

В печать
17.10.2017

На правах рукописи



Оржеховский Анатолий Николаевич

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

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2017

Работа выполнена на кафедре теоретической и прикладной механики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Мушанов Владимир Филиппович,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
проректор по научной работе,
заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики.

Официальные оппоненты:

Зверев Виталий Валентинович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой металлических конструкций;

Самойленко Михаил Евгеньевич
кандидат технических наук,
ООО «Донбасский ПРОМСТРОЙНИИПРОЕКТ»,
г. Ростов-на-Дону, главный архитектор.

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,
г. Симферополь.

Защита состоится «22» декабря 2017 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38 (0623) 22-77-19, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 01.006.02



Назим Ярослав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Мушанов, В.А. Пашинский, Б.Н. Кошутин, А.М. Айзен, Otto F., F. Thoft-Christensen, Soltani M., Taylor R.Y. 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 сне-

говой 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.

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, изготовления, 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 [1,2];
- подготовка и проведение исследований прочностных и геометрических характеристик фасонного металлопроката в виде гнутых замкнутых сварных прямоугольных труб [3];
- разработка методики оценки надежности рамно-консольных стационарных покрытий над трибунами стадионов, в том числе, на предмет возможности возникновения лавинообразного разрушения системы [2,5];
- разработка методики подбора сечений стержневых элементов рамно-консольных стационарных покрытий над трибунами стадионов с учетом требований надежности [4,5];

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_s , 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика работы, приведено обоснование актуальности темы. Определена цель, задачи исследований, дана характеристика объекта и предмета исследований, сформулирована научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первом разделе анализируется состояние вопроса. Приводятся общие исторические этапы и предпосылки изучения вопроса обеспечения надежности строительных конструкций, как с помощью прямых вероятностных методов оценки, так и на основании метода предельных состояний. Рассматриваются основные конструктивные формы покрытий над трибунами стадионов. Выполнен обзор методов вычисления вероятности отказа конструкции (точных и приближенных), как основной характеристики надежности системы. Проанализированы методы обеспечения надежности (безотказной работы) сооружения. Рассмотрены основные причины аварийности конструкций покрытий над трибунами стадионов, подходы в современных нормативных документах по обеспечению заданного уровня надежности конструкции, методики вычисления коэффициентов запаса, анализа живучести конструкции и основных факторов, влияющих на надежность конструкции. Сформулированы цель, методы и задачи исследования.

На основании изложенного, был обоснован вывод о том, что актуальная проблема обеспечения необходимого уровня надежности при проектировании покрытий стадионов, в частности рамно-консольных, которая во многом определяет эффективность строительства, не получила систематического и полного решения и на сегодняшний день, отсутствует обоснованный подход к их проектированию. Решить данную проблему предлагается на основе численного определения показателей надежности. Сформулированы цель и задачи исследований.

Во втором разделе обосновано применение упрощенного подхода к вычислению характеристик надежности системы, базирующегося на анализе характеристик надежности группы наиболее ответственных элементов конструкции. Определен

наиболее рациональный метод вычисления вероятности отказа конструкции. Обоснованы основные параметры, влияющие на надежность системы, и способы их учета при определении характеристик надежности.

Так как система много раз статически неопределима, целесообразно вычислять показатели надежности для наиболее ответственной группы элементов. С этой целью производится итерационный геометрически и конструктивно нелинейный расчет конструкции, по результатам которого устанавливается группа поочередно вышедших из работы элементов конструкции, определяющих надежность конструкции в целом. Проанализирована точность основных численных методов вычисления характеристик безопасности конструкции (на примере статически определимой балки), в дальнейших расчетах принят метод Монте-Карло, как наиболее предпочтительный.

В **третьем разделе** предложены алгоритм определения группы наиболее ответственных элементов конструкции и анализа живучести сооружения. Приведен алгоритм численного определения характеристик надежности системы, базирующийся на методе конечных элементов. Выполнен анализ характеристик надежности несущих конструкций покрытия над трибунами с использованием варьируемых параметров в виде вылета консоли, шага рам, угла наклона покрытия к горизонту. Анализ производился при учете как отдельно действующих факторов, влияющих на надежность (факторы приведены в 2 разделе), так и при совместном учете.

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. 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 нормативной 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. По результатам выполненных расчетов фиксируется группа разрушенных элементов, при которых дальнейшая эксплуатация покрытия будет невозможной, а также расположение наиболее напряженных элементов несущих ферм покрытия и максимальные усилия M и N в них.

Для проведения численного эксперимента с целью определения показателей надежности на основе разработанного алгоритма принят пространственный блок покрытия над трибунами стадиона, состоящий из шести несущих консольных рам и, соответственно, пяти пролетов, объединенных связями по покрытию и колоннам. Блок-схема рассматриваемой методики приведена на рисунке 1. Геометрическая схема несущих консольных рам с указанием основных геометрических параметров конструкции приведена на рисунке 2. Конструктивные схемы вариантов покрытий приведены в таблице 1.

