлены в таблице 3.4.

Следует отметить, что по результатам эксперимента были выявлены отклонения исследуемых механических характеристик проката от нормативных значений. Материал каждого из рассмотренных типоразмеров сечений был заявлен в сопроводительном паспорте металлопроката, как обыкновенная углеродистая сталь. Но не

один испытуемый образец не имел характерной площадки текучести (п. 2.3). Поэтому в дальнейших изысканиях был принят условный предел текучести $R_{0,2}$. Он соответствует напряжению в образце, при достижении уровня которого остаточная пластическая деформация составляет 0,2%.

Сечения 1,2 выпустил «Луганский трубный завод», а сечения 3,4 «ПАО Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна».

Выборки прочностных свойств металлопроката всех сечений были подвергнуты χ^2 -анализу, на предмет возможности аппроксимации распределения случайных величин «нормальным законом распределения», по критерию Пирсона (использовался *Microsoft Excel 2010*). Анализ показал, что распределение каждой из случайных величин отличается от нормального не более, чем на 5% (при заданном уровне значимости 0,05).

Таблица 3.5

Значения прочностных характеристик сечения гнутых замкнутых сварных труб, полученные опытным путем

№	Сечение	Сталь	Мат. ожидание		Стандарт		Числ. станд. (μ)	Эксп. знач. (мПа)		Значения по ДБН (мПа)	
			$\overline{\sigma}_B$	$\overline{\sigma}_{0,2}$	$\hat{\sigma}_B$	$\hat{\sigma}_{0,2}$		R_{yt}^n	R_{un}^n	R_{yt}	R_{un}
1	60x40x3	Ст3пс	482,58	317,44	22,38	35,15	3,15	206,72	411,50	225	370
2	120x60x3	Ст3пс	443,67	332,21	31,07	22,07	3,15	262,69	345,80	225	370
3	100x100x3	Ст1пс	428,85	323,63	28,53	31,88	3,15	223,21	338,98	-	-
4	100x60x3	Ст3пс	418,54	379,03	25,84	29,46	3,15	286,23	337,14	225	370

Следовательно, можно считать данные случайные величины подчиняющимися нормальному закону распределения.

Если для прочностных характеристик стали применить стандартную процедуру нормирования с обеспечением значений σ_B и $\sigma_{0,2}$ с вероятностью 99,8%, получим значения, приведенные в таблице 3.5.

Делая выводы по разделу 3.3, следует отметить, что реальные прочностные характеристики металлопроката могут в некоторой степени отличаться от нормативных значений. По результатам проведенного эксперимента были получены отклонения

прочностных свойств в диапазоне 8-27% (табл. 3.6), что, несомненно, повлияет на надежность и должны учитываться при анализе надежности проектируемой конструкции.

Также, выявлены отклонения от нормативных физико-механических свойств рассматриваемого металлопроката, а именно отсутствие площадки текучести у образцов, изготовленных из малоуглеродистой стали.

Таблица 3.6

Отклонения реальных прочностных характеристик гнутых замкнутых сварных труб, полученные опытным путем от нормативных значений

№	Сечение	Отклонение в %	
		R_{ym}^n	R_{un}^n
1	□ 60x40x3	8,12	11,22
2	□ 120x60x3	16,75	6,54
3	□ 100x100x3	–	–
4	□ 100x60x3	26,77	8,88

3.6. Исследование вероятности отказа, обусловленной изменчивостью снеговых нагрузок

Снеговая нагрузка является основным силовым воздействием на рассматриваемую конструкцию покрытия над трибунами стадионов. Для вычисления вероятности отказа, обусловленной действием снеговой нагрузки, используется методика, приведенная в разделе 3.4. В качестве исходных случайных величин в уравнении 1.1 выступают снеговая нагрузка и случайная величина предела текучести стали.

Используя методику, описанную в разделе 2.2 и данные [40], сформировано выражение для генерации снеговой нагрузки:

$$S = 521.48 - 270.413 \cdot \ln(-1.0 \cdot \ln(R + 0.0375)) \quad (3.2)$$

где: R- генератор равномерной случайной величины в пределах [0...0,935];



Рис. 3.16. Гистограмма относительных частот сгенерированной выборки снеговой нагрузки.

Необходимые параметры распределения Гумбеля получены путем анализа статистики годовых снеговых максимумов в течении 40 лет [22]. Анализируя выражение (3.2) видно, что должно выполняться условие: $\ln(R + 0.0375) < 0$, чтобы значение снеговой нагрузки не перешли в область комплексных чисел. При использовании максимального значения $R=0,935$ этого не произойдет. Данное выражение насчитывает снеговую нагрузку в пределах от 200 до 1500 Па, что соответствует характеру нагрузки для рассматриваемого региона. Используя формулу (3.3) в «Mathcad 15», генерируем выборку снеговой нагрузки в объёме 10000 значений (рис.3.16)

Полученные значения выборки снеговой нагрузки используются для формирования выборки напряжений в рассматриваемых элементах конструкции (п. 3.2.).

Расчет напряжений производится в разработанном автором программном комплексе, реализованном на языке программирования MATLAB, по алгоритму, приведенному в разделе 3.4. Учет вероятностного характера снеговой нагрузки производится на этапе формирования вектора эквивалентных узловых нагрузок. Выборка полученных напряжений в элементах конструкции обрабатывается методами математической статистики, на предмет определения закона распределения случайной величины. Для этой цели, в частности, были применены критерии согласия Шапиро-Уилка и Колмогорова-Смирнова. По результатам вычислений было установлено, что данная случайная величина с вероятностью 95% (был установлен уровень значимости 0.05) соответствует нормальному распределению Гаусса, для всех рассматриваемых геометрических вариантов.

Таблица 3.7.

Характеристики надежности наиболее ответственного элемента конструкции при учете снеговой нагрузки, как случайной величины

№ схемы	Характеристики безопасности β	Вероятности отказа P_f
1	5,46	$0,946 \cdot 10^{-7}$
2	5,21	$0,564 \cdot 10^{-7}$
3	5,41	$0,629 \cdot 10^{-7}$
4	5,77	$0,994 \cdot 10^{-7}$
5	5,91	$0,547 \cdot 10^{-8}$
6	5,04	$0,743 \cdot 10^{-7}$
7	4,85	$0,217 \cdot 10^{-5}$
8	4,81	$0,443 \cdot 10^{-5}$

В качестве второй случайной величины уравнения 1.1. рассматривается стохастическая величина предела текучести стали. Характеристики данной величины принимаются на основании экспериментальных данных полученных в разделе 3.4.

В итоге были получены значения вероятности отказа и характеристики безопасности приведенные в таблице 3.7.

3.7 Исследование изменчивости показателей надежности конструкции, обусловленное податливостью основания и геометрических несовершенств, получаемых конструкцией при монтаже

Так как способы учета геометрических несовершенств, получаемых конструкцией на монтаже, а также, обусловленные податливостью основания, описанные в разделах 2.4 и 2.5, крайне сложно реализуемы для много раз статически неопределимой системы, каковой является рассматриваемая конструкция покрытия над трибунами стадиона, то учет данных факторов осуществляется в виде случайных величин отклонений узлов конструкции от заданного первоначального положения [90]. На практике это реализовалось с помощью фиксации координат узлов конструкции методами геодезического контроля [111].

Именно использование современных спутниковых технологий GPS в комбинации с классическими методами высокоточного нивелирования дает наиболее ощутимые результаты, как по оперативности определения деформаций, так и по точности измерений. На основании этих методов была проведена геодезическая съемка геометрии конструкции трибун главного игрового поля СК «Олимпик», с целью получения необходимой статистической информации. Исследования проводились в июле-сентябре 2013 года на стадионе «Олимпик» в г.Донецке.

В ходе исследований были заложены 3 пункта геодезической сети стадиона и ряд контрольных точек на несущих стойках и фермах зрительной трибуны стадиона (рис. 3.18, 3.19). В результате эксперимента были выполнены 3 цикла измерений декартовых координат X , Y , Z и перепады высот контрольных точек методами GPS-съемки и нивелирования. Позже, выполнен независимый анализ деформаций сооружений во времени и в пространстве, используя данные GPS и данные нивелирования

отдельно. В исследованиях применялись система Leica GPS 1200 и цифровой нивелир Leica Sprinter 50.

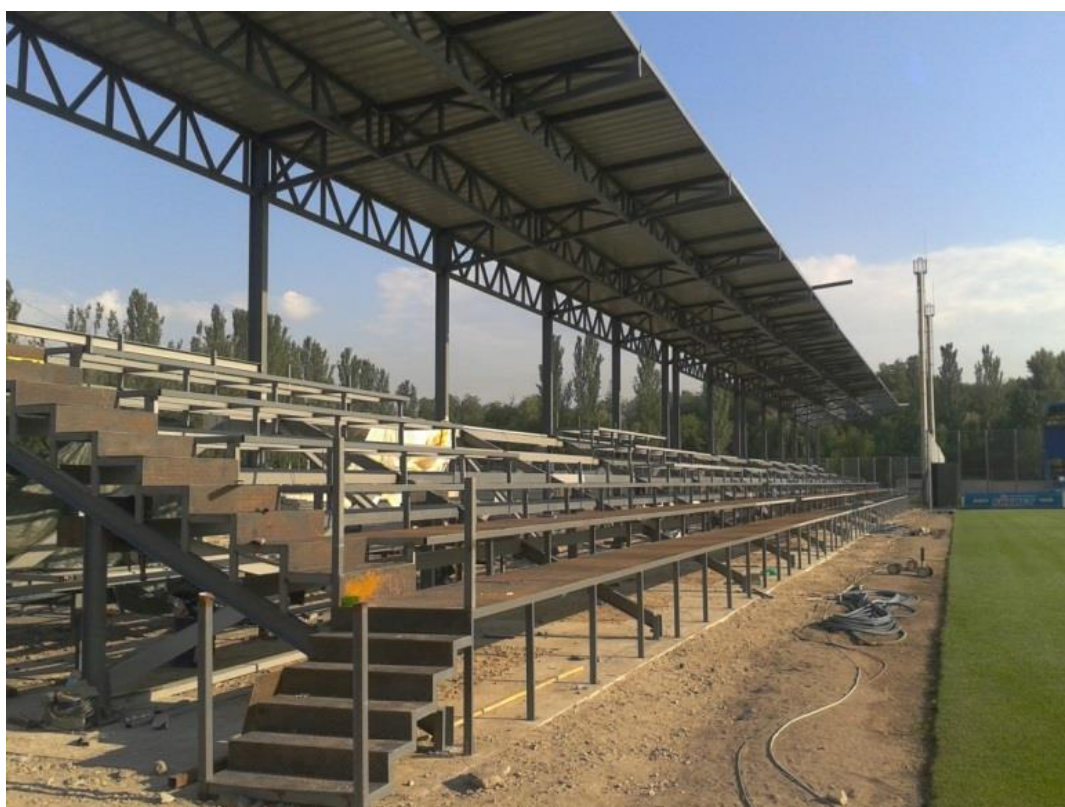


Рис. 3.17. Конструкция стационарного покрытия над трибунами стадиона СК «Олимпик»

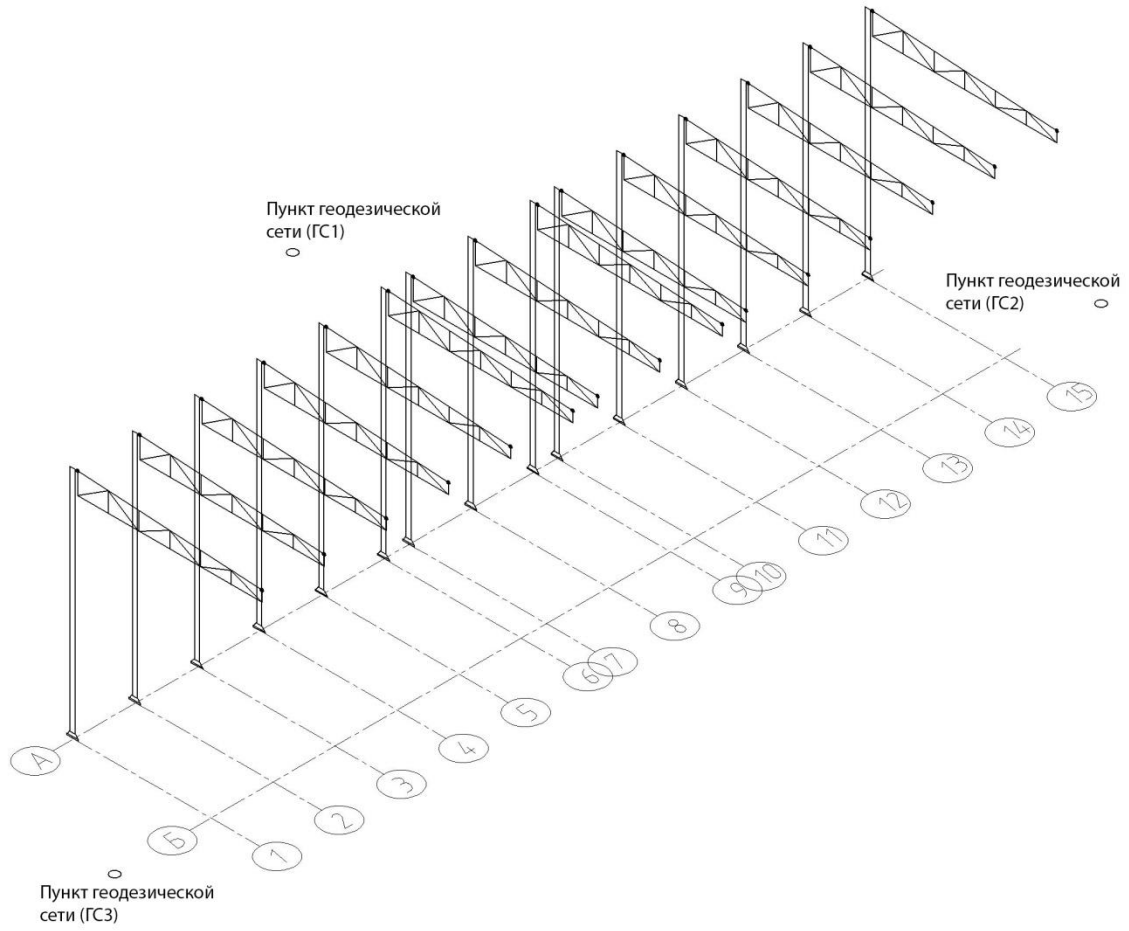


Рис. 3.18. Схема геодезической сети для мониторинга конструкций трибун.

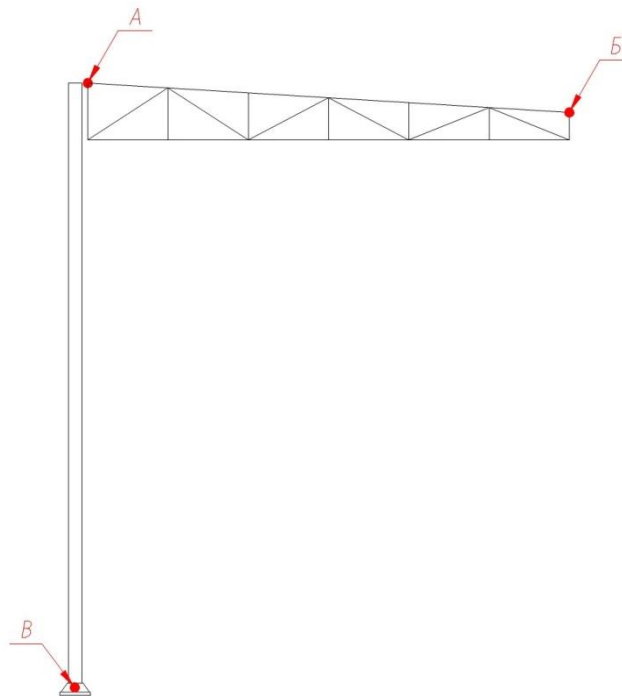


Рис. 3.19. Схема контрольных точек на конструкциях трибун.

