

В печать  
23.12.2019

*На правах рукописи*

**Цепляев Максим Николаевич**



**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНОК ВЕРТИКАЛЬНЫХ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО  
РАСПОЛОЖЕНИЯ КОЛЕЦ ЖЕСТКОСТИ**

05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Макеевка – 2019

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  
**Мущанов Владимир Филиппович,**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры», проректор по  
научной работе, заведующий кафедрой  
теоретической и прикладной механики.

**Официальные оппоненты:**

**Белый Григорий Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-строительный  
университет», профессор кафедры  
металлических и деревянных конструкций,  
г. Санкт-Петербург;

**Гольцев Аркадий Сергеевич,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, ГОУ ВПО «Донецкий  
национальный университет», профессор  
кафедры прикладной механики и  
компьютерных технологий, г. Донецк.

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет», г. Ростов-на-Дону.

Защита состоится «06» марта 2020 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, 1-й учебный корпус, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(062) 343-70-33, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://www.donnasa.ru>).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 01.006.02



Радионых Тимур Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Несмотря на общемировую тенденцию к увеличению использования альтернативных источников энергии, потребность в нефти продолжает расти. По прогнозам многих исследователей такая динамика сохранится, как минимум, на ближайшие 20 лет и затем ещё продолжительное время будет держаться на достигнутом уровне. Основным сооружением для хранения нефти и нефтепродуктов являются стальные вертикальные цилиндрические резервуары (ВЦР). Использование конструкций такого типа также является необходимым в целом ряде других отраслей, в том числе, для обеспечения эффективной работы объектов городского хозяйства и создания возможности их бесперебойной работы. Согласно исследованиям Украинского центра стального строительства, листовые конструкции составляют порядка 30-35% от общего объёма производимых строительных металлоконструкций. Более чем половину от объёма производства листовых конструкций составляют вертикальные цилиндрические резервуары. Также, актуальной проблемой является наличие большого количества резервуаров, нормативный срок эксплуатации которых подходит к концу либо завершился, к примеру, в Российской Федерации этот показатель составляет 70%. Все указанные обстоятельства обуславливают возрастающую потребность в строительстве новых и техническом обслуживании существующих ВЦР.

История применения резервуаров большого объёма насчитывает более 100 лет, тем не менее, зачастую на практике имеют место случаи общей и местной потери устойчивости цилиндрической стенки ВЦР. В частности, такие повреждения бывают вызваны действием ветровой нагрузки и составляют около 9% всех случаев аварийного отказа конструкции. Повреждённые таким образом конструкции, как правило, восстановлению не подлежат, что ведёт к ущербу, равному стоимости демонтажа и сооружения нового объекта. Говоря об обеспечении устойчивости стенки резервуара, существуют два принципиальных подхода: подбор достаточной толщины стенки, либо установка усиливающих элементов на стенку резервуара. Комплексные исследования сравнительной материалоемкости конструкции при использовании обоих методов отсутствуют. Также, следует учитывать, что в случае капитального ремонта есть возможность применения только второго подхода. Чаше других в качестве усиливающих элементов стенок вертикальных цилиндрических резервуаров применяются горизонтальные кольца жёсткости. Однако, в различных источниках и нормативных документах (СП, ДБН, Еврокодах и др.) приведены различные требования и рекомендации к шагу расположения и конструкции колец жесткости, что делает актуальным вопросом совершенствования и уточнения существующих методик по проектированию усиления стенок резервуаров горизонтальными кольцами жёсткости.