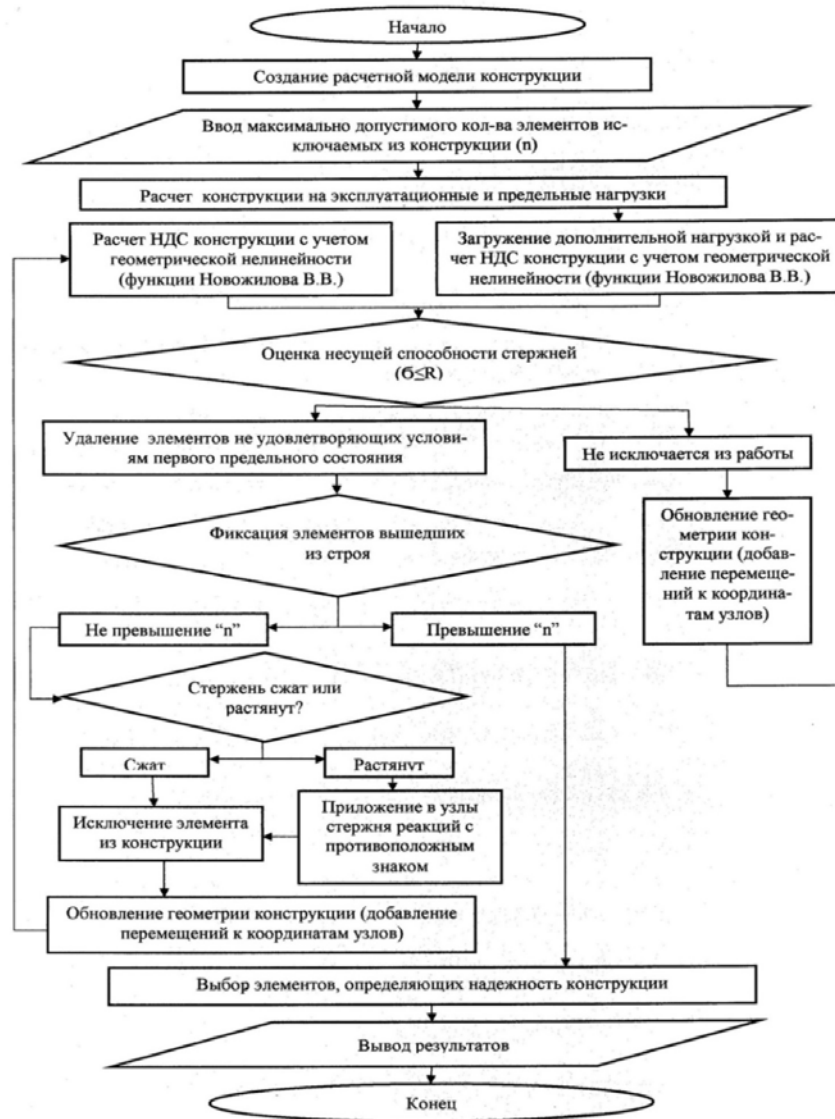


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения группы элементов конструкции, характеризующих надежность системы в целом.

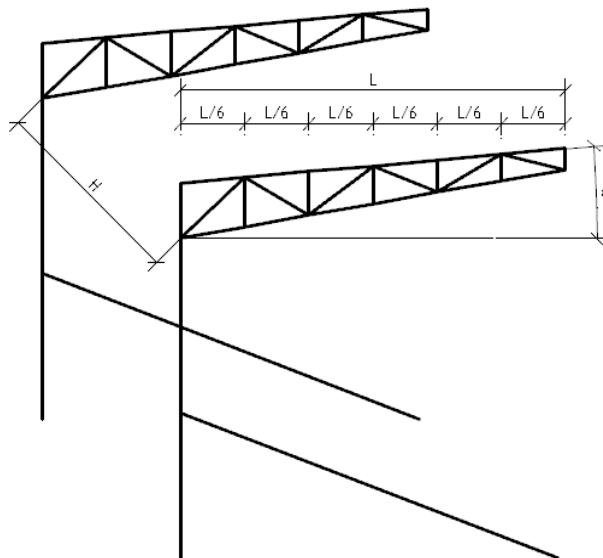


Рис. 2. Геометрическая схема несущих консольных рам покрытия над трибунами стадиона: L – вылет консоли, H – шаг несущих рам; α – угол наклона покрытия.