Геодезическая сеть была построена с целью контроля геометрических параметров конструкций, а также для дальнейшего мониторинга сооружения в процессе эксплуатации. Наблюдения выполнялись тремя циклами с интервалами в 1 месяц. В нулевом цикле были зафиксированы исходные координаты пунктов сети и координаты контрольных точек на несущих конструкциях трибуны стадиона. Анализ деформаций строительных конструкций оценивался по результатам последующих двух циклов наблюдений, в которых определялись стабильные и нестабильные точки съемки.

Анализ деформаций сооружения оценивался в три этапа. На первом этапе, измерения, которые проводились в первом и втором циклах наблюдений, уравниваются отдельно в соответствии с методом свободного уравнивания. На этой стадии выявляются и устраняются погрешности и систематические ошибки измерений. На втором этапе выполняется комплексная оценка эксперимента, по которой проверяются стабильности точек съемочной сети в интервалы времени:

$$\Delta t_n = T_n - T_{n-1} \quad (3.3)$$

После определения группы стабильных точек в результате комплексной оценки, третьим шагом анализа является определение деформаций контрольных точек по высоте.

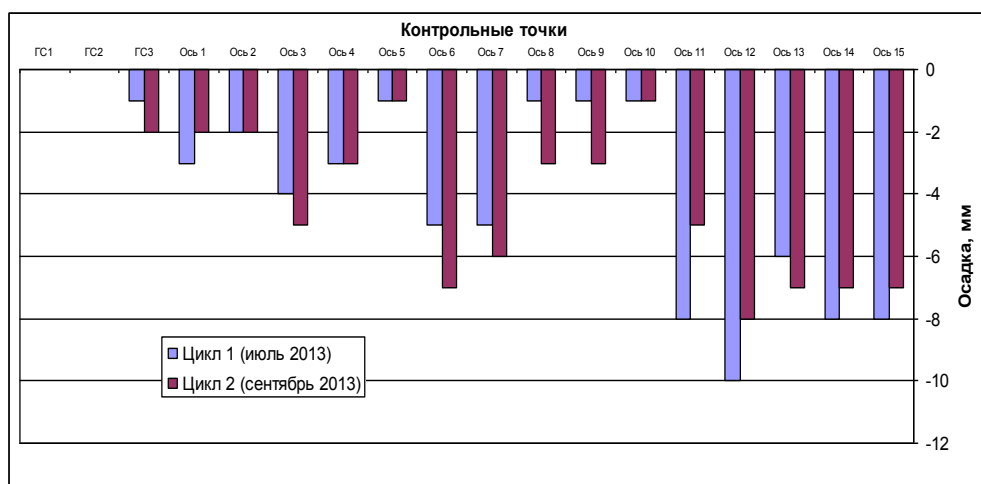


Рис. 3.20. График осадок конструкций трибун стадиона по точке «В».



Рис. 3.21. График разброса высотных отметок точки «А».



Рис. 3.22. График разброса высотных отметок точки «Б»

Для этой цели, значения отклонений по высоте рассчитываются для каждой из точек сети, кроме стабильных точек, и они сравниваются с критическими значениями, которые даются в таблице распределения Фишера.

Метод традиционного анализа деформаций был применён во всех трёх схемах: нивелирование контрольных точек; GPS съёмка высот и комбинация обоих методов. Результат, полученный из оценки этих трех схем, показан в графиках [24] (рис. 3.20-3.22) .

На основе анализа выборки отклонений геометрии точек А, Б, В, полученные при геодезической съёмке геометрии и просадок конструкции стационарного рамно-консольного покрытия над трибунами стадиона «Олимпик», построена гистограмма распределения отклонений (рис. 3.23). Представляя отклонения геометрии точек как случайную величину, рассматривались несколько законов распределения на предмет аппроксимации (χ^2 , логнормальное и нормальное распределения) [72, 100]. В качестве аппроксимирующего, принят нормальный закон распределения. Дополнительно рассматриваемая случайная величина было подвергнуто χ^2 - анализу по критерию Пирсона (использовался *Microsoft Excel 2010*). Анализ показал, что распределение отклонений случайной величины по рассматриваемым точкам отличается от нормального не более чем на 5% (был задан уровень значимости 0,05). Следовательно, можно считать нормальный закон распределения приемлемым.



Рис. 3.23. Гистограмма распределения отклонений координат узлов конструкции с аппроксимирующими кривыми.

Учет геометрических отклонений (как полученных на монтаже, так и возникших вследствие просадок фундаментов) учитывается в программном комплексе (п.3.4) на этапе формирования массива координат узлов, путем генерации приращений координат и дальнейшей корректировки.

Используя выше изложенный метод конечных элементов в вероятностной постановке и учитывая геометрические отклонения в качестве случайной величины, вычисляется вероятность отказа конструкции и характеристика безопасности. Данные полученные в результате расчета приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8.

Характеристики надежности наиболее ответственного элемента конструкции при учете податливости основания и геометрических несовершенств полученных на монтаже, как случайной величины

№ схемы	Характеристики безопасности	Вероятности отказа
	β	P_f
1	5,72	$0,235 \cdot 10^{-9}$
2	5,33	$0,783 \cdot 10^{-8}$
3	5,64	$0,698 \cdot 10^{-7}$
4	5,93	$0,988 \cdot 10^{-7}$
5	6,07	$0,255 \cdot 10^{-9}$
6	5,21	$0,815 \cdot 10^{-7}$
7	4,82	$0,348 \cdot 10^{-5}$
8	4,79	$0,321 \cdot 10^{-5}$

3.8. Исследование изменчивости показателей надежности конструкции, обусловленное начальными геометрическими несовершенствами плоских сечений металлопроката

Наряду с прочностными свойствами металлопроката значимую роль, с точки зрения надежности, а так же напряженно-деформированного состояния конструкции в целом, играют геометрические характеристики плоских сечений проката. Ввиду

отсутствия статистических данных отклонений геометрии плоских сечений прямоугольных гнутых замкнутых сварных труб, было принято решение провести анализ данного фактора у производителей металлопроката Украины (как наиболее доступного на момент проведения изысканий) [97]. Как и в пункте 3.4 анализировались гнуто-сварные трубы двух производителей: «Луганский трубный завод» и «ПАО Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна». Рассматривались сечения: 60x40x3 (Ст.3пс, номер плавки 0024198/2, номера пакетов 511-514); 100x100x3 (Ст.1пс, номер пакета 541349, номер плавки 320317); 100x60x30 (Ст.3пс, номер пакета 540879, номер плавки 1222772); 120x60x3 (Ст.3пс, номер плавки 0025232/2, номера пакетов 228-231).

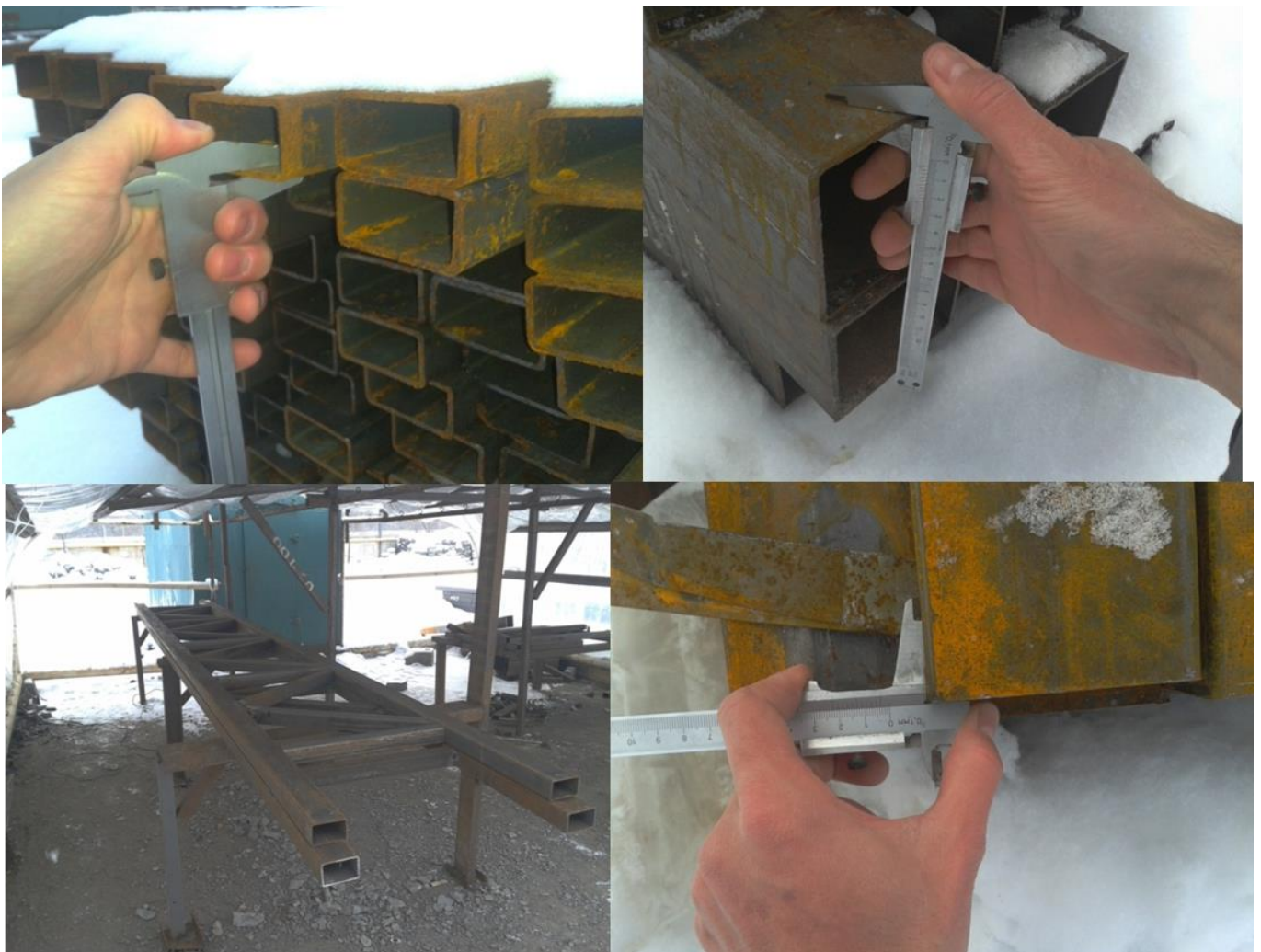


Рис. 3.22. Замеры геометрических размеров сечений гнутых замкнутых сварных труб.

Стохастические характеристики размеров сечений гнутых замкнутых сварных труб, полученные опытным путем

№	Сечение	Кол-во замеров	Толщина стенки (мм)			Высота сечения (мм)			Ширина сечения (мм)		
			Мат. ожид.	Ст. откл.	Коэф. вар. (%)	Мат. ожид.	Ст. откл.	Коэф. вар. (%)	Мат. ожид.	Ст. откл.	Коэф. вар. (%)
1	60x40x3	40	2,91	0,25	8,52	58,35	1,48	2,54	38,77	2,15	5,54
2	120x60x3	40	2,92	0,19	6,63	116,07	3,98	3,4	58,39	2,79	4,77
3	100x100x3	40	2,91	0,26	9,10	99,13	5,60	5,65	98,34	5,85	5,95
4	100x60x3	40	2,89	0,23	8,00	97,51	5,63	5,77	57,79	1,71	2,96

Сформированные выборки геометрических размеров сечений гнутых замкнутых сварных труб были подвергнуты χ^2 - анализу, на предмет возможности аппроксимации распределения случайных величин нормальным законом распределения, по критерию Пирсона (использовался *Microsoft Excel 2010*). Анализ показал, что распределение каждой из случайных величин отличается от нормального не более чем на 5% (был задан уровень значимости 0,05). Следовательно, можно считать данные случайные величины, подчиняющимися нормальному закону распределения.

Таблица 3.10.

Максимальные и минимальные значения характеристик сечения гнутых замкнутых сварных труб, полученные опытным путем, в процентном отношении от нормативных значений.

№	Сечение	A(%)		I _x (%)		I _y (%)		W _{max} (%)	
		min	max	min	max	min	max	min	max
1	60x40x3	93,4	107,3	78,5	104,3	79,3	110,5	80,2	107,4
2	120x60x3	89,4	110,8	89,9	105,4	78,7	115,4	84,3	111,2
3	100x100x3	91,7	124,3	80,4	109,7	90,8	108,1	87,7	110,7
4	100x60x3	93,5	108,3	94,6	110,9	84,9	115,1	90,1	108,3

Анализируя полученные характеристики распределений геометрических размеров сечений металлопроката, следует отметить, что геометрические характеристики

отклоняются в сторону минусовых допусков вследствие экономии металла. А это приводит к уменьшению площади сечения, и, следовательно, увеличению напряжения в элементе. Также видно, что все толщины стенок превысили максимально допустимое отклонение в 0,03 мм (1% от номинального размера согласно [29]). Указанные отклонения в геометрических размерах сечений приводят к изменению характеристик сечений в диапазонах указанных в таблице 3.10. Полученные вероятностные характеристики геометрических сечений гнутых замкнутых сварных труб используются в предложенном выше программном комплексе, и их учет осуществляется на этапе формирования локальных матриц жесткости элементов на каждом этапе расчета.

Используя выше изложенный метод конечных элементов, в вероятностной постановке, и учитывая геометрические отклонения сечений металлопроката гнуто сварных прямоугольных труб, в качестве случайной величины, вычисляется вероятность отказа конструкции и характеристика безопасности. Данные полученные в результате расчета приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11.

Характеристики надежности наиболее ответственного элемента конструкции при учете геометрических несовершенств плоских сечений металлопроката, как случайной величины

№ схемы	Характеристики безопасности	Вероятности отказа
	β	P_f
1	7,04	$0,334 \cdot 10^{-11}$
2	6,52	$0,543 \cdot 10^{-11}$
3	7,22	$0,752 \cdot 10^{-10}$
4	7,11	$0,654 \cdot 10^{-10}$
5	7,21	$0,256 \cdot 10^{-11}$
6	6,29	$0,112 \cdot 10^{-9}$
7	6,03	$0,952 \cdot 10^{-6}$
8	5,99	$0,419 \cdot 10^{-7}$

3.9 Учет совместного действия вышеперечисленных факторов при определении показателей надежности рассматриваемых схем

Так как факторы рассмотренные в разделах 3.5-3.8 как правило оказывают совместный эффект на конструкцию покрытия над трибунами стадиона (по крайней мере в зимний период), то вполне логичным действием был бы совместный учет их влияния при вычислении прочностных характеристик системы [73].

Вероятность отказа и характеристику надежности рассматриваемых форм конструкции покрытия над трибунами стадиона при совместном учете таких случайных величин как: прочностные свойства металлопроката, начальные геометрические несовершенства проката, снеговая нагрузка, податливость основания (просадка) и геометрические несовершенства полученные конструкцией на монтаже представлены в таблице 3.12.

Характеристики и распределения рассматриваемых случайных величин принимаются аналогичными, приведенным в предыдущих разделах.

Таблица 3.12.

Характеристики надежности наиболее ответственного элемента конструкции при комплексном учете ряда случайных величин

№ схемы	Экспериментальные значения		Нормативные значения (ДБН)	
	β	P_f	β_i^{ex}	P_i^{ex}
1	4,47	$0,824 \cdot 10^{-4}$	4,76	1×10^{-6}
2	4,49	$0,772 \cdot 10^{-4}$		
3	4,52	$0,835 \cdot 10^{-4}$		
4	4,89	$0,568 \cdot 10^{-6}$		
5	5,01	$0,986 \cdot 10^{-6}$		
6	3,57	$0,378 \cdot 10^{-4}$		
7	3,22	$0,267 \cdot 10^{-4}$		
8	3,08	$0,399 \cdot 10^{-4}$		

Примечание: серым цветом выделены ячейки, в которых указан уровень надежности ниже нормативного значения.