**Степень разработанности темы исследования.** Первые зафиксированные экспериментальные исследования по изучению потери устойчивости оболочек были проведены английским учёным В. Фэйербёрном в 1858 году. Первые фундаментальные результаты для шарнирно-опертой

круговой цилиндрической оболочки под внешним сжимающим давлением получил немецкий исследователь Лоренц в 1911 г. Несколько позже, в 1914 г. фон Мизесом было определено выражение для расчёта критической нагрузки потери устойчивости от действия равномерных кольцевых сжимающих нагрузок. Соответственно, стало возможным вычислить расстояние между кольцевыми рёбрами жёсткости, при обеспечении которого потеря устойчивости гарантированно не произойдёт. В тот период был проведён ещё целый ряд аналогичных исследований различными учёными, в частности: в 1913-1915 гг. задачей определения критического кольцевого напряжения занимался британский математик Саусвелл, в 1914 г. – И.Г. Бубнов, в 1932 г. – Флюгге, в 1934 г. – русский инженер П.Ф. Папкович, Все указанные исследователи получили выражения очень близкие по своему результату, при этом рассматривалась оболочка с шарнирным закреплением краёв и постоянной толщины. В 1934 г. Винденбург и Триллинг в своей работе упростили выражения, полученные Мизесом. По результатам работ 1914-1934 годов в практику реального проектирования и расчёта цилиндрических оболочек на устойчивость вошла формула для определения верхнего критического давления, получившая название Мизеса-Папковича, в некоторых литературных источниках фигурирует название Саусвелла-Папковича. Существенным уточнением, которое внёс американский учёный McGrath, стала возможность учёта ступенчатой толщины стенки. Выражения, полученные в его работе, легли в основу методики расположения колец жёсткости, согласно основным нормам для расчёта и проектирования резервуаров в США – API 650. При этом сама формула была получена для случая действия равномерного внешнего давления на стенку резервуара, что не соответствует реальному распределению ветрового потока на цилиндрическую конструкцию.

Дальнейшее развитие работ по устойчивости оболочек сводилось к устранению причин существенного отличия теоретических и экспериментальных значений критической нагрузки потери устойчивости, а также учёта различных краевых условий закрепления торцов оболочек. Работа в этих направлениях велась С.П. Тимошенко, Э.И. Григолюком, В.И. Феодосьевым, А.С. Вольмиром. Результаты работ указанных авторов позволили уточнить формулу Мизеса-Папковича, однако принцип размещения кольцевых подкреплений оставался прежним.

Анализ работы стенки резервуара с кольцами жёсткости затрагивает целый ряд современных исследователей. Так, в книге Самуэльсона и Эггвертца 1992 года, а также Тенга и Роттера 2003 года рассматривается работа стенки резервуара с кольцами жёсткости, и аналогичного без кольцевого усиления. В результате отмечено, что постановка даже одного кольца жёсткости повышает сопротивление потери устойчивости от действия кольцевых нагрузок в 1.5 раза. Аналогичные исследования реальных и теоретических конструкций проведены в работах А.А. Мочалина, Ф. Бу, К. Бургоса. Л.А. Годоя, М. Джахангири (2009-2016 годы). Все авторы отмечают эффективность применения горизонтальных колец жёсткости для повышения устойчивости стенки, указывая при этом недостаточную проработанность существующих методик расположения колец и

возможность повышения их эффективности. Авторами приводятся некоторые предложения и способы уточнения рекомендуемого шага колец жёсткости для резервуаров, однако они не носят комплексного решения и могут быть использованы лишь для случаев, близких к рассмотренным.

Таким образом, сам вопрос целесообразности и эффективности метода обеспечения устойчивости постановкой кольцевых рёбер жесткости не вызывает сомнения. Однако, размещение колец исходя из принципа равномерного внешнего сжатия, может не являться оптимальным, и учёт реальной эпюры ветрового давления позволит уточнить нормативные требования по обеспечению устойчивости стенки. Кроме того, остаётся нерешённым вопрос рациональности выбора количества колец для резервуаров различных габаритов.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена в рамках госбюджетной тематики:

- 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).