Таблица 1 – Рассматриваемые конструктивные варианты покрытия над трибунами

<p>№1 ($\alpha=0^\circ$, $H=4\text{м}$, $L=4\text{м}$)</p>	<p>№2 ($\alpha=30^\circ$, $H=4\text{м}$, $L=4\text{м}$)</p>
<p>№3 ($\alpha=0^\circ$, $H=12\text{м}$, $L=4\text{м}$)</p>	<p>№4 ($\alpha=30^\circ$, $H=12\text{м}$, $L=4\text{м}$)</p>
<p>№5 ($\alpha=0^\circ$, $H=4\text{м}$, $L=22\text{м}$)</p>	<p>№6 ($\alpha=30^\circ$, $H=4\text{м}$, $L=22\text{м}$)</p>
<p>№7 ($\alpha=0^\circ$, $H=12\text{м}$, $L=22\text{м}$)</p>	<p>№8 ($\alpha=30^\circ$, $H=12\text{м}$, $L=22\text{м}$)</p>

Расчет системы производится в программном комплексе, разработанном на основе языка программирования MATLAB. По результатам выполненных расчетов фиксируется группа разрушенных элементов, при которых дальнейшая эксплуатация покрытия будет невозможной, а также расположение наиболее напряженных элементов несущих ферм покрытия и их максимальные усилия M и N (таблица 2, рисунок 3). Вследствие симметрии блока покрытия, наиболее напряженные элементы находятся в двух средних фермах.

Для выбранных на предыдущем этапе расчета 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 10^4 - 10^8 реализаций для обеспечения требуемой точности расчета.

Таблица 2 – Информация о выходе из строя стержней фермы, имеющей наибольшие напряжения в элементах

Вариант конструкции	Шаг догружения конструкции при исключении стержней	Количество исключаемых стержней	Номера исключаемых стержней
1	8	1	1
2	7	3	1,2,7
3	8	1	2
4	9	1	1
5	12	1	7
6	6	1	1
7	2	3	1,2,7
8	2	4	1, 2, 7, 13

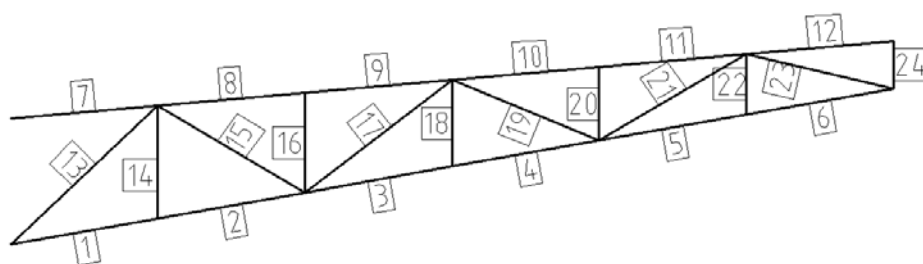


Рис. 3. Присвоение порядковых номеров стержням несущей фермы.

В качестве второй составляющей уравнения надежности выступает случайная величина характеристики сопротивления материала конструкции (предел текучести) $\bar{R}(t)$, которая формируется на основе анализа статистических данных, полученных на металлургических заводах, либо экспериментально. Полученные две обобщенные случайные величины обрабатываются методами математической статистики (определяются их законы и плотности распределения). На основе установленных законов распределения случайных величин вычисляются соответствующие статистические характеристики (математическое ожидание, стандартное отклонение). Далее, оперируя плотностью, законами и характеристиками распределений вычисляются вероят-

ности отказа и характеристика безопасности (дальность отказа) для каждого из выбранных элементов в группе. Максимальное значение вероятности отказа является нижней границей вероятности отказа. На рисунке 4 изображена блок-схема предложенного алгоритма. Вероятность отказа определяется методом Монте-Карло.