Следует сразу отметить, что вероятность отказа является вероятностной величиной и следовательно может варьироваться. При повторных пересчётах данных она имела амплитуду разброса в пределах 10-12%. Характеристика безопасности β является более стабильной величиной, но тоже имела разброс в пределах 6-8%. Это объясняется вычислением характеристики безопасности на основании обработки двух выборок: выборки напряжений в наиболее ответственном элементе и выборки случайного значения предела текучести материала конструкции.

Анализируя данные приведенные в таблице 3.12 однозначно можно сказать, что комплексный учет стохастических величин дает большее значение вероятности отказа, чем каждой по отдельности.

Полученные в ходе численного эксперимента значения характеристик безопасности сопоставимы с нормативными [32], но в большинстве вариантов (1-3, 6-8) не удовлетворяют требования надежности, выдвигаемым к покрытиям над трибунами стадионов как к конструкциям, в случае обрушения которых могут быть большие финансово-экономические, а также, людские потери.

3.10 Выводы по разделу

Анализируя данные полученные по результатам численного эксперимента в главе 3 можно сделать ряд выводов:

1. По результатам испытания стальных образцов гнуто-сварных труб двух производителей, было выявлено несоответствие реальных физико-механических характеристик материала нормативным значениям. По результатам испытания стальных образцов гнуто-сварных труб на разрыв сформирована реальная статистическая информация о прочностных свойств четырех типоразмеров (60x40x3, 100x100x3, 100x60x30, 120x60x3)металлопроката в виде гнутых замкнутых сварных труб заводов «Луганский трубный завод» и «ПАО Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна». Реальные прочностные характеристики металлопроката отличаются от приведенных в нормативной литературе (до 10%), что может приводить к перенапряжению сечения и разрушению элемента ($R_{un} = 370(\text{МПа}) > \overline{R_B} = 337,14(\text{МПа}); R_{yn} = 225(\text{МПа}) > \overline{R_{0,2}} = 206,72(\text{МПа})$). Данная проблема решена путем использования

реальных стохастических значений прочностных характеристик в численных расчетах рамно-консольных конструкций с использованием прямых методов теории надежности реализованных в программном комплексе на языке программирования MATLAB.

2. При испытании образцов на разрыв, упомянутых в п. 1 настоящих выводов, отсутствовала характерная площадка текучести. Данное явление может быть объяснено тем, что площадка текучести исчерпывается процессе передела листовой заготовки в прямоугольную форму, однако отмеченный эффект требует отдельного дополнительного изучения и обоснования.

3. Анализ случайных величин геометрических характеристик исследованных сечений, а так же прочностных свойств исследованного металлопроката двух украинских производителей («Луганский трубный завод» и «ПАО Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна»), позволяет утверждать, что они подчиняются нормальному закону распределения, что доказано посредством проведения χ^2 -теста (*Microsoft Excel 2010*). При этом установлено, что распределение каждой из случайных величин отличается от нормального не более, чем на 5%.

4. Комплексный и частный учет таких стохастических величин как прочностные свойства металлопроката, начальные геометрические несовершенства проката, снеговая нагрузка, податливость основания (просадка) и геометрические несовершенства, полученные конструкцией на монтаже; позволяет оценить влияние каждого отдельного фактора на общую надежность системы. Путем анализа вероятности отказа отдельно рассмотренного фактора установлено, что наибольшее влияние на надежность оказывает снеговая нагрузка, и далее (в порядке убывания) податливость основания и геометрические несовершенства, полученные на монтаже, исходные геометрические несовершенства проката.

5. По результатам численного эксперимента установлено, что в силу стохастического характера величины вероятности отказа P_f , она менее чётко характеризует степень надежности конструкции, в отличие от характеристики безопасности β .

Следовательно, с целью более точной оценки надежности системы, рекомендуется пользоваться (в случае возможности) характеристикой β .

6. Анализ показателей надежности рассмотренных конструктивных схем, за-проектированных в соответствии с требованиями нормативных документов в рамках расчета по предельным состояниям, показывает, что такой подход в большинстве случаев не обеспечивает требуемого уровня надежности уникальных конструкций, каковыми являются стационарные стальные рамно-консольные покрытия над трибунами стадионов. Следовательно, можно сделать вывод о необходимости применения прямых методов теории надежности для подбора сечений элементов конструкции, определения показателей надежности с последующим уточнением соответствующих значений частных коэффициентов надежности.

7. Рекомендуемые нормами общие меры учета ответственности сооружения (учет коэффициента надежности по ответственности γ_n , класс последствий здания и сооружения, категории ответственности конструкций и их элементов в рамках ДБН и Еврокод) не всегда обеспечивают требуемый уровень надежности β_i^{ex} для сооружений повышенной ответственности. Для отдельных ключевых элементов конструкции, определяющих вероятность ее отказа, наиболее просто это сделать корректировкой значений коэффициента условий работы γ_c , но в существующей нормативной литературе их значения предлагаются без такого учета степени ответственности сооружения и нуждаются в уточнении.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ РАССМАТРИВАЕМЫХ СХЕМ РАМНО-КОНСОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

На данный момент проектирование стальных рамно-консольных стационарных конструкций покрытий над трибунами стадионов базируется на методе предельных состояний. Данный метод лежит в основе таких нормативных документов в области строительства как ДБН [34], СП [78], EUROCODE [104], а также многих других. При использовании методики, предложенной в этих документах, возникает ряд спорных вопросов в области обеспечения надежности конструкции. Метод предельных состояний требует сопоставления расчетного напряжения в элементе (Q_p) с расчетным значением несущей способности (R_y). При выполнении условия $Q_p < R_y$, считается, что надежность обеспечена. Таким образом, надежность конструкций во всех расчетных случаях оказывается приблизительно одинаковой и зависит только от расчетной и конструктивной схемы, а так же материала конструкции. Пытаясь учесть этот недостаток норм, ДБН [32] и EUROCODE [105] ранжируют конструкции по классу последствий аварий (экономических и людских потерь) и категориям ответственности, а так же приводят максимально допустимые характеристики надежности для этой классификации. Но, несмотря на требования строительных норм обеспечивать заданную степень надежности строительных конструкций, при использовании методики проектирования по предельным состояниям, не всегда это условие выполняется для конструкций повышенной ответственности. Данное противоречие наиболее целесообразно учесть путем уточняющей корректировки значений коэффициента условий работы конструкции γ_c , как коэффициента отвечающего за учет несовершенств и отклонений в расчетной схеме конструкции. Руководствуясь изложенными предпосылками, разработан алгоритм расчета коэффициента условий работы для элементов конструкции.

4.1 Разработка алгоритма расчета коэффициента условий работы γ_c и подбора требуемых сечений элементов, основанного на обеспечении заданного уровня надежности элемента, как части системы

Пересчет коэффициентов условий работы и подбор требуемых сечений металлопроката, исходя из требований надежности, для рамно-консольных стационарных конструкций покрытий над трибунами стадионов производится в два основных этапа.

1. На первом этапе формируется совокупность стержневых элементов системы для которых будет выполняться пересчет. Так как система много раз статически неопределима, наиболее целесообразно производить вычисления для наиболее ответственных элементов. С этой целью производится итерационный геометрически и конструктивно нелинейный расчет конструкции, итогом которого является список элементов поочередно вышедших из строя. Процедуры этого этапа полностью аналогичны действиям, описанным в пункте 2.1.1. Основываясь на полученных данных, выбирается группа наиболее ответственных элементов конструкции, для которых целесообразно производить пересчет коэффициента условия работы.

2. Для выбранных в предыдущем этапе расчете элементов выполняется итерационный расчет с учетом указанных случайных величин. Таким образом, формируется выборка напряжений для рассматриваемой группы стержней. Выборка должна иметь значительный объем. Исследуя эту проблему ряд авторов (В.Д. Райзер, Г. Шпетте, С.Ф. Пичугин) приводят рекомендуемый объем выборки в интервале 10^4 - 10^8 . В качестве второй случайной величины требуемой в расчете [72] выступает случайная величина сопротивления материала конструкции (предел текучести), характеристики распределения которой определяются на основе анализа статистических данных, полученных экспериментальным путем в исследовательских или заводских лабораториях. Указанные две обобщенные случайные величины обрабатываются методами математической статистики. Определяются их законы и плотности распределения, с точностью, удовлетворяющей требованиям расчета. Оперировав плотностью, законами и характеристиками распределений вычисляются вероятно-

сти отказа группы выбранных элементов. Насчитанные характеристики надежности сравниваются с нормативными требованиями с учетом ответственности рассматриваемой конструкции. В случае удовлетворения требований надежности расчет заканчивается. Если надежность не обеспечена, пересчитываются частные коэффициенты надежности и решается обратная задача, целью которой, становится определить требуемое значение математического ожидания напряжений в элементах конструкций, а от него перейти к требуемым площадям стержней. Конструкция с переопределенными размерами сечений пересчитывается заново по выше описанному алгоритму. Итерации ведутся до момента удовлетворения условий прочности рассматриваемой группой элементов.

Все приведенные действия, описанные в методике, довольно детально рассмотрены в предыдущих разделах работы. Неосвещенным остается способ вычисления коэффициента условий работы. Основываясь на методике описанной в параграфе 1.2.3 и работах Мущанова В.Ф. [50, 51], вывод выражения вычисления реального коэффициента условий работы возможно осуществить основываясь на ниже изложенных выражениях.

Рассмотрим условие первого предельного состояния, выраженное по средствам величин напряжений и расчетного сопротивления материала конструкции:

$$\sigma^p \leq R_y \quad (4.1)$$

где: σ^p - расчетное напряжение;

R_y - расчетное сопротивление стали по пределу текучести;

Запишем выражение (4.1) через произведение характеристических величин и соответствующих им частных коэффициентов надежности и выразим γ_c .

$$\gamma_c \leq \frac{\gamma_m \sigma^p}{R_y} \quad (4.2)$$

Отсутствие учета факторов, влияющих на степень идеализации расчетной схемы и снижающих надежность элемента конструкции, может быть выражено добавкой $\Delta\gamma_c$, по отношению к характеристическому значению.

$$\gamma_c^p = \gamma_c^0 - \Delta\gamma_c = 1 - \Delta\gamma_c \quad (4.3)$$

где: γ_c^p - скорректированное значение коэффициента условий работы;

Добавка $\Delta\gamma_c$ обусловленная влиянием неучтенных геометрических несовершенств, начальных отклонений толщины проката и т.д., может быть определена учетом соответствующей добавки напряжений $\Delta\tilde{\sigma}$. Тогда, с учетом выше изложенного, имеем:

$$\gamma_c^p = 1 - \frac{\gamma_m \Delta\tilde{\sigma}}{\bar{R}_y^n (1 - \mu_r k_r)} \quad (4.4)$$

где: $\Delta\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}^p - \sigma_0^p$ - добавки напряжения, обусловленные неучтенными случайными факторами (геометрические несовершенства, начальные отклонения толщины проката ...);

$\tilde{\sigma}^p$ - напряжения в элементах конструкции, вычисленные с учетом случайных факторов;

σ_0^p - напряжения в элементах конструкции, вычисленные без учета случайных факторов;

Тогда окончательно формула (4.4) приобретает вид:

$$\gamma_c = 1 - \frac{\gamma_m \left(\frac{\bar{\sigma}^p}{1 - \mu_\sigma k_\sigma} - \sigma_0^p \right)}{\bar{R}_y^n (1 - \mu_r k_r)}; \quad (4.5)$$

где:

γ_m - коэффициент надежности по материалу;

$\bar{\sigma}^p$ - среднеквадратическое отклонение напряжений, возникающих в рассматриваемом элементе конструкции;

μ_σ, μ_r - математическое ожидание значений напряжений в рассматриваемом элементе конструкции и математическое ожидание случайной величины сопротивления материала конструкции (предел текучести), соответственно;

k_σ, k_r - коэффициенты вариации двух рассматриваемых случайных величин;

\bar{R}_y^n - нормативное значение расчетного сопротивления материала конструкции;

σ_0^p - расчетное значение напряжений в элементе, полученное обыкновенным детерминированным расчетом конструкции.

Коэффициент надежности по материалу γ_m учитывает неизбежный разброс свойств материала и возможные, в связи с этим, отклонения в сторону неблагоприятных значений. Некоторые авторы при помощи этого коэффициента учитывают и отклонения в нормативных размерах проката, что теоретически является неправильно. Подобные отклонения, в силу своей специфики, влияют на отклонения реальной расчетной схемы от идеализированной и логичнее учитывать их в коэффициенте условий работы γ_c .

Приведенная методика определения коэффициентов условий работы является наиболее приемлемой, с точки зрения реализации в созданном программном комплексе на языке программирования MATLAB, в рамках данной работы, так как для рассматриваемых геометрических форм конструкции имеются в наличии результаты расчетов с учетом таких случайных величин как начальные геометрические несовершенства металлопроката, геометрические несовершенства полученные конструкцией на монтаже, просадки основания, снеговая нагрузка, прочностные характеристики металлопроката.

Второй этап рассмотренной методики подбора поперечных сечений элементов конструкции и вычисления требуемого коэффициента условий работы, отображен на блок схеме (рис. 4.1).

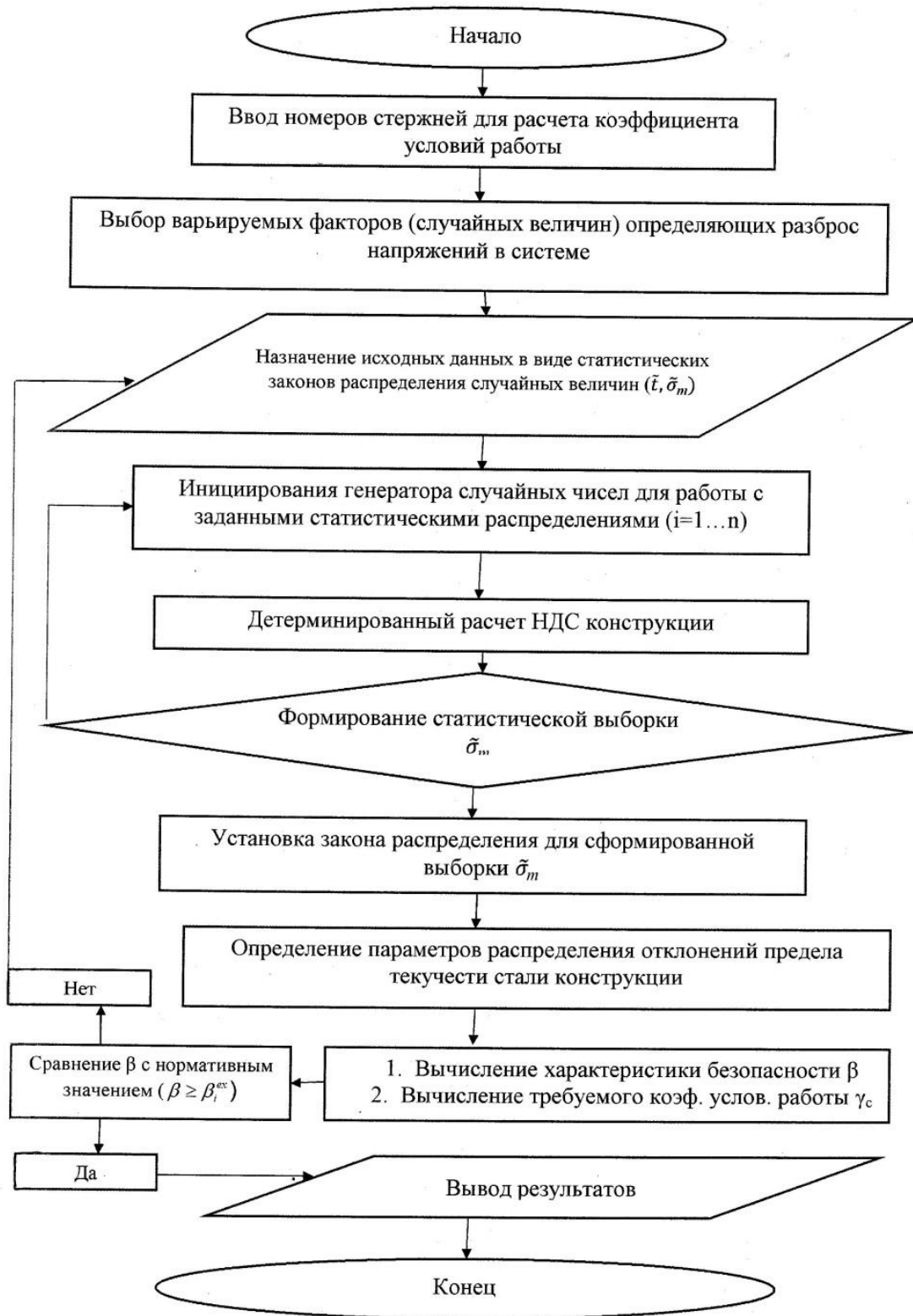


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритма вычисления требуемых коэффициентов условий работы и подбора сечений стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.