В рамках кафедральных научно-исследовательских тематик:

- К-2-07-11 «Усовершенствование аналитических и численных методов расчета строительных конструкций, их элементов и соединений на действие статических и динамических нагрузок с учетом влияния срока службы и факторов эксплуатационного износа» (2011-2016 г., гос. рег. №0111 U 008169);

- К-2-07-16 «Усовершенствование аналитических и численных методов расчета строительных конструкций, их элементов и соединений на действие статических и динамических нагрузок с учетом воздействия факторов износа и физически нелинейной работы материала» (2016-2020 г. гос. рег. № 0117D000262).

**Целью исследования** является разработка теоретического и экспериментального обоснования способов обеспечения устойчивости стенки резервуаров больших объемов путём рациональной расстановки колец жесткости, исходя из условий обеспечения максимальной устойчивости и минимального расхода стали с учётом реальной эпюры ветрового давления.

**Задачи исследования:**

- провести критический анализ ранее выполненных теоретических и экспериментальных исследований в сфере обеспечения устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров больших объемов;

- выполнить экспериментальную верификацию конечно-элементной модели вертикального цилиндрического резервуара для дальнейших численных исследований;

- установить для вновь проектируемых резервуаров со стенкой переменной толщины с идеальной геометрией зависимости, позволяющие выполнить рациональную расстановку колец жесткости;

- на основе результатов выполненных исследований установить для эксплуатируемых резервуаров с характерными геометрическими несовершенствами стенки переменной толщины зависимости, позволяющие

выполнить рациональную расстановку колец жесткости при максимальных значениях коэффициента устойчивости и минимизации ее металлоемкости;

- разработать рекомендации по уточнению методики проектирования резервуаров больших объемов в части обеспечения устойчивости их стенок при помощи кольцевых рёбер жёсткости.

**Объект исследования** - устойчивость стенки переменной толщины стального вертикального цилиндрического резервуара.

**Предмет исследования** - закономерности изменения напряженно-деформированного состояния и металлоемкости стенки вертикального цилиндрического резервуара под действием расчетных нагрузок в зависимости от шага колец жесткости.

**Научная новизна полученных результатов** состоит в следующем:

- для резервуаров больших объемов установлены зависимости между гибкостью стенки и коэффициентом запаса ее устойчивости, использование которых, в отличие от ранее применяемых подходов, позволяет осуществить назначение рационального шага колец жесткости при достижении максимального коэффициента запаса устойчивости и минимальной металлоемкости стенки;

- для стенки с дефектом, в уточнение зависимости между её гибкостью и коэффициентом запаса устойчивости, осуществлён учёт угловатости вертикального монтажного сварного шва резервуаров, в виде влияния параметров его ширины и глубины на общую устойчивость стенки;

- для случаев оболочки с идеальной геометрией и с наличием типового дефекта в виде угловатости вертикального сварного шва, установлена закономерность, отличающаяся учётом влияния гибкости отдельных участков стенки с кольцевыми рёбрами жёсткости на общую устойчивость при учете реальной эпюры ветрового давления;

- установлены резервы несущей способности оболочки стенки ВЦР в 4-7%, обусловленные использованием разработанной методики рациональной расстановки колец жесткости, что позволяет уточнить значения величин критических значений кольцевых напряжений в стенке по отношению к действующим в нормативных документах.

**Теоретическая и практическая значимость полученных результатов** состоит в следующем:

- разработаны рекомендации по уточнению методики проектирования резервуаров больших объемов со стенкой переменной толщины в части обеспечения устойчивости их стенок при помощи рационального расположения кольцевых рёбер жёсткости. Уточнённая методика размещения колец позволяет повысить устойчивость стенки на 4-7% по сравнению с рекомендациями нормативных документов при одновременном сохранении либо снижении металлоемкости конструкции до 5% от общего веса;

- установлены граничные параметры дефекта угловатости вертикального сварного шва, при наличии которых наблюдается максимальное снижение устойчивости стенки, находящейся под действием сжимающей поперечной нагрузки (ветер и вакуум). Для зависимостей, полученных для оболочки с неидеальной геометрией, разработана система корректирующих параметров,

позволяющих учесть влияние параметров дефекта на величину критических напряжений устойчивости;