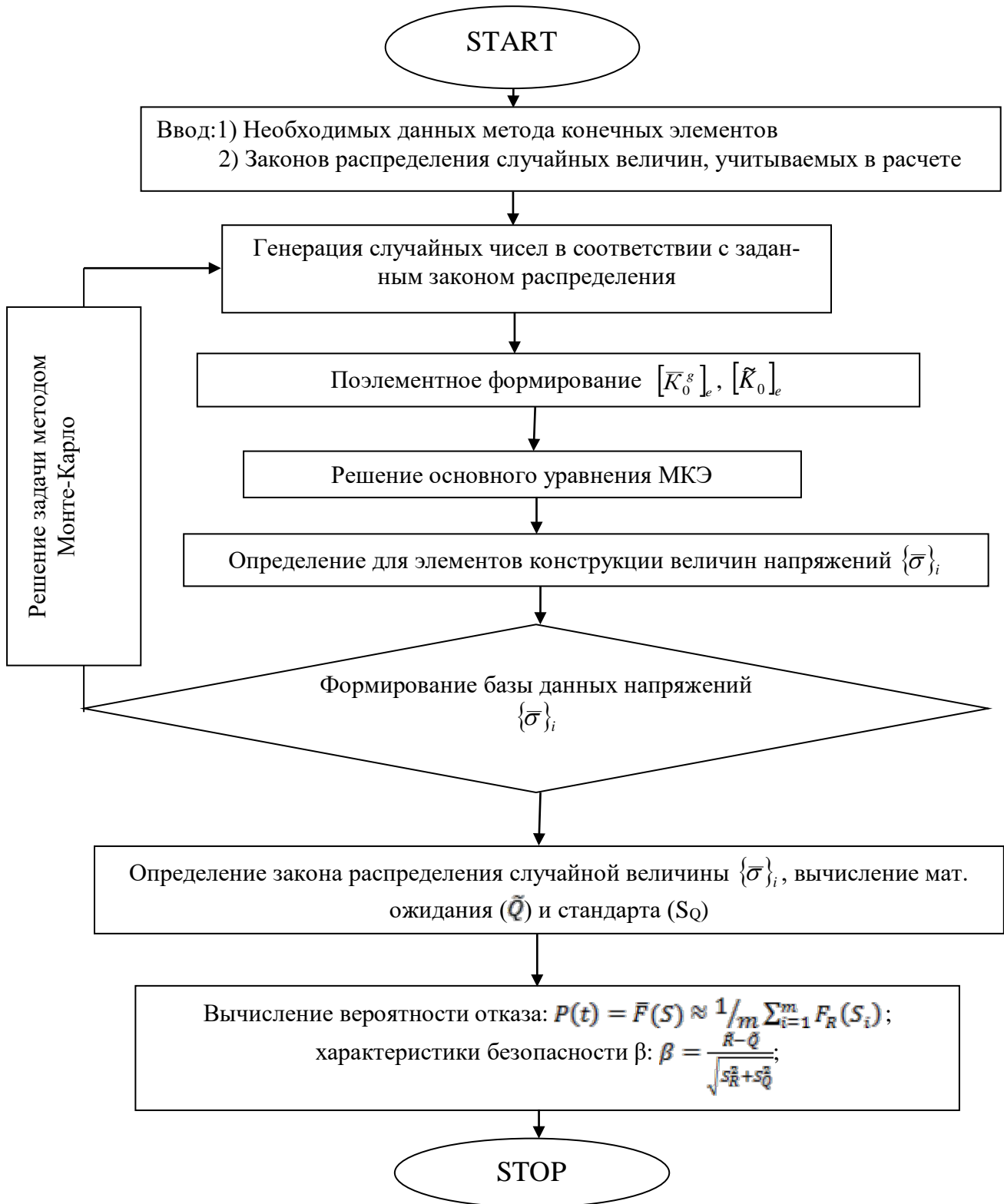


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения критериев надежности стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.

Геометрические характеристики плоских сечений и прочностные характеристики генерируются на основании анализа металлопроката двух металлургических заводов: «Луганский трубный завод» и «ПАО Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна». Материал каждого из рассмотренных типоразмеров сечений был заявлен в сопроводительном паспорте металлопроката, как обыкновенная углеродистая сталь. Но ни один испытуемый образец не имел характерной площади текучести. 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%. Полученные результаты приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Стохастические характеристики размеров сечений гнутых прямоугольных сварных труб (ГОСТ 8645-68), полученные опытным путем

Сечение	Кол-во замеров	Толщина стенки (мм)		Высота сечения (мм)		Ширина сечения (мм)	
		Мат. ожид.	Ст. откл.	Мат. ожид.	Ст. откл.	Мат. ожид.	Ст. откл.
60x40x3	250	2,96	0,25	58,98	1,48	38,77	2,15
120x60x3	250	2,98	0,19	118,07	3,98	58,39	2,79
100x100x3	250	2,93	0,26	99,13	5,60	98,34	5,85
100x60x3	250	2,89	0,23	97,51	5,63	57,79	1,71

Таблица 4 – Значения прочностных характеристик сечения гнутых прямоугольных сварных труб (ГОСТ 8645-68) полученные опытным путем

Сечение	Сталь	Мат. ожид.		Стандарт		Числ. станд. (μ)	Эксп. знач. (МПа)		Нормативное значение (МПа)	
		$\overline{\sigma}_B$	$\overline{\sigma}_{0,2}$	$\hat{\sigma}_B$	$\hat{\sigma}_{0,2}$		R_{ym}^n	R_{un}^n	R_{ym}	R_{un}
60x40x3	Ст3пс	482,58	317,44	22,38	35,15	3,15	206,72	411,50	225	370
120x60x3	Ст3пс	443,67	332,21	31,07	22,07	3,15	262,69	345,80	225	370
100x100x3	Ст1пс	428,85	323,63	28,53	31,88	3,15	223,21	338,98	-	-
100x60x3	Ст3пс	418,54	379,03	25,84	29,46	3,15	286,23	337,14	225	370

Выборки прочностных свойств и геометрических характеристик металлопроката всех сечений были подвергнуты χ^2 -анализу на предмет возможности аппроксимации распределения случайных величин нормальным законом распределения по критерию Пирсона (использовалась программа *Microsoft Excel*).