4.2 Нормирование коэффициента условий работы для рассматриваемого типа конструкции

В связи с установленной необходимостью корректировки значений коэффициента условий работы для рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов был проведен численный эксперимент. Целью эксперимента выступал поиск корректной математической модели связи коэффициента условий работы и таких исходных варьируемых параметров системы как: вылет конструкции консольной фермы (L), шаг несущих консольных рам (H), угол наклона верхнего пояса несущих ферм и процент недонапряжения сечения (обусловленный ступенчатой градацией сортамента металлопроката и конструктивными требованиями, выдвигаемыми к элементам конструкции).

Приведенные параметры рассматривались как двухуровневые факторы многофакторного анализа. Тогда уровни факторов являются максимальными и минимальными значениями рассматриваемых факторов (табл. 4.1)

Таблица 4.1

Уровни рассматриваемых факторов численного эксперимента

№ фактора	1	2	3	4
Наименование фактора	Угол наклона α°	Шаг рам H (м)	Вылет фермы L (м)	Не до напряжение %
max	30	12	22	0
min	0	4	4	20

Угол наклона рассматривается в интервале от 0 до 30°, так как при больших углах возникает большая парусность конструкции покрытия и существенную роль начинает играть ветровая нагрузка. При небольших уклонах кровли ветровая нагрузка с наветренной стороны имеет разгружающий эффект и допустимо не учитывать её в расчетах.

Вылет фермы в интервале 4-22 метра так же объясняется требованиями целесообразности применения данной конструктивной формы. На стадионах средней вместительности, как правило, трибуны шириной не менее 4 метров. Граница 22 м соответствует вместимости стадиона 18...20 тыс. зрителей при стандартных размерах футбольного поля и оснащении трибун индивидуальными сиденьями, а превышение отметки 22-х метров по длине приводит к нерациональному распределению материала конструкции, что приводит к увеличению металлоемкости системы. В случае потребности перекрытия большего вылета, целесообразно применить другую конструктивную схему.

Шаг рам менее 4 метров ведет к увеличению трудоемкости монтажа и нерационален. Для данной конструктивной формы покрытия, превышение шага рам более 12 метров ведет, также, приведет к усложнению конструктивной схемы и нерациональной работе материала конструкции, что делает систему неэкономичной.

Уровень недонапряжения возникает вследствие ступенчатой градации сортамента металлопроката, а также, обеспечения требований второго предельного состояния. Как показывают предварительные расчеты, величина недонапряжения не превышает 20%. В случае превышения этого значения материал конструкции значительно недонапряжён, и возникает вопрос о целесообразности применения выбранных сечений и геометрии конструкции.

Численный эксперимент проводился в два этапа.

1. На первом этапе варьируемыми факторами рассматривались 1, 2 и 3. Проводился многофакторный дисперсионный анализ с построением линейной регрессионной модели. В ходе обработки данных численного эксперимента, с помощью использования критерия Стьюдента, было установлено, что угол наклона, как рассматриваемый фактор, не имеет существенной значимости для регрессионной модели.

2. На втором этапе численного эксперимента угол наклона был заменен на процент недонапряжения материала конструкции. В качестве исходных уже рассматривались факторы 2,3,4. Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 4.2.

Матрица проведения полнофакторного дисперсионного анализа

№ испытания	Варьируемые факторы		
	Недонапряжение %	Шаг рам (м)	Вылет консоли (м)
1.	0	4	4
2.	20	4	4
3.	0	12	4
4.	20	12	4
5.	0	4	22
6.	20	4	22
7.	0	12	22
8.	20	12	22

Эксперимент осуществлялся по формуле:

$$N = n^k; \quad (4.6)$$

где: N- число требуемых экспериментов (комбинаций факторов);

n – число уровней факторов (в нашем случае два);

k – количество варьируемых факторов (в нашем случае три).

Геометрическая схема рассматриваемых конструкций приведена в таблице 3.2.

Сечения конструкций приведены в таблице 4.3.

На втором этапе реализации численного эксперимента выявлено, что недонапряжение сечения наиболее ответственного элемента, в пределах 20%, не имеет существенной значимости в формируемой регрессионной модели.

Сечения рассматриваемых вариантов конструктивных форм

№ варианта	Наименование элемента	Прокатный профиль
1,3	Решётка фермы	□ 60x2,5
	Верхний пояс	□ 100x60x3
	Нижний пояс	□ 100x60x3
	Консольный прогон	□ 200x60x4,5
2,4	Решётка фермы	□ 60x2,5
	Верхний пояс	□ 100x60x3
	Нижний пояс	□ 120x60x3
	Консольный прогон	□ 200x60x4,5
5	Решётка фермы	□ 100x6
	Верхний пояс	□ 100x60x6
	Нижний пояс	□ 140x100x3
6	Решётка фермы	□ 100x6
	Верхний пояс	□ 100x60x6
	Нижний пояс	□ 140x100x5
7	Решётка фермы	□ 120x4
	Верхний пояс	□ 160x120x4
	Нижний пояс	□ 200x120x4
8	Решётка фермы	□ 120x4
	Верхний пояс	□ 160x120x4
	Нижний пояс	□ 200x120x5

Уравнение зависимости коэффициента условий работы от длины вылета консоли и шага несущих ферм имеет вид:

$$\gamma_c = 0.9969 + 0,00191 * H + 0.00295 * L - 0,001025 * H * L; \quad (4.7)$$

где: H – шаг несущих рам (м); L – вылет несущей фермы (м).

Следует отметить, что математическая модель прошла проверку адекватности по критерию Фишера.

Так как большинство уникальных рамно-консольных стационарных стальных конструкций над трибунами эксплуатируемых стадионов не отвечают требованиям надежности (при этом полностью удовлетворяя условиям прочности и жесткости), полученное выражение (4.7) позволяет скорректировать значение коэффициента условий работы таким образом, чтобы обеспечить требуемый уровень надежности для конструкций стационарных покрытий над трибунами стадионов в случае их реконструкции.

4.3 Обобщенная оценка надежности и живучести конструкции в целом на основании разброса значений характеристики безопасности β

Надежность много раз статически неопределимых систем, в которых сложно выделить один наиболее ответственный элемент конструкции в силу параллельного включения в работу целого ряда элементов, тесно связана с понятием живучести, особенно если речь идет о надежности конструкции в период экстремальной ситуации.

При создании новых систем, для которых сведения о надежности аналогов отсутствуют, а также для систем, функционирование которых может быть связано с реализацией весьма интенсивных редких воздействий аварийного характера, перед инженером-проектировщиком стоит задача, в общем-то, не имеющая вероятностного описания - как создать систему, которая могла бы функционировать (возможно с резко ухудшившимся качеством) в условиях возможного отказа какой-то ее части [64]. Эта задача может быть решена с помощью увеличения надежности наиболее ответственных несущих конструкций, безотказность которых обеспечивает здание или сооружение от полного разрушения при аварийных воздействиях, даже если его дальнейшее использование по назначению окажется при этом невозможным без капитального ремонта. Эти конструкции предлагается проектировать таким образом,

чтобы в аварийной ситуации вероятность возникновения разрушений была очень малой. Такое может быть достигнуто двумя способами:

- исключения (при проектировании или путем использования специальных мер защиты) возможности разрушения любого из ответственных элементов объекта;
- проектирования объекта таким образом, чтобы в случае разрушения любого отдельного элемента весь объект или его наиболее ответственная часть сохраняла работоспособность в течение периода времени достаточного для принятия срочных мер (например: эвакуации людей при пожаре, в случае лавинообразного разрушения конструкции и т.д.).

В работе [94], живучесть рассматривается, как свойство системы сохранять при катастрофических возмущениях способность к выполнению основных функций, не допуская каскадного развития возмущений и отказов. Под понятием «возмущений» автор понимает полный выход элементов системы вследствие аварийных воздействий или грубых ошибок персонала. Автор предлагает рассматривать функцию возмущений как экспоненциальную. А свойство неизменяемости системы как логическую функцию многих переменных (по числу элементов в системе). В качестве меры живучести предлагается рассматривать сложную функцию отклика, зависящую от всех переменных системы.

В работе [65] был предложен формальный аппарат для оценки живучести системы, основанный на конечно-элементном анализе конструкции и преобразованиях структурной матрицы с помощью жордановых исключений. Процесс исключений продолжается вплоть до получения полностью нулевой матрицы (система становится статически определимой) и позволяет установить цепочку преобразований, приводящих к возможности потери геометрической изменяемости.

При использовании выше рассмотренных оценок возникает ряд трудностей вызванных сложностью используемого математического аппарата. Поэтому, в реальной практике проектирования данные методики вряд ли реализуемы. В связи с этими трудностями предлагается проводить комплексную оценку надежности и живучести посредством оценки разброса величины характеристики безопасности (даль-

ности отказа) β верхней и нижней границ надежности системы. Алгоритм определения нижней границы надежности приведен в разделе (2.1.3). Рассмотрим алгоритм вычисления верхней границы надежности.

Так как покрытие представляет много раз статически неопределимую стержневую конструкцию, то работу группы наиболее ответственных элементов (п.2.1.1) можно рассматривать как параллельную. Тогда алгоритм вычислений может быть следующим:

1. Параметры распределения случайной величины продольного усилия \tilde{N} , а также плотность распределения случайной величины принимаются в соответствии с двойным экспоненциальным законом [40], поскольку все элементы покрытия в качестве превалирующего усилия испытывают продольное растяжение или сжатие, то значения усилий в них прямо пропорциональны значению снеговой нагрузки.

$$f(S_m) = \frac{1}{\beta} \exp \left[\frac{\alpha - S_m}{\beta} - \exp \left(\frac{\alpha - S_m}{\beta} \right) \right]$$

2. Параметры распределения случайной величины площади сечения \tilde{F} , которые описываются нормальным законом.

3. Вводится корреляционный коэффициент зависимости $\rho_{i,j} = e^{-x}$ между напряжениями в рассматриваемых элементах i, j , где $i \neq j$, $x = |i - j|$ [70].

4. Определив параметры \tilde{N} , вычисляется $\sigma(\tilde{N}, \tilde{A})$.

5. Вычисляются показатели надежности $\gamma_i, P_i, P_j, P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i \cdot P_j \cdot \rho_{ij}$.

Основываясь на приведенном алгоритме можно произвести расчет характеристики безопасности для группы элементов β_{\max} . Порядок действий остается таким же, но вместо вероятностей отказа каждого отдельного элемента вычисляется характеристика безопасности и с помощью корреляционных коэффициентов рассчитывается верхнее значение характеристики безопасности группы элементов, выход из строя которых предшествует началу лавинообразного разрушения системы.

Далее, обозначим характеристику безопасности нижней границы надежности через β_{\min} , а верхней надежности через β_{\max} , тогда обобщенная характеристика резерва живучести и несущей способности определяется по формуле (4.8).

$$\Delta = \beta_{\max} - \beta_{\min}; \quad (4.8)$$

Таблица 4.3

Вычисление обобщенной характеристики резерва живучести и несущей способности

№ схемы	Характеристики безопасности		Вероятность отказа		Резерв ($\beta_{\max} - \beta_{\min}$)
	β_{\min}	β_{\max}	$P_{f \min}$	$P_{f \max}$	Δ
1	4,47	7.01	$0,824 \cdot 10^{-4}$	$0,773 \cdot 10^{-8}$	2.54
2	4,49	6.98	$0,772 \cdot 10^{-4}$	$0,259 \cdot 10^{-7}$	2.49
3	4,52	7.12	$0,835 \cdot 10^{-4}$	$0,528 \cdot 10^{-8}$	2.6
4	4,89	7.48	$0,568 \cdot 10^{-6}$	$0,156 \cdot 10^{-8}$	2.59
5	5,01	7.81	$0,986 \cdot 10^{-6}$	$0,257 \cdot 10^{-9}$	2.8
6	3,57	5.72	$0,378 \cdot 10^{-4}$	$0,956 \cdot 10^{-8}$	2.15
7	3,22	5.03	$0,267 \cdot 10^{-4}$	$0,887 \cdot 10^{-6}$	1.81
8	3,08	5.01	$0,399 \cdot 10^{-4}$	$0,892 \cdot 10^{-6}$	1.93

Описанный алгоритм приведен на блок схеме (рис. 4.2)

Используя приведенный алгоритм, проведем анализ данной характеристики на примере конструкций, рассмотренных в предыдущей главе (гл. 2) (табл. 4.4).

Анализируя значения, полученные по результатам расчета, можно отметить применимость данной методики к оценке резерва живучести и несущей способности стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.

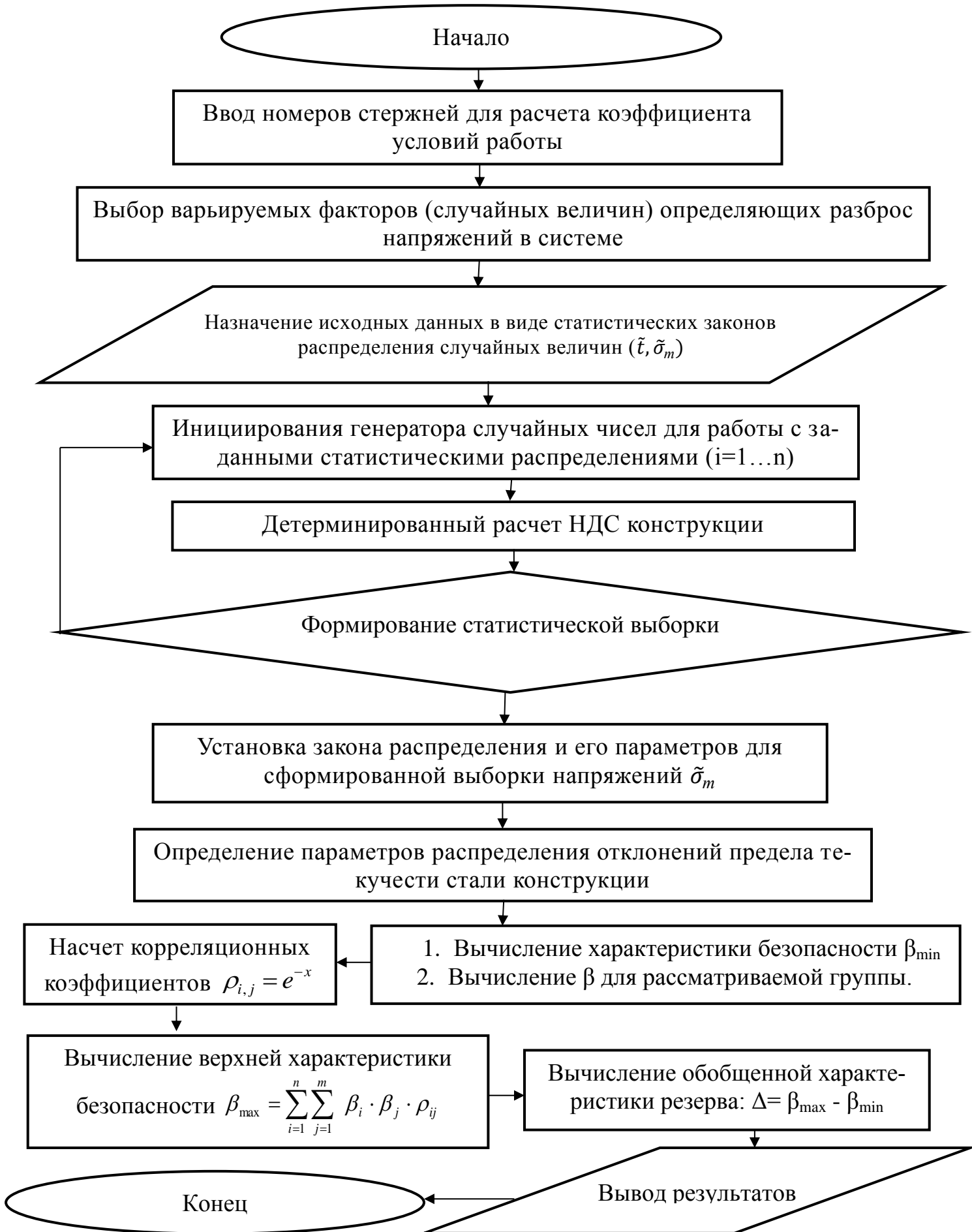


Рис. 4.2. Блок схема определения обобщенной характеристики резерва живучести и несущей способности.