- на основании проведенных исследований и полученных зависимостей предложены соответствующие повышающие коэффициент для вычисления аналитических значений кольцевых критических напряжений по нормам СТО СА 03-002-2009 и СП16.13330.2017, при использовании методики размещения колец, приведенной в данной работе;

- результаты исследования нашли свое применение при проектировании технических решений по усилению конструкций силосов имеющих дефекты и повреждения с помощью тонкостенных металлических оболочек выполняемых ООО «Донецкий ПромстройНИИпроект» в 2015 году (шифр проекта 20-1/15/45-15/8-ООЗС), а также в учебном процессе ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» в лекционном курсе «Расчет и проектирование зданий и сооружений» для магистров направления 08.04.01 «Строительство» со специализацией «Теория и проектирование зданий и сооружений».

**Методы исследования.** Основными типопредставителями для проведения численных и экспериментальных исследований послужили вертикальные цилиндрические резервуары объемом 10000 – 30000 м<sup>3</sup> со стационарной сферической кровлей - наиболее распространенная конструктивная форма как в дальнем зарубежье, так и в странах постсоветского пространства.

Численное моделирование выполнялось на основе метода конечных элементов с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4.

Экспериментальные исследования выполнялись с применением тензорезистивного метода для проверки адекватности численной модели на трёх характерных моделях резервуаров под действием внешнего давления на основе сравнения исследуемых величин напряжений и форм потери устойчивости цилиндрической оболочки.

#### **Положения выносимые на защиту:**

- установленные зависимости для проектируемых резервуаров со стенкой переменной толщины с идеальной геометрией, позволяющие выполнить рациональную расстановку колец жесткости;

- граничные параметры дефекта угловатости вертикального сварного шва и система корректирующих параметров, позволяющих учесть влияние параметров дефекта на величину критических напряжений устойчивости;

- методика проектирования резервуаров больших объемов со стенкой переменной толщины в части обеспечения устойчивости их стенок при помощи рационального расположения кольцевых рёбер жёсткости;

- повышающие коэффициенты для вычисления аналитических значений кольцевых критических напряжений по нормам СТО СА 03-002-2009 и СП16.13330.2017, применение которых рекомендовано в случае использования методики размещения колец, приведенной в данной работе.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является результатом самостоятельных научных исследований автора. В рамках выполнения диссертационной работы автором было:

- систематизировано и критически проанализировано значительное количество источников по теории и практике проектирования и эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления в части их расчёта на устойчивость, в результате которых выделен ряд особенностей, требующих уточнения и дальнейшего развития [2, 3, 4];

- разработаны методология и численные модели позволяющие выполнить исследование устойчивости цилиндрических стенок резервуаров большого объёма при совместном действии фактического распределения ветрового потока и вакуума [1, 5, 6, 9];

- проведены исследования влияния различных вариантов расположения и поперечного сечения кольцевых рёбер жесткости на напряжённо-деформированное состояние и устойчивость стенок вертикальных цилиндрических резервуаров [7, 8];

- результатом решения поставленных задач стала методика, позволяющая корректно решить важную научно-техническую задачу обеспечения устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров на основе рационального размещения колец жесткости [7,9].

**Степень достоверности результатов** подтверждается результатами экспериментальной верификации модели, сравнением полученных значений с результатами других авторов и известными аналитическими решениями. Также, достоверность обеспечивается использованием лицензионных программных комплексов и поверенного измерительного оборудования.

**Апробация результатов работы:** материалы исследований докладывались и обсуждались на:

- научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (г. Макеевка, 2016-2019 гг.);

- международной научно-практической конференции «Архитектура и искусство: от теории к практике» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 2018 г.),

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 9 научных изданиях, в том числе 7 публикаций – в рецензируемых научных изданиях: 6 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов; 1 – в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования Scopus и Web of science, 2 – публикации по материалам научных конференций.