Анализ показал, что распределение каждой из случайных величин, отличается от нормального не более, чем на 5% (был задан уровень значимости 0,05).

Снеговая нагрузка как случайная величина принималась в соответствии с двойным экспоненциальным законом распределения Гумбеля. Методом математической инверсии было получено выражение, позволяющее сформировать выборку значений снеговой нагрузки для Донецкого региона

$$S = 521,48 - 270,413 \cdot \ln(-1,0 \cdot \ln(R + 0,0375)), \quad (1)$$

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

Необходимые параметры распределения Гумбеля получены путем анализа статистики снеговых максимумов за год в течение 40 лет. Анализируя формулу (1)

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 позволяет осуществить реализации значений снеговой нагрузки в пределах от 200 до 1500 Па, что соответствует характеру нагрузки для рассматриваемого региона.

Так как способы учета геометрических несовершенств, получаемых конструкцией на монтаже, и податливости основания крайне сложно реализуемы, для много раз статически неопределимой системы, каковой является рассматриваемая конструкция покрытия над трибунами стадиона, то учет данных факторов осуществляется на основе анализа реальной геометрической формы системы. На практике это реализовалось с помощью фиксации координат узлов конструкции методами геодезии.

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 ФК «Олимпик» с целью получения статистической информации. Исследования проводились в июле-сентябре 2013 года на стадионе «Олимпик» в г. Донецк.

На основе анализа выборки отклонений геометрии точек А, Б, В, полученных при геодезической съемке (рисунок 5), и просадок конструкции стационарного рамно-консольного покрытия над трибунами стадиона «Олимпик» построена гистограмма распределения отклонений приведенная на рисунке 6.

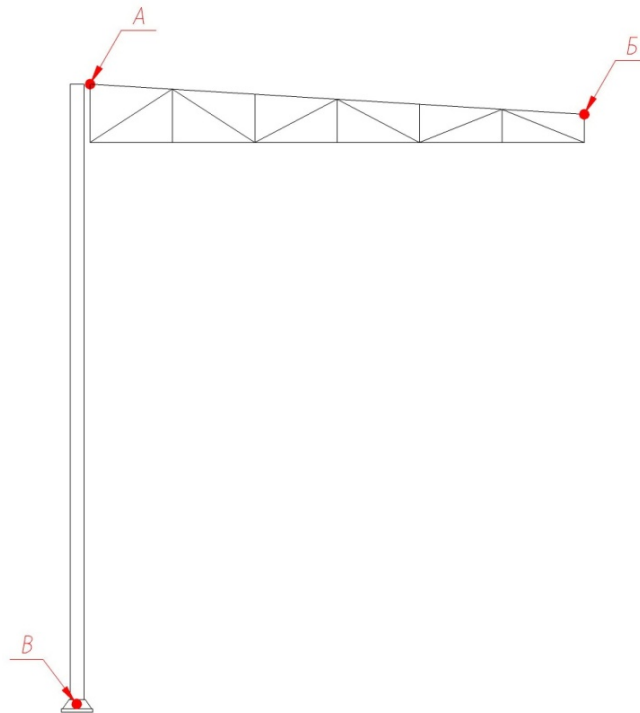


Рис. 5. Схема контрольных точек на конструкциях трибун:
А, Б, В – контрольные точки на конструкциях трибун.

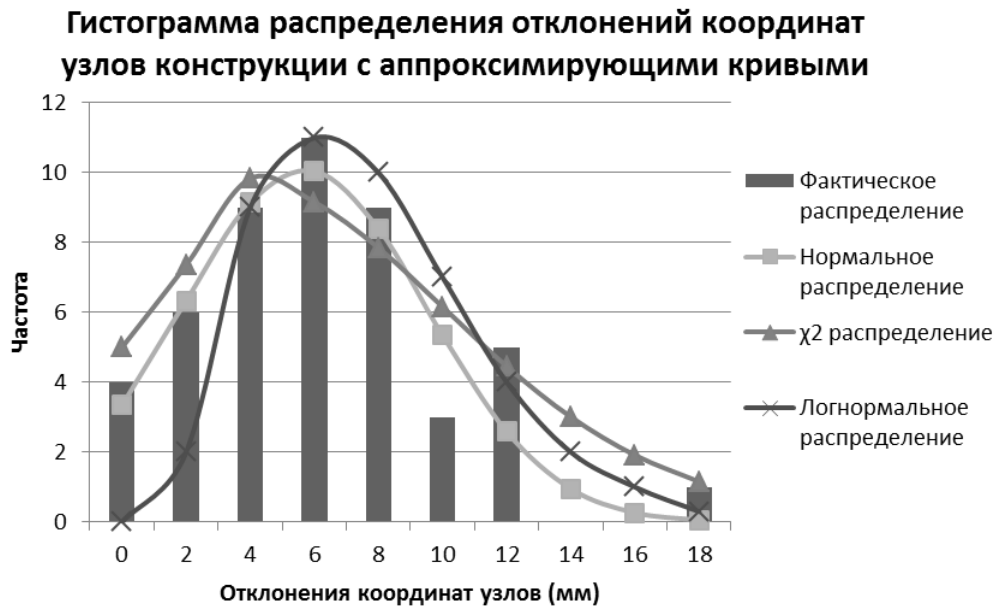


Рис. 6. Гистограмма распределения отклонений координат узлов конструкции с аппроксимирующими кривыми.