4.4 Экономические характеристики конструкции при обеспечении требуемого уровня надежности конструкции

Экономические показатели играют немаловажную роль при принятии решения о возведении какого-либо сооружения, а также, в дальнейшем процессе строительства и эксплуатации. Руководствуясь данным фактом, проведен анализ изменения технико-экономических показателей конструкции при обеспечении требуемого уровня надежности путем ввода в расчет исправленных коэффициентов условий работы γ_c . В качестве рассматриваемого показателя наиболее целесообразно принять массу материала несущих конструкций покрытия, приходящуюся на 1 квадратный метр перекрываемой площади ($\text{кг}/\text{м}^2$).

Таблица 4.4

Изменение удельной металлоемкости конструкций рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов

№ схемы	H (м)	L (м)	Исправленное значение γ_c	Удельная металлоемкость		Разница в металлоемкости %
				Метод предельных состояний ($\gamma_c=0,9$), II метод ($\text{кг}/\text{м}^2$)	I метод ($\text{кг}/\text{м}^2$)	
1	4	4	1	39.04	34.67	-11.2
2	4	4	1	39.98	35.02	-12.4
3	12	4	0.9753	26.02	23.91	-8.1
4	12	4	0.9897	26.3	23.75	-9.7
5	4	22	1	83.33	73.16	-12.2
6	4	22	0.9989	90.2	79.92	-11.4
7	12	22	0.7921	44.64	50.04	12.1
8	12	22	0.8365	45.56	52.53	15.3

Существует два подхода к использованию исправленного коэффициента условий работы. Первый метод заключается в назначении исправленного коэффициента для всех элементов покрытия. График изменения металлоемкости рассматриваемых восьми вариантов конструкций (табл. 3.2), для этого случая, изображен на рис. 4.3.

Анализируя график видно, что данный метод дает экономию материала для большинства рассматриваемых вариантов конструкций, кроме 7 и 8, где присутствуют максимальные значения пролетов и шага несущих рам. Для этих вариантов более целесообразным является второй способ применения γ_c .

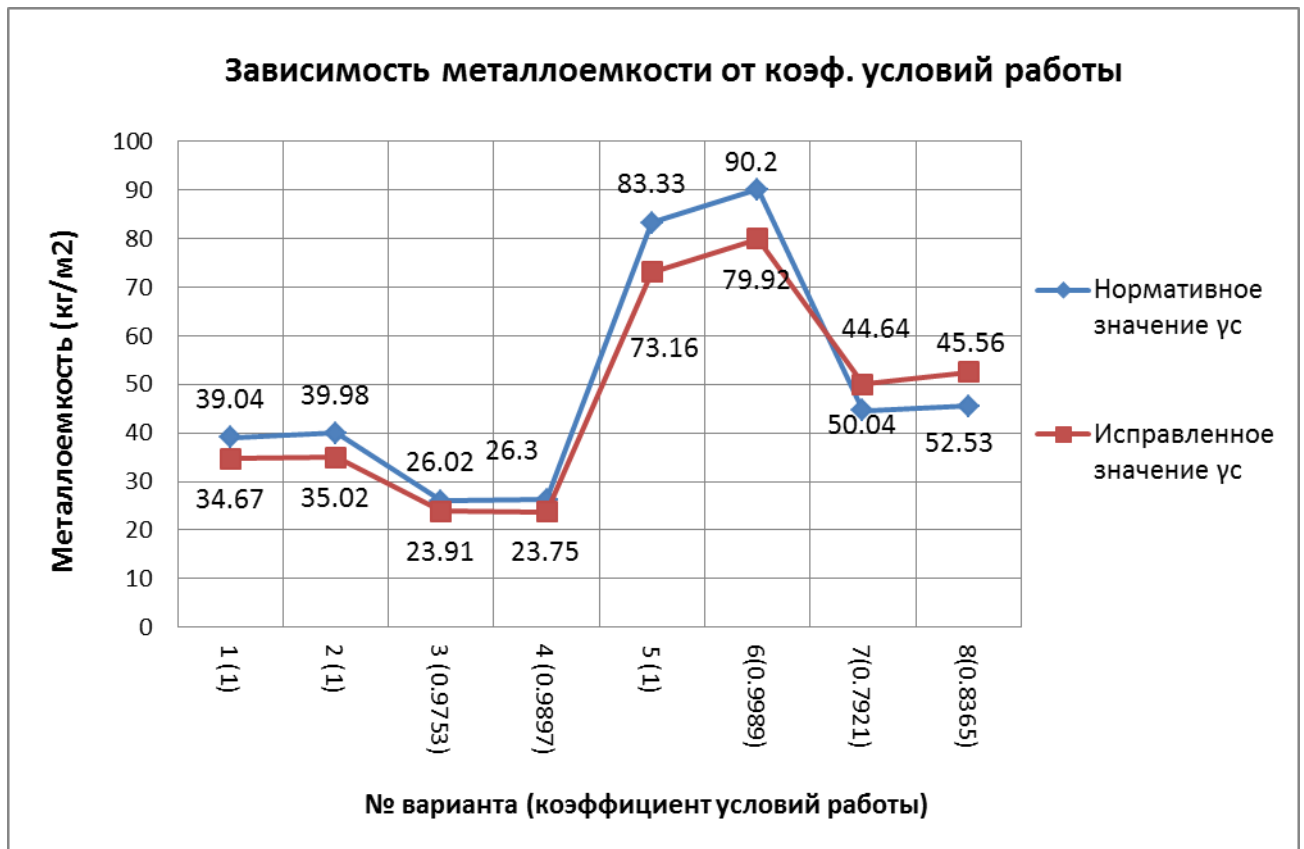


Рис.4.3. Зависимость металлоемкости от коэффициента условий работы.

Второй способ заключается в применении исправленных значений γ_c , только для группы наиболее ответственных элементов. То есть, с использованием методик приведенных в разделах 3.1 и 4.1 (рис. 3.1 и рис 4.1), вычисляется исправленное значения коэффициента условий работы и применяется только для рассматриваемой группы элементов, характеризующих надежность системы в целом. Этот способ более предпочтителен для покрытий стадионов большой вместительности, где присутствуют значительные пролеты и вылеты конструкции. Использование данного метода сопряжено с рядом затруднений. Фактически, производится численное определение характеристик надежности системы с использованием вероятностных методов

расчета, что значительно сложнее в реализации, в отличие от обычных детерминированных расчетов, предусмотренных нормативной проектной литературой. Теоретически использование этого метода полностью обоснованно. Так как не все элементы конструкции в равной степени несут ответственность за надежность сооружения, то применение различных значений коэффициента условий работы для различных элементов или групп элементов вполне допустимо.

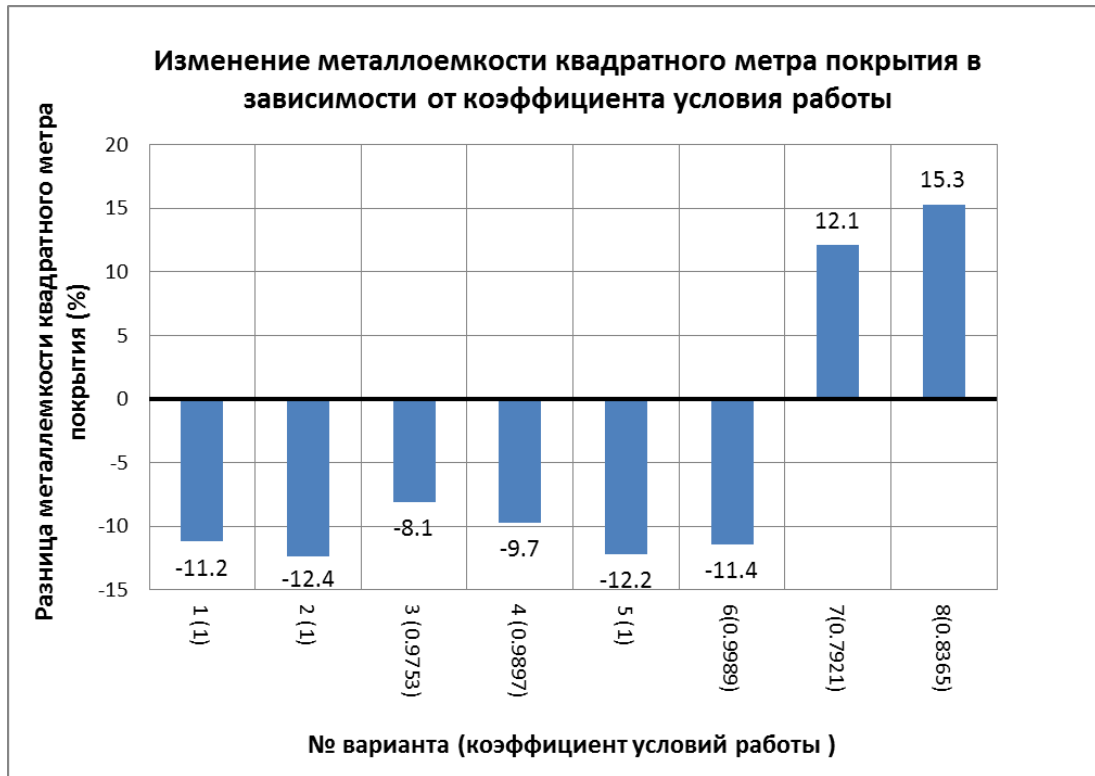


Рис. 4.4. Изменение металлоемкости квадратного метра покрытия в зависимости от коэффициента условия работы.

Таким образом, первый метод дает экономию металлоемкости конструкции, если шаг и вылет конструкции покрытия не приближаются к экстремальным значениям (рис. 4.4). В случае значительных величин этих характеристик первый метод приводит к завышению удельной металлоемкости покрытия и целесообразно использовать второй. Использование второго метода не ведет к сколько-нибудь значительному завышению металлоемкости, так как практически все стержни конструкции не претерпевают изменений (первоначально сечения подобраны исходя из требований предельных состояний), а сечение увеличивается только у наиболее ответственных элементов. Это изменение слабо влияет на общую удельную металлоем-

кость покрытия. Результаты, полученные вторым способом учета исправленного коэффициента условий работы, не отображены на графиках (рис. 4.3, 4.4), так как процент увеличения металлоемкости не превысит 0.2%

4.5. Выводы по разделу

1. При оценке резерва надежности явно прослеживается связь между численным значением характеристики Δ (табл.4.3) и количеством шагов дополнительного нагружения конструкции до момента начала разрушения (рис. 3.2-3.9). Чем больше значение характеристики, тем больше требуется этапов дополнительного нагружения. Это свидетельствует о корректности предложенной оценки и возможности ее применения при оценке и мониторинге уровня надежности реальных строительных конструкций.

2. Присутствует определенная связь между живучестью и рассматриваемой характеристикой. Среди рассмотренных вариантов наибольшее значение характеристики $\Delta\beta$ соответствовала случаям с дополнительными этапами стабилизации системы при анализе живучести конструктивных схем (рис. 3.5, 3.6). Если анализируются характеристики живучести и надежности для совокупности элементов, входящих в наиболее ответственные части конструкции, то характеристика $\Delta\beta$ позволяет численно оценить запас надежности в виде разницы между верхней и нижней границами надежности, что и является оценкой живучести конструкции.

3. Нормативные документы в области строительства [32, 70, 78, 105] требуют обязательно выполнять расчет ответственных сооружений на лавинообразное разрушение, но каких-либо четких методик нет ни в одном из приведённых источников, за исключением [32] (но и в нем представлен лишь ряд рекомендаций, четкой методики нет). Методика комплексной оценки живучести и надежности конструкции еще требует уточнений и незначительной доработки, но с её помощью уже сейчас возможно производить анализ живучести конструкции и оценку возможности лавинообразного разрушения.

4. Корректность предложенного подхода, также, подтверждается анализом данных таблицы 4.3:

- при достаточном запасе несущей способности проектируемой конструкции $\beta > 4.76$ (схемы 1...5) требуется значительное увеличение временной нагрузки, инициирующий лавинообразное разрушение конструкции, сопровождаемый увеличением $\Delta\beta = 2.5 \dots 2.8$;
- в случае недостаточного уровня надежности проектируемой конструкции $\beta < 4.76$ (схемы 6...8) требуется значительно меньшее значение временной нагрузки до момента начала развития лавинообразного разрушения $\Delta\beta = 1.8 \dots 2$;
- таким образом, изменение $\Delta\beta < 2$ при сравнении уровней надежности 1-го (наиболее напряженного) элемента и группы 8...10 (наиболее напряженных) элементов свидетельствует о наступлении в исследуемых рамно-консольных конструкциях состояния, предшествующего лавинообразному разрушению.

5. Использование скорректированного коэффициента условий работы для стационарных рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов, как правило, не приводит к значительному увеличению удельной металлоемкости сооружения. В случаях достаточной удаленности значений вылета и шага конструкции от критических значений ($L=22$ м, $B=12$ м) возможно даже уменьшение металлоемкости.

ВЫВОДЫ

1. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований достигнута основная цель работы, заключающаяся в создании методики расчета и проектирования стационарных рамно-консольных стальных шарнирно-стержневых конструкций покрытий над трибунами стадионов, базирующейся на определении численных показателей надежности проектируемой конструкции.

2. На основе метода конечных элементов в геометрически и конструктивно нелинейной постановке разработана методика определения последовательности разрушения конструкции (выхода из строя ее основных конструктивных элементов), на основании которой определяется группа наиболее ответственных элементов, надежность которых и определяет надежность системы в целом.

3. На основе метода конечных элементов в вероятностной постановке разработана методика вычисления верхней и нижней границы надежности конструкции, а так же максимального и минимального значения характеристики безопасности β (дальности отказа) наиболее ответственной группы элементов конструкции, которые и характеризует надежность системы в целом:

- из рассмотренных действующих на систему варьируемых случайных величин наибольшее одиночное влияние на систему оказали геометрические несовершенства конструкции полученные на монтаже и просадки основания, характеристики безопасности для наиболее опасного из рассмотренных вариантов (8) составили:

$\beta=4.79$, $P_f=0,321*10^{-5}$; второе влияние по степени значимости оказала снеговая нагрузка: $\beta=4.81$, $P_f=0,443*10^{-5}$; и наименьшее влияние на надежность системы оказывает дефекты геометрии сечений фасонного металлопроката: $\beta=5.99$, $P_f=0,419*10^{-7}$.