Общий объем публикаций 5,17 п.л., из которых 2,89 п.л. принадлежат лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из: вступления, пяти разделов, выводов, списка использованных источников (125 наименований) и приложений. Работа изложена на 165 страницах, в том числе 115 страниц основного текста, 24 полных страницы с рисунками и таблицами, 13 страниц списка использованных источников, 13 страниц приложений.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и изложена общая характеристика работы. Определена цель, задачи исследований, дана характеристика объекта и предмета исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость результатов, полученных в диссертационной работе.

В первом разделе «Анализ существующих методов проектирования и расчёта конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров с горизонтальными кольцами жёсткости» рассматривается состояние вопроса. Определены предпосылки и вся цепочка эволюции взглядов и методов по использованию колец жёсткости в качестве усиливающих элементов в конструкциях стальных вертикальных цилиндрических резервуаров. Проведен критический анализ методик отечественной и зарубежной школы проектирования на примере рассмотрения соответствующих нормативных документов по расчёту вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления. По каждому рассмотренному нормативному документу определены достоинства и недостатки в части обеспечения устойчивости цилиндрических стенок резервуаров путём установки кольцевых рёбер жёсткости.

В результате проведенного критического анализа литературы был определён ряд особенностей, которые не учитывают существующие методики по обеспечению устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров кольцами жесткости. Более того, в большинстве нормативных документах требования к расположению колец жёсткости определены из формулы Мизеса-Папковича (а в некоторых отсутствуют вовсе), выведенной для определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости оболочки при воздействии равномерного внешнего давления по кольцу, что не обеспечивает оптимальное решение задачи. Ещё одним важным нерешенным вопросом является отсутствие рациональных границ применения кольцевых рёбер жесткости.

На основании вышеизложенного были определены вопросы, требующие дополнительного изучения, определена методология выполнения работы, а также сформулированы цель и задачи исследования. Также была ограничена область исследования резервуарами больших объёмов вместимостью от 10 до 30 тыс. м<sup>3</sup>.

Во втором разделе «Создание и экспериментальная верификация численной модели» на основе принятой методологии исследования приведена разработанная методика выполнения численных и экспериментальных исследований. Для достижения поставленной цели исследования – разработки уточнённой методики расположения колец жёсткости, уточнены расчетные модели для анализа случаев потери устойчивости оболочки, разработан подход к проверке адекватности численной модели, позволяющей в дальнейшем проведение неограниченного количества испытаний.

Основной расчётной нагрузкой при расчёте на устойчивость вертикальных цилиндрических резервуаров является сочетание воздействия ветра и вакуума. Учитывая нерациональность экспериментального моделирования случая потери

устойчивости от ветровой нагрузки на крупногабаритной модели резервуара, требующей наличия соответствующей сверхмощной аэродинамической установки, в качестве альтернативы была принята верификация результатов расчёта на устойчивость в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 на примере небольшой оболочечной конструкции, находящейся под действием равномерного внешнего давления, которое можно смоделировать экспериментально. Для решения задачи верификации, основываясь на разработанной методологии исследования, были предложены три характерные экспериментальные модели, различные вариации которых рассмотрены в дальнейших численных исследованиях (общий вид моделей приведен в таблице 1):

- оболочка без усиливающих элементов и дефектов формы (модель 1);
- оболочка с кольцом жёсткости (модель 2);
- оболочка с типовым характерным дефектом резервуаров (модель 3).

В качестве рассматриваемого характерного дефекта выбрана угловатость монтажного сварного шва резервуаров, монтируемых методом рулонирования (обоснование выбора дефекта приведено в работе).

Принципиальная схема модели изображена на рисунке 1. Корпус состоит из тонколистовой оцинкованной стали толщиной 0.5 мм. Модель состоит из трёх отдельных элементов (стенка, днище, крышка). Дополнительно все стыки и швы обрабатываются герметиками. Поскольку исследуется работа цилиндрической стенки, внутри корпуса модели устанавливаются деревянные распорки, которые исключают возможный отрыв днища и крышки, до момента потери устойчивости.