Представляя отклонения геометрии точек как случайную величину, рассматривались несколько законов распределения на предмет аппроксимации (χ^2 , логнормальное и нормальное распределения). В качестве аппроксимирующего принят нормальный закон распределения. Дополнительно рассматриваемая случайная величина была подвергнута χ^2 -анализу по критерию Пирсона (использовалась программа *Microsoft Excel*). 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.

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). Данные приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Стохастические характеристики размеров сечений гнутых прямоугольных 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

Результаты проведенных вычислений вероятности отказа и характеристики надежности рассматриваемых форм конструкции покрытия над трибунами стадиона при совместном учете выше перечисленных факторов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики надежности наиболее ответственного элемента конструкции при раздельном и комплексном учете ряда случайных величин

№ схемы	Снеговая нагрузка		Податливость ос- нования и геомет- рические несо- вершенства кон- струкции		Геометрических несовершенств плоских сечений металлопроката		Комплексный учет всех факторов		Нормативные значения (ДБН Украина)	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β_i^{ex}	P_i^{ex}
1	5,46	$0,946 \cdot 10^{-7}$	5,72	$0,235 \cdot 10^{-9}$	7,04	$0,334 \cdot 10^{-11}$	4,47	$0,824 \cdot 10^{-4}$	4,76	$1 \cdot 10^{-6}$
2	5,21	$0,564 \cdot 10^{-7}$	5,33	$0,783 \cdot 10^{-8}$	6,52	$0,543 \cdot 10^{-11}$	4,49	$0,772 \cdot 10^{-4}$		
3	5,41	$0,629 \cdot 10^{-7}$	5,64	$0,698 \cdot 10^{-7}$	7,22	$0,752 \cdot 10^{-10}$	4,52	$0,835 \cdot 10^{-4}$		
4	5,77	$0,994 \cdot 10^{-7}$	5,93	$0,988 \cdot 10^{-7}$	7,11	$0,654 \cdot 10^{-10}$	4,89	$0,568 \cdot 10^{-6}$		
5	5,91	$0,547 \cdot 10^{-8}$	6,07	$0,255 \cdot 10^{-9}$	7,21	$0,256 \cdot 10^{-11}$	5,01	$0,986 \cdot 10^{-6}$		
6	5,04	$0,743 \cdot 10^{-7}$	5,21	$0,815 \cdot 10^{-7}$	6,29	$0,112 \cdot 10^{-9}$	3,57	$0,378 \cdot 10^{-4}$		
7	4,85	$0,217 \cdot 10^{-5}$	4,82	$0,348 \cdot 10^{-5}$	6,03	$0,952 \cdot 10^{-6}$	3,22	$0,267 \cdot 10^{-4}$		
8	4,81	$0,443 \cdot 10^{-5}$	4,79	$0,321 \cdot 10^{-5}$	5,99	$0,419 \cdot 10^{-7}$	3,08	$0,399 \cdot 10^{-4}$		

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

Анализируя данные приведенные в таблице 6 однозначно можно сказать, что комплексный учет стохастических величин дает большее значение вероятности отказа, чем каждой по отдельности, значения характеристик безопасности сопоставимо с нормативными, но в большинстве вариантов (1-3, 6-8) не удовлетворяет требованиям надежности выдвигаемым к покрытиям над трибунами стадионов, как к конструкциям, в случае обрушения которых, могут быть большие финансово-экономические, а так же людские потери.

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.

В четвертом разделе приведена методика подбора сечения элементов конструкции покрытия с учетом требований надежности. Приведена методика нормирования коэффициента условий работы γ_c для обеспечения требуемого уровня надежности конструкции. Предложена методика анализа живучести системы на основе разницы характеристик безопасности β для верхней и нижней границы надежности. Проведен анализ изменения металлоемкости системы при применении коэффициента условий работы, вычисленного по предлагаемой методике.

Пересчет коэффициентов условий работы и подбор требуемых сечений металлопроката, исходя из требований надежности, производится в два основных этапа.

1. На первом этапе формируется совокупность стержневых элементов системы, для которых будет производиться пересчет (рисунок 1). Основываясь на полученных данных, выбирается группа наиболее ответственных элементов конструкции, для которых целесообразно производить пересчет коэффициента условия работы.