- при совместном учете воздействия выше перечисленных случайных величин вероятность отказа стала значительно больше, чем при отдельном учете. Для большинства рассмотренных схем характеристики безопасности не отвечали минимально допустимым значениям (при полном обеспечении требований 1-го и 2-го предельных состояний), что приводит к выводу о необходимости корректировки мето-

дики проектирования исследуемых систем. Пределы колебания характеристик надежности, при учете всех рассматриваемых факторов, для рассматриваемых схем составили: $\beta=3,08\div 5,01$; $P_f=0,399*10^{-4}\div 0,986*10^{-6}$.

4. На основе метода конечных элементов в вероятностной постановке разработана методика подбора поперечного сечения элементов шарнирно стержневых систем с учетом требований надежности, которые обеспечиваются корректным назначением коэффициента условий работы γ_c , изменяющегося в пределах $0.7921\dots 1$. При этом, большие значения коэффициента соответствуют системам с минимальными значениями шага и вылета основных несущих конструкций ($B=4$ м, $L=4$ м), меньшие – максимальным значениям ($B=12$ м, $L=22$ м), что обеспечивает требуемый уровень надежности системы при выполнении расчетов в детерминированной постановке в рамках метода предельных состояний.

5. Разработана методика оценки запаса живучести рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов, позволяющая оценивать возможность развития лавинообразного разрушения системы, базирующейся на изменении индекса дальности отказа $\Delta\beta$. При этом, изменение $\Delta\beta < 2$ при сравнении уровней надежности 1-го (наиболее напряженного) элемента и группы 8...10 (наиболее напряженных) элементов свидетельствует о наступлении в исследуемых рамно-консольных конструкциях состояния, предшествующего лавинообразному разрушению.

Литература

1. Авакян В.В. Прикладная геодезия: технология инженерно-геодезических работ. – 2-е изд. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 588с.
2. Айзен, А.М. К вероятностной оценке снеговой нагрузки Текст. / А.М. Айзен, Д.М.Ротштейн // Строительная механика и расчет сооружений. -М., 1981.- №5.-С.7-9.
3. Ананьин А.И., Аверин А.Н. К расчету гибких и жестких нитей // Исследование висячих комбинированных конструкций. - Изд. ВГУ, 1980. -С.7-12.
4. Андреева И.И., Москалев Н.С. Авария висячего покрытия велотрека в Милане // Пространственные конструкции в новом строительстве и при реконструкции зданий и сооружений. Тез. докл. междуна. конгресса МКПК-98. М., 1998.Т.2.-С. 81-85.
5. Аугусти Г., Баратта А., Кашиатти Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. - М.: Стройиздат, 1988. - 584 с.
6. Балдин В.А., Гольденблат И.И., Коченов В.И., Пильдиш М.Я., Таль К.Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям. М.: Стройиздат, 1951, 272 с.
7. Беленя Е.И, Стрелецкий Н.Н., Ведеников Г.С., Клепиков Л.В., Морачевский Т.Н. Металлические конструкции / Спец. Курс: Учебное пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1991г. – 687с.
8. Беляев Б.И., Корниенко В.С. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения. – М.: Смройиздат, 1968. – 206 с.
9. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теорий надежности в расчетах сооружений . –М.:Стройиздат, 1982; 351с.
10. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971. – 256 с.

11. Ведеников Г.С., Телоян А.Л. Нелинейный метод расчета изгибно-жестких вант / Строительная механика и расчет сооружений. – 1997. - №6 – с.47-50.
12. Гаранжа И. М. Экспериментальные исследования многогранных композитных конструкций на основе самоуплотняющегося бетона при осевом сжатии [Текст] / И. М. Гаранжа, А. В. Танасогло, А. А. Ягмур, С. А. Фоменко, А. Н. Оржеховский // Современное промышленное и гражданское строительство/ 2015, Том 11, Номер 2, 45–55с.
13. Гвоздев А.А. Новое проектирование бетонных и железобетонных конструкций / Москва / Строиздат – 1978г. 204с.
14. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / Государственное издание строительной литературы. / Москва. – 1949г. 280с.
15. Гвоздев А.А., Краковский М.Б., Бруссер М.И., и др. Связь статистического контроля прочности бетона с надежностью железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. -1985.- №3. - с. 37-39.
16. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. Изд. 7-е, стереотипное. - М.: Высшая школа, 2000. - 479с.
17. Гольдинблат И. И. Проектирование сейсмостойких гидротехнических транспортных и специальных сооружений / Москва / Строиздат – 1971г. 230 с.
18. Горохов Е. В., Мущанов В. Ф., Кинаш Р. И., Шимановский А. В., Лебедич И. Н. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов (2-е издание, исправленное и дополненное) / Под общей редакцией Е. В. Горохова и А. В. Шимановского. – Макеевка, РИО ДонНАСА, 2008. - 404 с.
19. Горохов Е.В., Мущанов В.Ф., Касимов В.Р. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов. Макеевка, «НордКомпьютер», 2002г

20. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Королев В.П. Обеспечение надежности большепролетных покрытий мембранного типа / Изв. вузов. Строительство - №8, 1996. - С. 31 - 35.
21. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Левин В.М., Мнацаканян К.Б., Касимов В.Р. Основные принципы формирования системы мониторинга технического состояния покрытия над трибунами стадионов./ Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – Випуск 5, 2010 р.- С. 5-14.
22. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытания на растяжения; ИПК издательство стандартов; Москва 1986; 40 с.
23. ГОСТ 21014-88 Термины и определение дефектов поверхности // Государственный комитет СССР по стандартам. Издательство стандартов. Москва 1989. С. 61.
24. ГОСТ 21780-2006. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности. – М.: МГС. – 13 с.
25. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. / Надежность в технике: Сб. ГОСТов. -М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
26. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения // М.: Стандартинформ, 2015. – 50с.
27. ГОСТ 27772-2015 Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия // Межгосударственный стандарт / Стандартинформ. Москва 2016. С. 19.
28. ГОСТ 30245-2003 Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия // Межгосударственный стандарт/ Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве. Москва 2003. С. 30.

29. ГОСТ 8645-68 Трубы стальные прямоугольные. Сортамент.; Межгосударственный стандарт; ИПК издательство стандартов; Москва 1991; 10 ст.
30. Грудев И. Д., Филиппов В. В., Корнилов Т. А., Рыков А. В. Определение нормативных и расчетных значений снеговых нагрузок // Пром. и гражд. стр-во. 2007.-№4-С. 39
31. Гунст И.А. О перекрытии большой спортивной арены центрального стадиона в Лужниках / Пространственные конструкции зданий и сооружений покрытия результаты работы научно технической конференции – Москва-Белгород, 1998. - С. 193-202.
32. ДБН В 1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Уведено вперше (зі скасуванням в Україні ГОСТ 27751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4417-83, СТ СЭВ 4668-84) ; чинні з 2009-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 49 с.
33. ДБН В.1.2-2:2006 «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования»; Минстрой. Украины; Киев 2006; 80 ст.
34. ДБН В.2.6-163:2010 «Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу»; Мінрегіонбуд України; Київ 2011; 202 ст.
35. Добромыслов А.Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений. ; Промышленное строительство, 1990, №9, с.9-10.
36. Добромыслов А.Н. Ошибки проектирования строительных конструкций: Научное издание. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 184 с.
37. Еремеев П.Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений. / Москва, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2006.
38. Золина Т.В., Садчиков П.Н. Моделирование снеговой нагрузки на покрытие промышленного здания [Текст] / Т.В. Золина, П.Н. Садчиков // Проектирование и конструирование строительных систем. Проблемы механики в строитель-

стве. Вестник Московского государственного строительного университета: сб. научных работ. / МГСУ. – Москва, 2016 – Вып. 8/2016, Том 1. – С. 25-33.

39. Зусман Л.Л. Об оценке качества металлопроката // Сталь. 1976. №6. С. 549-552.
40. Кінаш Р.І., Бурнаев О.М. Снігове навантаження в Україні. Монографія. – Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 1997. – 848 с.
41. Клепиков С.Н., А.С. Трегуб, И.В. Матвеев. Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах. – К.:Будівельник, 1987. – 200 с.
42. Колесников, Г. Н. Об учете случайных отклонений длин стержней от проектных размеров при расчете ферм [Текст] / Г. Н. Колесников ; Петро заводский государственный университет. – Петрозаводск, 1985. – 15 с. – Деп. в ВИНТИ 07.06.85, № 397885. 7.
43. Корнилов, Т.А. О введении территориальных строительных норм по снеговым нагрузкам Текст. / Т.А.Корнилов, А.Т.Копылов, А.В.Рыков // Проблемы градосферы и риск стихийных катастроф.- Якутск, 1997.- С.62-64.
44. Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю. Вероятностное проектирование конструкций по заданному уровню надежности / Ю. В. Краснощеков, М. Ю. Заполева / Вестник СибАДИ, выпуск 1 (41), 2015.- С. 68-73.
45. Крылов И.И., Шевцов Ю.П. Классификация причин отказов стальных конструкций производственных зданий и сооружений.; Известия ВУЗ. Строительство и архитектура, 1983, №11, с. 16-19.
46. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций. Вильнюс, Москва, 1985.-156 с.
47. Маневич В.А., Глущенко В.Г., Галаев И.П. Об оценке качества металлопроката // Сталь. 1977. №6. С. 556-559.
48. Мельчаков А.П., Чебоксаров Д.В. Прогноз, оценка и регулирование риска аварии зданий и сооружений : теория, методология и инженерные приложения. Челябинск : Изд. ЮУрГУ , 2009. 111 с.

49. Металлические конструкции. Общий курс [Текст] : Учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Веденников и др.; Под общ. ред. Е. И. Беленя. — М. : Стройиздат, 1986. — 560 с.
50. Мущанов В.Ф. Действительная работа и надежность мембранных конструкций: Дисс...д-ра техн. наук: 05.23.01. — Одесса, 1997. — 390 с.
51. Мущанов В.Ф. Методы учета действительной работы и определение системы частных коэффициентов надежности для большепролетных покрытий мембранного типа // Пространственные конструкции зданий и сооружений: (исследование, расчет, проектирование и применение): Сб. статей. Вып.8 / Ассоциация «Пространственные конструкции»; БелГТАСМ; гл.редактор Г.К. Хайдуков. — М.-Белгород: Изд. БелГТАСМ, 1996. — С.136-141.
52. Мущанов, В.Ф. Определение траектории разрушения конструкций над трибунами стадионов на примере стадиона «Металлург» в городе Донецк [Текст] / В.Ф. Мущанов, А.Н. Оржеховский // Вісник ДонНАБА. — Макіївка: ДонНАБА, 2012. — Вип. 2012-3(95). — С. 40-43.
53. Мущанов, В.Ф. Экспериментальное исследование прочностных и геометрических характеристик гнuto-сварных труб прямоугольного сечения украинских производителей [Текст] / В.Ф. Мущанов, А.Н. Оржеховский // Вісник ДонНАБА. — Макіївка: ДонНАБА, 2013. — Вип. 2013-3(101). — С. 9-12.
54. Мущанов, В.Ф. Численное определение вероятности отказа изгибаемого стального стержня [Текст] / В.Ф. Мущанов, И.М. Гаранжа, А.Н. Оржеховский // Металлические конструкции. — 2017. — Том 23, № 1. — С. 15-23. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-1/02_mushchanov_garanzha_orzhekovskiy.pdf
55. Мущанов В.Ф., Прядко Ю.Н. Общий алгоритм определения показателей надежности висячего покрытия, образованного жесткими нитями сквозного сечения / В.Ф. Мущанов // Металеві конструкції. — Т. 18, №3. — 2012. — С. 159-169

56. Мущанов В.Ф., Прядко Ю.Н. Определение численных показателей надежности элементов жесткой нити сквозного сечения методом Монте-Карло / В.Ф. Мущанов // Вісник ДонНАБА – Вип. 2010-4(84). Макіївка. – 2010. – С. 11-14
57. Надежность строительных конструкций в свете требований европейских и российских нормативных документов по проектированию / В. В. Надольский, В. В. Тур, М. Голицки, М. Сыкора // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. - 2013. - №1. - С. 164-168.
58. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. Современные проблемы механики [Текст] / В.В. Новожилов; под общ. ред. А.И. Лурье и Л.Г. Лойцянского. – Ленинград Москва: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1948г. – 214 с.
59. Определение коэффициента перегрузки вертикальной крановой нагрузки на основании статистического изучения работы кранов в действующих цехах : автореферат диссертации кандидата технических наук / Б. Н. Кошутин. — Москва, 1961.
60. Отставнов В.А., Смирнов А.Ф., Райзер В.Д., Сухов Ю.Д. Учет ответственности здания и сооружений в нормах проектирования строительных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 1981. № 1. С. 11–14.
61. Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования / В.В. Надольский, Ю.С. Мартынов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Прикладные науки. Строительство : научно-теоретический журнал / гл. ред. Лазовский Д.Н. – 2014. – № 8. – С.27-34.
62. Пашинский В.А., Фенко А.Г. Вероятностное описание максимальных значений снеговой нагрузки на строительные конструкции // Пути повышения эффективности строительства: Тематический сборник научных трудов. – К.: 1993. – с. 65-72.
63. Пащенко А.Н. Вероятностный расчет сжатых элементов строительных конструкций [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. технич. Наук

(05.23.01) / Пащенко Андрей Николаевич; Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка. – Полтава, 2004. -22с.

64. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А.В. Перельмутер.- Москва, изд. АСВ, 2007. - 254 с.

65. Перельмутер А.В. Об оценке живучести несущих конструкций // Металлические конструкции. Работы школы профессора Н. С. Стрелецкого. – М: МГСУ 1995. – С. 62-68.

66. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: Монография. – Полтава: Издательство «АСМІ», 2009. – 452 с.

67. Плотникова О.С. Определение надежности металлических конструкций в составе зданий и сооружений при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах. / [Текст]: текст дис. на соиск. учен. степ. канд. технич. Наук (05.23.01) / Плотникова Ольга Серафимовна; Вологодский государственный технический университет. – Вологда, 2008.- 241 с

68. Повышение долговечности конструкций промышленных зданий / А. И. Кикин, А. А. Васильев, Б. Н. Кошутин. — Москва, 1969. С. 99.

69. Процесс дальнейшего передела металла [Текст] Электронный ресурс / Все о металлургии: /<http://metal-archive.ru/metallurgiya/757-process-dalneyshego-peredela-metalla-trubnyy-peredel.html>

70. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании [Текст] / В.Д. Райзер- М.: изд-во АСД, 1998 – 304 стр.

71. Ржаницын А. Р., Сухов Ю. Д., Булычев А. П. Вероятностный метод расчета конструкций, воспринимающих снеговую нагрузку. //Строительная механика и расчет сооружений М.: - 1974. - №4. – 40-43 с.

72. Ржаницын, А. Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность / А. Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

73. Роменский, Д.И. Подбор сечения элементов стальных рамно-консольных по-крытий над трибунами стадионов с учетом требований надежности [Текст] / Д.И. Роменский, А.Н. Оржеховский // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова». – 2017. – №8. – С. 35-46.
74. Руднева И.Н. Методика расчета и проектирования большепролетной ви-сячей оболочки, учитывающая эксплуатационную надежность ограждающих кон-струкций, выполненных из углепластиков // Журнал «Металеві конструкції». – Том 9. - №1. Макеевка. – 2006. – С.5-17.
75. Сахновский М.М., Титов А.М. Уроки аварий стальных конструкций. – К.: Будивэльнык, 1969. – 200с.
76. Смирнов А. Ф., Александров А. В., Лащенко В. Я. Строительная меха-ника. Стержневые системы. – М.: Стройиздат. – 1981. – 512 с.
77. Сно В. Е. Влияние геометрических погрешностей сборных каркасов на работу конструкций многоэтажных зданий [Техт] : дис. ... кандидата технических наук / В. Е. Сно. – М. : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1981. – 164 с.
78. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменением N 1) / Москва 2011 г. 172с.
79. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редак-ция СНиП 2.01.07-85*; введен в действие с 20 мая 2011 г. М. : Минрегион России, 2010.
80. Стандартизация металлических материалов и изделий метал-лургического производства / Под ред. В.В.Бойцова.- М.: Изд-во стандартов, 1978.- 392 с.
81. Стеблов А.В. Комплексный показатель качества металлопроката и его применение // Литье и металлургия. 2017. №1 (86). С. 97-102.
82. Стрелецкий Н. С. Конструкции пролётных строений мостов / Металли-ческие конструкции. Специальный курс. — М.: Стройиздат, 1965. — 366 с.