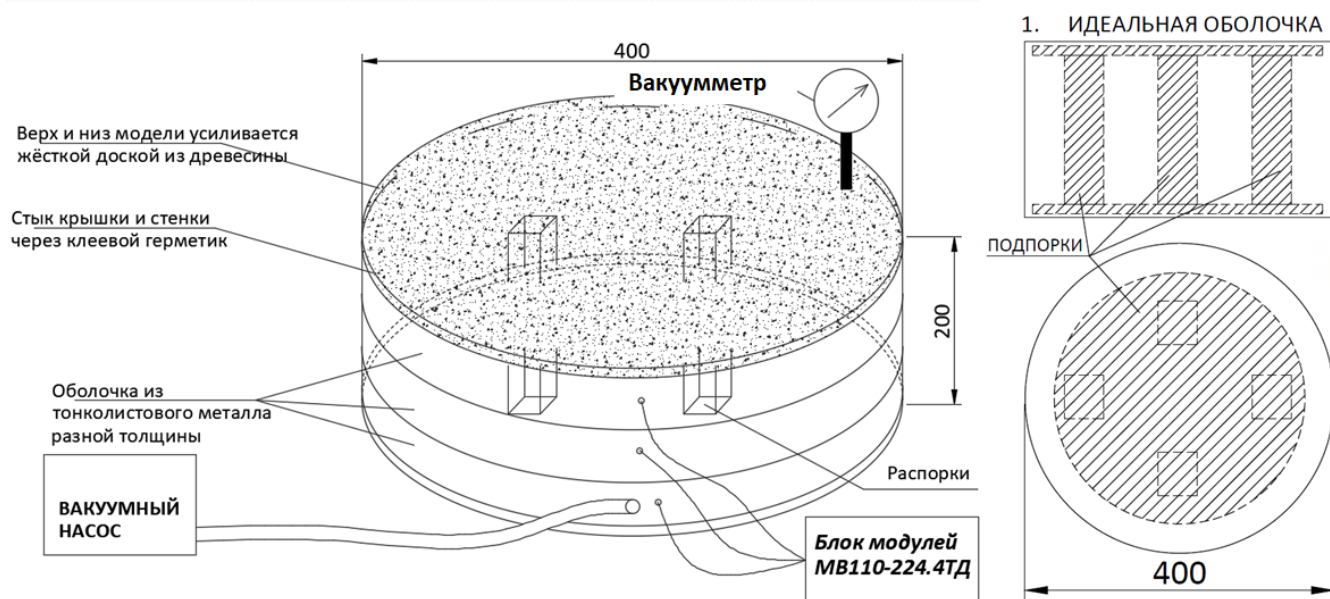


Рис.1. Принципиальная схема испытательных установок на примере модели №1 «идеальная оболочка»

Для определения возникающих напряжений использован тензорезистивный метод. Устройством преобразования сигналов тензодатчиков послужили 6 модулей ввода сигналов ОВЕН МВ110-224.4ТД с частотой опроса 0.1 сек. и погрешностью измерений менее 1 %. Результаты измерений

передавались на компьютер через коммутатор RS-485 и специализированное программное обеспечение Owen OPC Server.

Для вывода конечных значений в виде величины действующих напряжений использовалась программная оболочка MasterScada, в которой была написана подпрограмма для обработки данных, поступающих от измерительного оборудования. В результате программа формирует массив данных по каждому датчику, фиксируемый 10 раз в секунду.

Размещение тензодатчиков для всех моделей принималось одинаковым, и всего на корпусе располагалось 8 точек (розеток) измерения. Каждая точка состоит из 3-х датчиков для измерения кольцевых, осевых и действующих под  $45^\circ$  напряжений. Применялись тензодатчики 2ПКБ-5-100ТБ с базой 5 мм. Датчики размещались на равноудалённом расстоянии от места крепления колец жёсткости (КЖ), а также в зоне планируемого дефекта - рисунок 2.