2. В случае удовлетворения требований надежности расчет заканчивается. Если надежность не обеспечена, пересчитываются частные коэффициенты надежности и решается обратная задача, целью которой становится определение требуемого значения 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 (рисунок 7).



Рис. 7. Блок-схема алгоритма вычисления требуемых значений коэффициентов условий работы и подбора сечений элементов стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.

Коэффициент условий работы определяется как

$$\gamma_c = 1 - \frac{\gamma_m \left(\frac{\bar{\sigma}^p}{1 - \mu_\sigma k_\sigma} - \sigma_0^p \right)}{\bar{R}_y^n (1 - \mu_r k_r)}, \quad (2)$$

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 (предела 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.

Для установления корректной математической модели связи коэффициента условий работы и исходных варьируемых параметров системы (вылет конструкции консольной фермы (L), шаг несущих консольных рам (H) и процент недонапряжения сечения, обусловленный ступенчатой градацией сортамента металлопроката и конструктивными требованиями, выдвигаемыми к элементам конструкции) был проведен соответствующий численный эксперимент, результаты которого приведены в таблице 8.

Таблица 7 – 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

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

$$\gamma_c = 0.9969 + 0.00191 \cdot H + 0.00295 \cdot L - 0.001025 \cdot H \cdot L, \quad (3)$$

где: H – шаг несущих рам (м);

L – вылет несущей фермы (м).

Предлагается проводить комплексную оценку надежности и живучести посредством оценки разброса величины характеристики безопасности (дальности отказа) β для верхней и нижней границы надежности системы (рисунок 8).



Рис. 8. Блок-схема определения обобщенной характеристики резерва живучести и несущей способности.

При достаточном запасе несущей способности проектируемой конструкции $\beta > 4,76$ (схемы 1...5) требуется значительное увеличение временной нагрузки, инициирующей лавинообразное разрушение конструкции, сопровождаемое 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 $\Delta\beta = 1,8 \dots 2$. Данные приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Вычисление обобщенной характеристики резерва живучести и несущей способности

№ схемы	Характеристики безопасности		Вероятность отказа		Резерв ($\beta_{\max} - \beta_{\min}$)
	β_{\min}	β_{\max}	$P_{f \min}$	$P_{f \max}$	
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

Проведен анализ изменения технико-экономических показателей конструкции при обеспечении требуемого уровня надежности путем ввода в расчет исправленных коэффициентов условий работы γ_c (рисунок 7). Использование скорректированного коэффициента условий работы для наиболее ответственных элементов стационарных рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов, как правило, не приводит к значительному увеличению удельной металлоемкости сооружения.

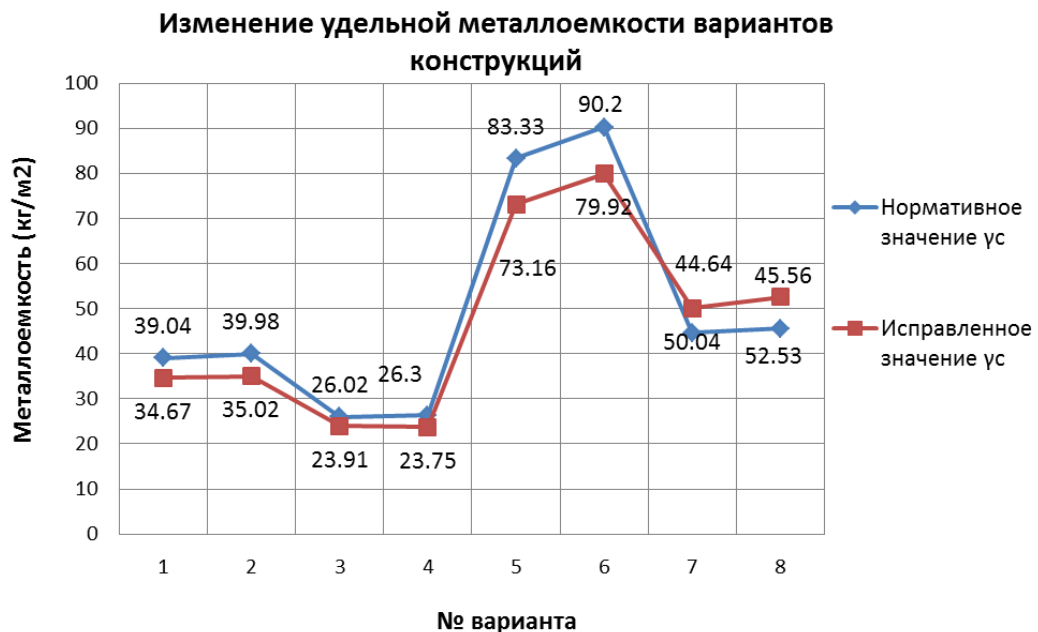


Рис. 9. Изменение удельной металлоемкости покрытия.