83. Стрелецкий Н. С. Избранные труды. Под ред. Е.И. Беленя. М., Стройиздат, 1975. 422 с. Сост.: Е.И. Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Н.П. Мелюльников и др.
84. Таль К.Э. Вопросы надежности железобетонных конструкций за рубежом // Бетон и железобетон, 1973. – №11. – с. 42-43
85. Тамразян А.Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности // Вестник МГ СУ. 2012. № 10. С. 109–115.
86. Теличенко В.И. Технология возведения зданий и сооружений [Текст]: Учебник для ВУЗов/ В.И. Теличенко, О.М. Терентьева, А.А. Лапидус.- 2-е издание переработанное и дополненное.-Москва, Высш. шк., 2004 г.-446с.
87. Терещенко Ю.И. Особенности реконструкции областного спортивного комплекса «Металлист» в г. Харькове / Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – Випуск 5, 2010 р.-С. 15-24
88. Технология возведения полносборных зданий [Текст]: Учебник/ А.А. Афанасьев, С.Г. Арутюнов, И.А. Афонин, Ю.А. Вильман, Е.А. Король, Г.К. Соколов, А.М. Тауенис- Изд-во. АСВ, 2000 г.
89. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем / С. А. Тимашев. М.: Наука, 1982. - 184 с.
90. Учет вероятностного характера геометрических несовершенств формы пространственных покрытий над трибунами стадионов рамно-консольного типа. / В. Ф. Муцанов, А. Н. Анненков, А. Н. Оржеховский // Металлические конструкции. Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – 2014. - №3 том 20. – С. 169-178.
91. Фрейдензон М.Е., Соколкин Б.П., Винокуров И.Я. и др. К вопросу комплексной оценки качества металлопроката // Сталь. 1977. №1. С. 82-84.

92. Фролов Н.Н, Черных О.Н., Кубенов Р.Т., Будикова А.М. Нормативном уровне надежности гидротехнических сооружений [msuee.ru/science/ht/10/2004/04_2/2.11.doc].
93. Хог Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций// Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 428 с.: ил.
94. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. — М.: Знание. 198. — 116с.
95. Чирас А. А. Строительная механика. Анализ и оптимизация упругопластических стержневых систем : Конспект лекций / А. Чирас, Р. Каркаускас, А. Крутинис; Вильн. инж.-строит. ин-т. - Вильнюс : М-во высш. и сред. спец. образования ЛитССР, 1986. - 87, 310с.
96. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций [Текст] / Г. Шпете / Пер. с нем. О.О. Андреева-М.: Стройиздат, 1998 г.- 288 с.
97. Экспериментальное исследование прочностных и геометрических характеристик гнутосварных труб прямоугольного сечения украинских производителей. / В. Ф. Мущанов, А. Н. Оржеховский // Вестник донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2013. —выпуск 2013-3(101). — С. 9-12.
98. Югов А. М. Моделирование монтажа пространственных стержневых конструкций / А. М. Югов, А. Б. Бондарев // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - 2013. - Вип. 25. - С. 629-634. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2013_25_85.
99. Югов А. М. Методика определения сборочных усилий в большепролётной пространственной стержневой системе [Text] / А. М. Югов, А. Б. Бондарев // Металлические конструкции. — 2013. — Том 19, № 3. — С. 137–142.
100. Югов А. М. Численное статистическое исследование возможных погрешностей возведения однопоясной металлической оболочки покрытия цилиндрической формы [Text] / А. М. Югов, А. Б. Бондарев // Сборник докладов научно практической конференции, посвящённой 100летию со дня рождения профессора Е. И.

Белени «Расчёт и проектирование металлических конструкций». 25 марта 2013 года, г. Москва / под. ред. А. Р. Туснина. – Москва : МГСУ, 2013. – С. 247–251.

101. Ярыгина О.В. Методы расчета надежности железобетонных конструкций в составе зданий и сооружений при ограниченной статистической информации. / [Текст]: текст дис. на соиск. учен. степ. канд. технич. Наук (05.23.01) / Ярыгина Ольга Валентиновна; Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет.- Волгоград, 2013.- 157 с.

102. Бае, Н.; Grandhi, R.; Canfield, R. Sensitivity analysis of structural response uncertainty propagation using evidence theory. In: Proc.of 9. th AIAA, Atlanta, Georgia, USA, September 2002.- P. 1. - 11.

103. Donova, D., Zdrzilova, N., The comparison of the probabilistic calculation of course of temperatures in peripheral construction with actual measured data. Advanced Materials Research, 1041:154-157, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.154.

104. EN 1991-1-3. Eurocode 1: Actions on structures. CEN, 2003, 48 p. 42. 104

105. Eurocode – Basis of structural design : EN 1990:2002+A1. – Brussels : Management Centre, 2002. – 116 с. – (European Standard).

106. Feth Th., Oberguggenberger M. Propagation of uncertainty through multivariate functions in the framework of sets of probability measures // Reliability Engineering and System Safety, 2004/ Vol. 85, N 1-3. P. 73-87.

107. Janas P., Krejsa, M., Krejsa V., Bris R., Structural reliability assessment using Direct Optimized Probabilistic Calculation with respect to the statistical dependence of input variables. In: Proceedings of 25th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2015): Safety and Reliability of Complex Engineered Systems. CRC Press: Taylor & Francis Group, 2015. ISBN 978-1-138-02879-1.

108. Kovalenko L., Popov N., Radchenko V. Solution of the plane stochastic creep boundary value problem // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2009. Vol. 73, no. 6. Pp. 727-733.

109. Krejsa M., Janas P., Krejsa V., Application of the DOProC Method in Solving Reliability Problems. *Applied Mechanics and Materials*, 821:717-724, 2016. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.821.717.
110. Michael Havbro Faber . *Statistics and Probability Theory*/ M. H. Faber.- Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich, Switzerland. 2012.- pp. 129-142.
111. Mushchanov, V. Accounting for the probabilistic nature of geometric imperfections form spatial coatings on the stands braced-cantilever type [Текст] / V. Mushchanov, A. Annenkov, A. Orzhekovskiy // *Металлические конструкции*. – 2014. – Том 20, №3. – С. 169-178.
112. Penmetsa R.; Grandhi R.: Efficient estimation of structural reliability for problems with uncertain intervals. *International Journal of computers and Structures*, 80(2002) March. P 1103-1112.
113. Rackwitz R. *Reliability Analysis Past, Present and Future* // 8-th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, Indiana, July 20-26, 2000.
114. Yubin, L.; Zhong, Q.; Guangyuan, W.: Fuzzy random reliability of structures based on fuzzy random variables. *Fuzzy Sets and Systems*, 86 (1997), 345-355.
115. Oehme P. *Schäden an Stahltrawerken: Statistische Schadensanalyse unter Deachtung juristischer Aspekte*.— Berlin: Bauinformation, 1990,- 40 s.

Приложение А

**АКТЫ И СПРАВКИ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ
РАБОТЫ**

УТВЕРЖДЕНО:

Директор СК «Олимпик»

Процив А.М.

3 103 / 2014 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научных исследований аспиранта Оржеховского Анатолия Николаевича в производство стационарных стальных рамно-консольных покрытий над трибунами СК «Олимпик»

Результаты научных исследований аспиранта кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры Оржеховского А.Н. внедрены при проектировании стационарных стальных рамно-консольных покрытий над трибунами основного игрового поля, а также запасного тренировочного поля с искусственным покрытием на территории СК «Олимпик».

Предложенная методика расчета вероятности отказа стационарных стальных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов была использована при проектировании несущих конструкций покрытий зрительных трибун игровых полей СК «Олимпик».

Эффективность разработанной методики заключалась в снижении массы стационарных конструкций покрытий над трибунами основного поля на 23% (по сравнению с первоначально предлагаемым проектным решением) и 29% трибун тренировочного поля с синтетическим покрытием. Данный эффект был достигнут благодаря расчету конструкций на основе применения прямых методов теории надежности базирующихся на вычислении нормируемых показателей надежности проектируемых конструкций, принятых в соответствии с ДБН В.1.2-14-2009, что позволило оптимизировать выбор: геометрии решетки ферм, марки стали, сечений профилей.

Внедрение в производство позволило получить экономический эффект, при применении данной методики расчета, на общую сумму по двум полям в размере 52127 грн. (пятьдесят две тысячи сто двадцать семь гривен).

Настоящая справка предоставлена в специализированный Совет по месту защиты аспиранта Оржеховского А.Н. диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Технический директор
благотворительного фонда
«Фонд развития футбола в
Донецкой области «Олимпик»



Капинус Ю.М.



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, тел.: (062) 340-15-80,
(0623) 22-24-67, факс (0623) 22-77-19, email: mailbox@donnasa.ru, идент. код 02070795

от 01.09.14 № 4-04-46
на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.006.02 при
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Оржеховского Анатолия Николаевича на тему «Особенности напряженно-деформированного
состояния и надежность проектируемых и эксплуатируемых рамно-консольных покрытий над
трибунами стадионов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Комиссия в составе: проректора по учебной работе, д.т.н., профессора Зайченко Н.М., декана строительного института, к.т.н., доцента Алехина А.М., начальника учебного отдела, к.э.н., доцента Сухины А.А. свидетельствует, что при подготовке специалистов по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» в дисциплине «Вероятностные методы строительной механики и теории надежности строительных конструкций», в лекционном материале и методическом пособии, а так же при подготовке специалистов по специальности 08.03.01 «Промышленное и гражданское строительство» в дисциплине «Основные положения расчета конструкций по предельным состояниям », в лекционном материале, используются теоретические и практические данные по кандидатской диссертационной работе Оржеховского Анатолия Николаевича «Особенности напряженно-деформированного состояния и надежность проектируемых и эксплуатируемых рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов».

Члены комиссии:
Проректор по учебной работе,
д.т.н., профессор



Декан строительного факультета,
к.т.н., доцент

Начальник учебного отдела,
к.э.н., доцент

Н.М. Зайченко

А.М. Алехин

А.А. Сухина

Приложение Б**ПОДБОР СЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНОГО РАМНО-КОНСОЛЬНОГО
СТАЦИОНАРНОГО ПОКРЫТИЙ НАД ТРИБУНАМИ СТАДИОНА С
УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ НАДЕЖНОСТИ НА ПРИМЕРЕ
ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО БЛОКА ПОКРЫТИЯ
ЮЖНОЙ ТРИБУНЫ ГЛАВНОГО ИГРОВОГО ПОЛЯ СК «ОЛИМПИК» В
ГОРОДЕ ДОНЕЦКЕ**

Рассмотрим методику подбора сечений стальных рамно-консольных стационарных покрытий над трибунами стадионов на примере уже эксплуатируемого деформационного блока покрытия южной трибуны главного игрового поля СК «Олимпик» в городе Донецке.



Рис. Б.1. Конструкция стационарного покрытия над трибунами стадиона СК «Олимпик»

Конструктивная схема стационарного покрытия представляет собой стержневую систему выполненную из «Г»-образных плоских консольных рам (в качестве основных несущих конструкций) установленных с шагом 6 м., связанных между собой ферменными связями и прогоном на консоли. Все узлы принимаются жесткими; следовательно, конструкция является много раз статически не определимой системой. Крепление к фундаменту конструктивно выполнено таким образом, что в расчетной схеме целесообразно рассматривать его как жесткую заделку (рис. Б.1)..

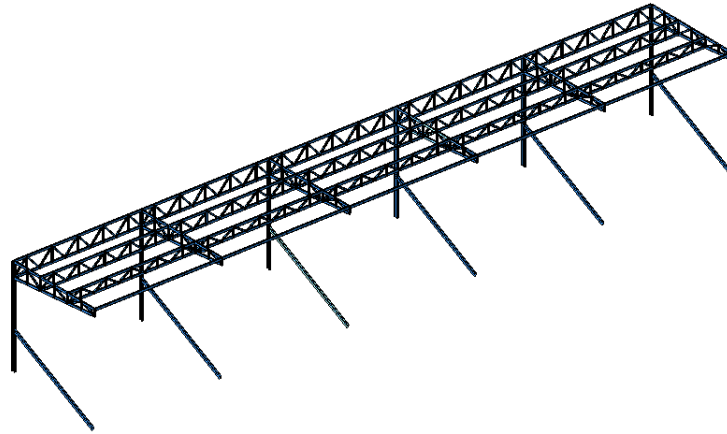


Рис. Б.2. Конструктивная схема рамно-консольного покрытия.

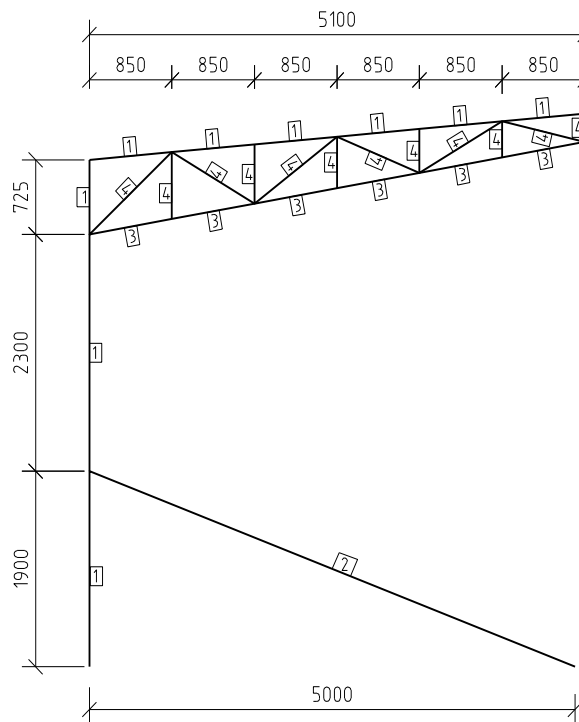


Рис. Б.3. Геометрическая схема плоской рама с указанием номеров жесткостей элементов конструкции.

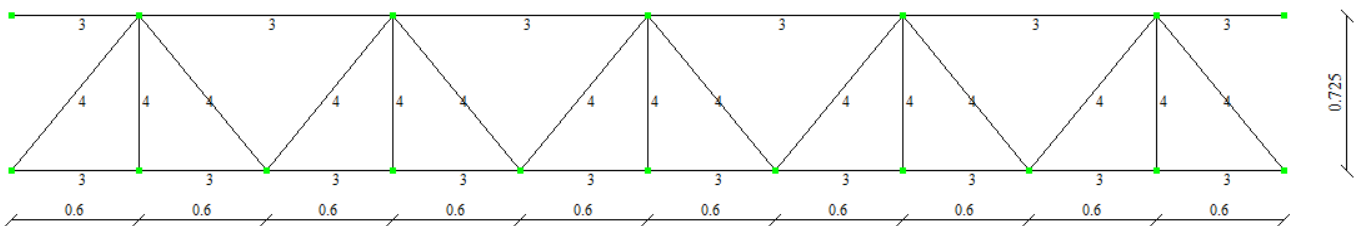


Рис. Б.4. Геометрическая схема плоской ферменной связи с указанием номеров жесткостей элементов конструкции.

Сечения конструкции покрытия над трибунами стадиона СК «Олимпик»

№	Название	Размер
1	Двутавр	II №16
2	Швеллер	I №16
3	Гнуто-сварная прямоугольная труба	□ 100x60x3
4	Гнуто-сварная квадратная труба	□ 60x2,5
5	Гнуто-сварная прямоугольная труба (прогон на консоли)	□ 200x60x4,5

Примечание: принятые значения сечений определены в соответствии с нормативными документами ДБН В 1.2-14-2009 и ДБН В.2.6-163:2010 при следующих значениях системы частных коэффициентов надежности: $\gamma_c=1$, $\gamma_d=1$, $\gamma_n=1$.