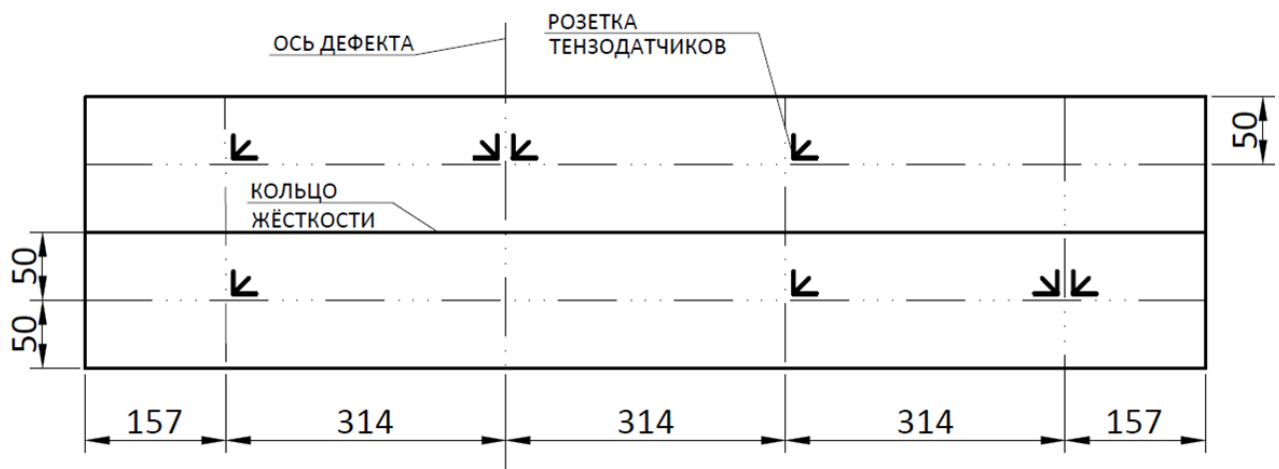


Рис.2. Развёртка стенки модели с расположением тензодатчиков

Перед испытанием была проведена тарировка тензодатчиков, в рамках которой наряду с определением коэффициента тензочувствительности датчиков анализировалась линейная зависимость получаемых показаний и общая работоспособность приборов.

Для всех случаев испытаний характерных моделей проводилось повышение нагрузки до момента потери устойчивости оболочки.

Процесс обработки результатов по каждой модели проводился для групп датчиков, которые формировались в зависимости от измеряемых напряжений (кольцевые, меридиональные, касательные). Данные с датчиков были синхронизированы со временем видеозаписи и определено, с точностью до 1-й секунды, время потери устойчивости. По результатам испытания для каждой группы датчиков были построены графики возникающих напряжений по времени. Ступенчатый характер полученных зависимостей обусловлен особенностями алгоритма программы Master Scada, в соответствии с которым запись показаний датчиков осуществляется 10 раз в секунду, что в дальнейшем для их сглаживания потребовало проведения аппроксимации полученных данных с помощью стандартных средств комплекса MS Office Excel.