В случаях достаточной удаленности значений вылета и шага конструкции от критических значений ($L=22$ м, $B=12$ м) возможно даже уменьшение металлоемкости.

На основе разработанной методики был произведен анализ проектных решений конструкций покрытия над трибунами стадиона ФК «Олимпик» для ряда конструкций покрытий над трибунами стадиона и выполнена их необходимая корректировка для обеспечения надежности, предъявляемой к сооружениям с повышенным уровнем ответственности.

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: $\beta=4,79$, $P_f=0,321 \cdot 10^{-5}$; второе влияние по степени значимости оказала снеговая нагрузка: $\beta=4,81$, $P_f=0,443 \cdot 10^{-5}$; и наименьшее влияние на надежность системы оказывает дефекты геометрии сечений фасонного металлопроката: $\beta=5,99$, $P_f=0,419 \cdot 10^{-7}$;

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

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.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

– публикации в рецензируемых научных изданиях, утвержденных перечнем ВАК МОН Донецкой Народной Республики:

4. 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

– публикации 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:

5. Роменский, Д.И. Подбор сечения элементов стальных рамно-консольных покрытий 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.

АНОТАЦИЯ

Оржеховский Анатолий Николаевич. Особенности напряженно-деформированного состояния и надежность проектируемых и эксплуатируемых рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2017 г.

Диссертация посвящена изучению надежности и напряженно-деформируемого состояния стационарных рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов.

Во введении обоснована актуальность, сформулирована научная новизна, практическая ценность работы, дана ее общая характеристика.

В первом разделе выполнен анализ проектных решений и методов расчета показателей надежности рамно-консольных покрытий. Рассмотрены современные методы обеспечения надежности при проектировании данного типа конструкций.

Во втором разделе разработаны методики анализа живучести и надежности рамно-консольных конструкций над трибунами стадионов, базирующиеся на использовании в качестве оценки нижней границы вероятности отказа. Рассмотрены основные факторы, влияющие на надежность исследуемых конструкций: снеговая нагрузка, податливость основания, геометрические несовершенства сечений металлопроката, отклонение прочностных характеристик металлопроката от нормативных значений, геометрические несовершенства, получаемые конструкцией на монтаже. Приведены способы учета данных факторов.

В третьем разделе приведена методика анализа живучести системы, основанная на установлении верхней границы вероятности отказа и характеристики надежности конструкции. Проанализирована тенденция изменения показателей надежности при комплексном и раздельном действии факторов, определяющих надежность системы.

В четвертом разделе рассмотрена методика вычисления уточненного значения коэффициента условий работы γ_c . Предложена методика комплексной оценки надежности и живучести конструкций стальных стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов, базирующаяся на изменении величины характеристики безопасности (дальности отказа) $\Delta\beta$ для верхней и нижней границы надежности системы на предмет выявления возможности лавинообразного разрушения конструкции. Проанализирована тенденция изменения металлоемкости рассматриваемых конструктивных форм покрытия в зависимости от значения пересчитанного коэффициента условия работы.

Ключевые слова: рамно-консольное покрытие, коэффициент условий работы, надежность, метод предельных состояний, напряженно-деформированное состояние (НДС), живучесть.

ABSTRACT

Orzhekhovsky Anatoly. **Features of the stress-strain state and reliability of the projected and operated frame-console coatings over the stands of the stadiums.** – Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2017.

The thesis is devoted to the study of reliability and stress-deformable state of stationary frame-cantilever coatings structures above stadium stands.

In the introduction, relevance is grounded, scientific novelty is formulated, the practical value of the work is given, and its general characteristic is given.

In the first section, the analysis of design decisions and methods for calculating the reliability indices of frame-console coatings was carried out. Modern methods of ensuring reliability in the design of this type of structures are considered.

In the second section, methods for analyzing the survivability and reliability of frame-console structures above stadium stands have been developed. The main factors affecting the reliability of the structures under investigation are considered: snow load, base compliance, geometric imperfections of metal-roll sections, deviation of the strength characteristics of rolled metal from standard values, geometric imperfections obtained by the assembly design. The ways of accounting for these factors are presented.

In the third section, we present a technique for analyzing the survivability of a system, based on establishing the upper limit of the probability of failure and the design reliability characteristics.

In the fourth section, the technique for calculating the refined value of the operating conditions factor γ_c is considered. A technique is proposed for a comprehensive assessment of the reliability and survivability of structures of steel stationary frame and cantilever coverings above stadium stands, based on a change in the value of the safety characteristic (failure range) $\Delta\beta$ for the upper and lower limits of system reliability. The tendency of change of metal consumption of considered constructive forms of a covering is analyzed depending on value of the recalculated factor of a working condition.

Key words: frame-cantilever coating, coefficient of working conditions, reliability, limit state method, stress-strain state, survivability.