Далее реализуются вычисления в программном комплексе разработанном в среде математического программирования MATLAB (п. 3.4).

К рассмотренному покрытию прикладывают снеговую нагрузку (приведя ее к узловой) и производится итерационный расчет до момента достижения заданного количества элементов вышедших из строя.

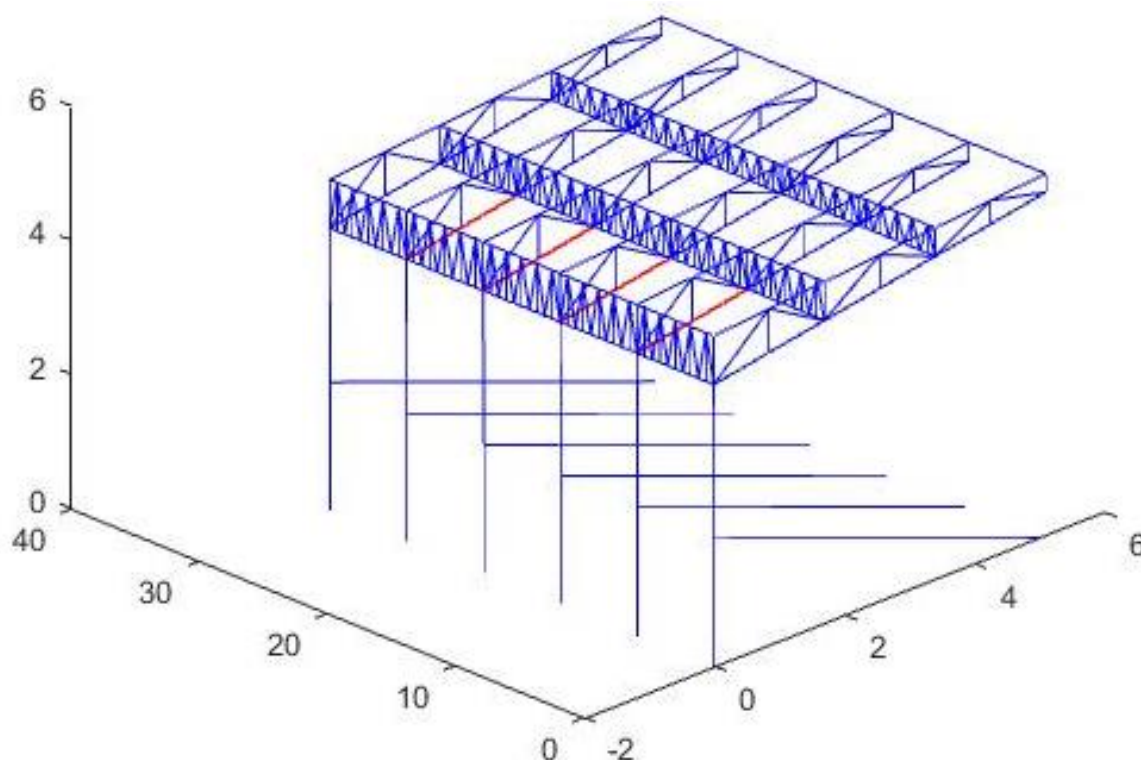


Рис. Б. 5. Элементы конструкции, вышедшие из строя на 4 цикле расчета.

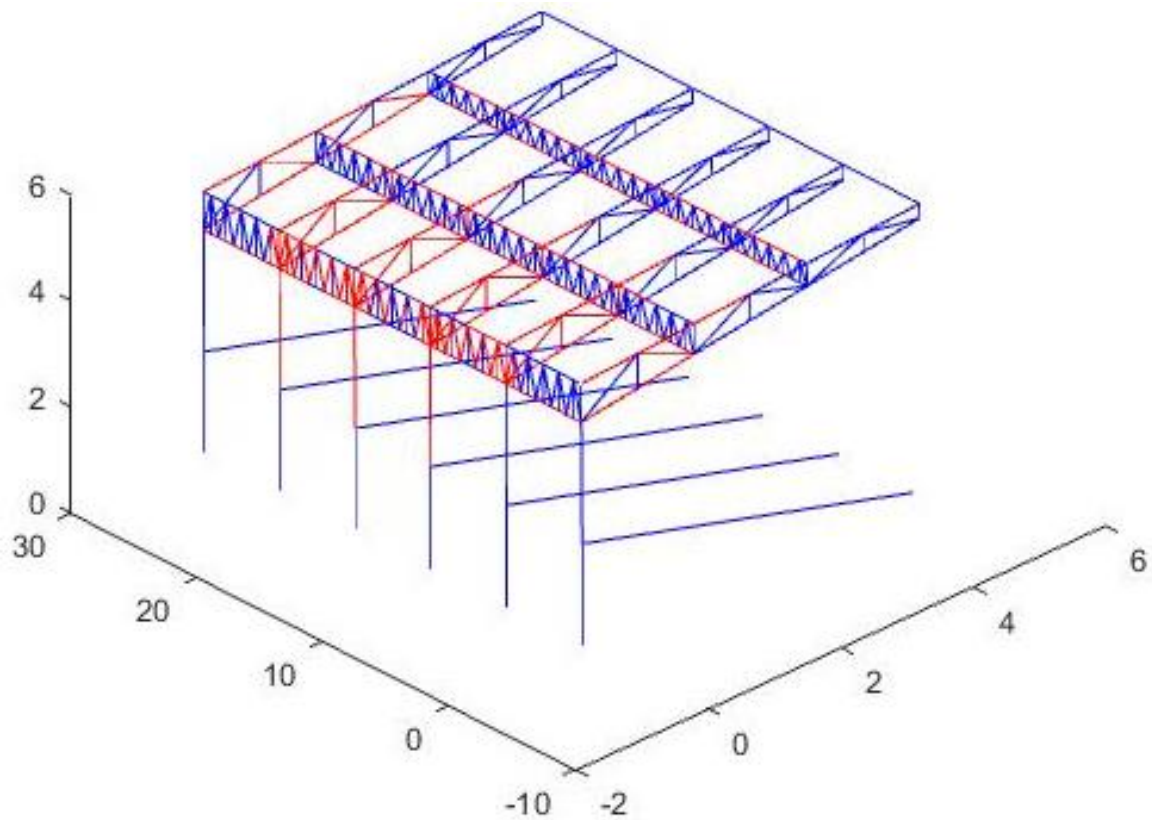


Рис. Б.6. Элементы конструкции, вышедшие из строя на 5 цикле расчета.

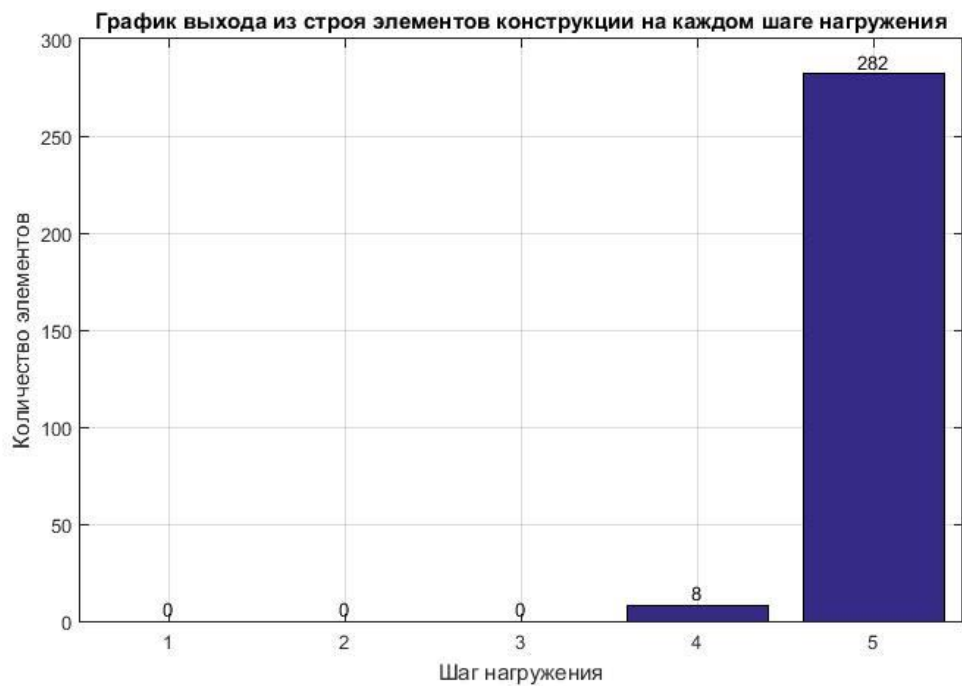


Рис. Б.7. График выхода из строя элементов конструкции на каждом шаге нагружения.

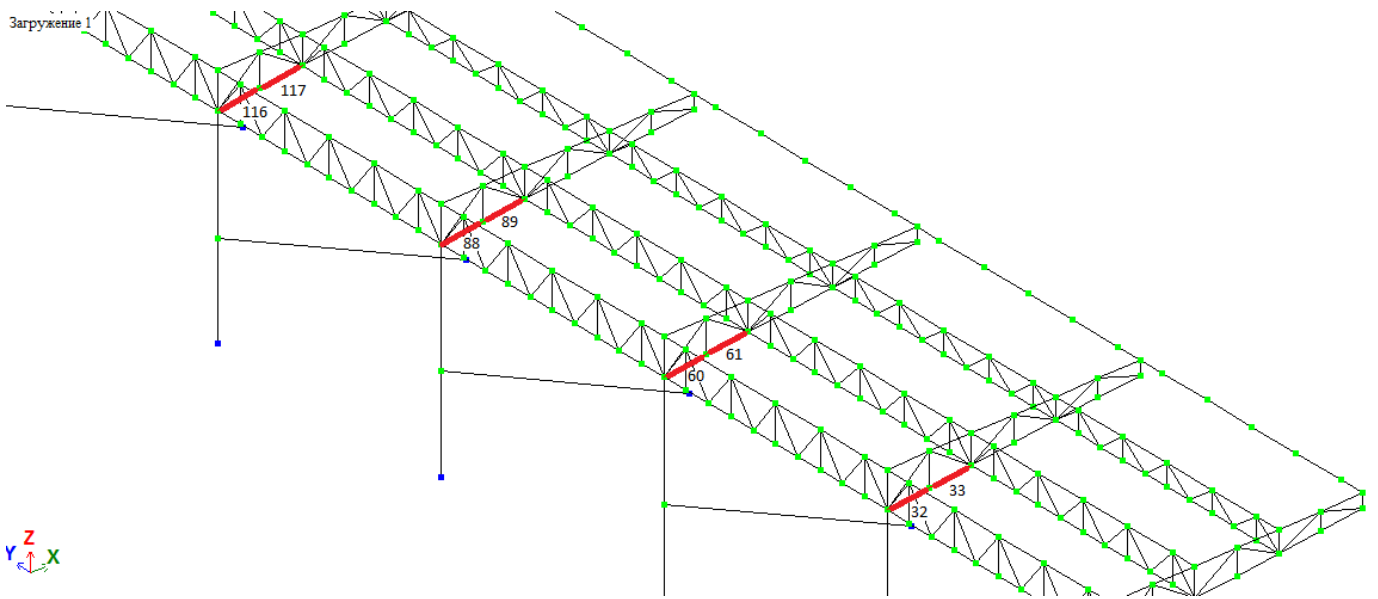


Рис. Б.8. Положение стержней определяющих надежность конструкции

На каждом цикле расчета дополнительно прикладывается нагрузка 1 кН. Если на предыдущем цикле какой либо элемент вышел из строя, он исключается из системы и она пересчитывается заново без приложения дополнительной нагрузки. Таким образом, учитывается явление лавинообразного разрушения (рис. 3.1). У рассматриваемого покрытия на четвертой итерации вышли из строя элементы 32, 33, 60, 61, 88, 89, 116, 117 (рис. Б.5, Б.6, Б.7, Б.8)

Зная законы распределения всех рассматриваемых стохастических величин (п. 3.4-3.7), используя генератор случайных чисел, формируем выборки в объеме 10000. Далее, используя детерминированный расчет (п. 4.1) на основе метода конечных элементов, насчитываются выборки напряжений в рассматриваемых восьми элементах.

Полученные случайные величины напряжений и предела текучести анализировались методами мат статистики (ХИ2-анализ, критерий Шапиро-Уилка). Так как полученные выборки напряжений в стержнях и предела текучести аппроксимируются нормальным законом распределения, в качестве вероятностной характеристики вычислялась характеристика безопасности β (дальность отказа). (рис. 4.1)

Результаты подбора площади сечения элементов конструкции, с учетом требований надежности

№ элемента	Итерация №1			Итерация №2			Нормативные значения	
	Сечения	$\beta_{расч}$	γ_c	Сечения	$\beta_{расч}$	γ_c	γ_c (ДБН)	β_i^{ex} (ДБН)
32	□ 100x60x3	4,4255	0,9729	□ 100x60x5	4,9827	0,9734	0,9	4,76
33	□ 100x60x3	4,6404	0,9742	□ 100x60x5	5,1573	0,9748		
60	□ 100x60x3	4,0775	0,9708	□ 100x60x5	4,7634	0,9712		
61	□ 100x60x3	4,2966	0,9722	□ 100x60x5	4,8135	0,9725		
88	□ 100x60x3	4,0775	0,9708	□ 100x60x5	4,7634	0,9712		
89	□ 100x60x3	4,2966	0,9722	□ 100x60x5	4,8135	0,9725		
116	□ 100x60x3	4,4255	0,9729	□ 100x60x5	4,9827	0,9734		
117	□ 100x60x3	4,6404	0,9742	□ 100x60x5	5,1573	0,9749		

Примечание: в столбце «Итерация №1» указаны данные для конструкции запроектированной только в соответствии с требованиями предельных состояний, в столбце «Итерация №2» указаны данные для конструкции запроектированной в соответствии с требованиями предельных состояний и отвечающей требованиям надежности

Полученные значения β сопоставляем с нормативными [32]. Требования норм не выполняются ($\beta \geq \beta_i^{ex}$). Вычисляем требуемое значение математического ожидания площади элементов. Принимаем новые сечения и полностью пересчитываем второй блок программы с учетом вычисленных коэффициентов условий работы. Результаты расчета сведены в таблицу Б.2. Анализируя полученные результаты можно отметить:

- явно прослеживается симметрия конструкции;
- насчитанные значения γ_c в значительной мере отличаются от рекомендованных нормами ДБН для конструкций повышенной ответственности (класс последствий “СС3”, категория ответственности “А”);
- при использовании методики приведенной в работе (п.4), для обеспечения требуемого уровня надежности системы, металлоемкость конструкции увеличивается, но на крайне малую величину (менее 1%), по сравнению с общей массой конструкции.

Приложение В

**ТАБЛИЦА КОЭФФИЦИЕНТОВ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ДЛЯ
СТАЦИОНАРНЫХ СТАЛЬНЫХ СРЕДНЕВЫХ РАМНО-КОНСОЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ НАД ТРИБУНАМИ СТАДИОНОВ**

γ_c		Вылет консоли L (м)																						
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Шаг несущих рам H (м)	2	1	1	1	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	
	2.5	1	1	1	1	1	1	1	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	4	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
	4.5	1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
	5	1	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96
	5.5	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95
	6	1	1	1	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93
	6.5	1	1	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.92
	7	1	1	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.91
	7.5	1	1	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.9
	8	1	1	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.9	0.9	0.89	0.89
	8.5	1	1	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.9	0.9	0.89	0.89	0.89	0.88
	9	1	1	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.91	0.9	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88	0.87
	9.5	1	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.91	0.9	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86
10	1	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92	0.91	0.91	0.9	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86	0.85	
10.5	1	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.9	0.89	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.85	0.85	0.84	
11	1	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.9	0.89	0.88	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.84	0.83	0.83	
11.5	1	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.9	0.9	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82	
12	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.9	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.81	0.8	

Примечание: для определения промежуточных значений допускается использование линейной интерполяции