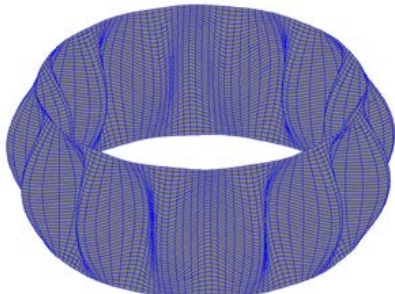


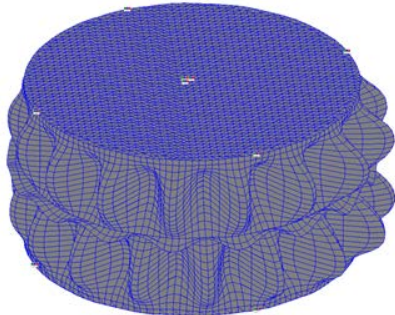


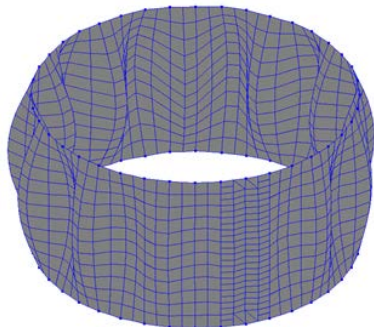
Сравниваемые величины экспериментальных и теоретических значений максимальных напряжений, определенных на основе конечно-элементного

анализа, соответствовали моменту потери устойчивости стенки. Итоговые значения кольцевых ( $\sigma_x$ ) и меридиональных напряжений ( $\sigma_y$ ), а также фактическая и теоретическая формы потери устойчивости для каждой модели, приведены в таблице 1.

Расхождение между численными и экспериментальными значениями напряжений не превысили 10%. По результатам эксперимента был сделан вывод об адекватности результатов расчёта на устойчивость в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 для рассматриваемого типа оболочечной конструкции. Определены параметры и характеристики численной модели резервуара, обеспечивающие близкие результаты по сравнению с экспериментальными данными при расчёте на устойчивость оболочечных конструкций. Также в разделе приведена методика задания расчётного сочетания нагрузок на численную модель.

Таблица 1.

Сравнение работы экспериментальных и численных моделей оболочек под действием внешнего давления.

№	Экспериментальная модель (напряжения и форма потери устойчивости)		Напряжения и форма потери устойчивости полученные в ЛИРА-САПР 2015 R4
	До испытания	После испытания	
1		 $\sigma_x$ : 13.1 МПа; $\sigma_y$ : 6.9 МПа;	 $\sigma_x$ : 13.35 МПа; $\sigma_y$ : 6.1 МПа;
2		 $\sigma_x$ : 23.2 МПа; $\sigma_y$ : 11.7 МПа;	 $\sigma_x$ : 24.8 МПа; $\sigma_y$ : 13.5 МПа;
3		 $\sigma_x$ : 13.2 МПа; $\sigma_y$ : 6.2 МПа.	 $\sigma_x$ : 13.4 МПа; $\sigma_y$ : 6.3 МПа.



В третьем разделе «Рациональное размещение колец жёсткости по результатам численных исследований для идеальной оболочки» на основе полученной верифицированной модели в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 было определено рациональное размещение колец жёсткости по высоте стенки, с точки зрения обеспечения устойчивости, а также определено их рациональное количество для рассматриваемых типоразмеров резервуаров.

Для решения задачи поиска расположения колец, при котором устойчивость стенки оказывается максимальной, для каждого из типоразмеров резервуаров проводилось последовательное и системное моделирование различного количества колец. Поскольку необходимо учитывать переменную толщину стенки резервуара, для фиксации расположения колец по высоте стенки была предложена величина, равная отношению высоты к средней толщине участка между кольцами жёсткости -  $\lambda$  (гибкость). Формула для определения гибкости:

$$\lambda = \frac{H^2}{\sum_{i=1}^n t_i h_i}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота участка между кольцами;  $h_i$  – высота пояса  $i$ -ой толщины входящего в участок  $H$ ;  $t_i$  – толщина  $i$ -го пояса входящего в участок  $H$ .

Алгоритм поиска, используемый при проведении анализа, представлен на примере резервуара объёмом 20 тыс. м<sup>3</sup> с высотой стенки 18 м. Последовательно моделировалось положение одного кольца жёсткости по высоте стенки резервуара, изменяющееся с шагом 1.5 м. Для каждого смоделированного случая расположения кольца в комплексе ЛИРА-САПР определялся коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) стенки. Фрагменты ВЦР с некоторыми вариантами расположения колец жёсткости, а также вычисленные КЗУ, изображены на рисунке 3.

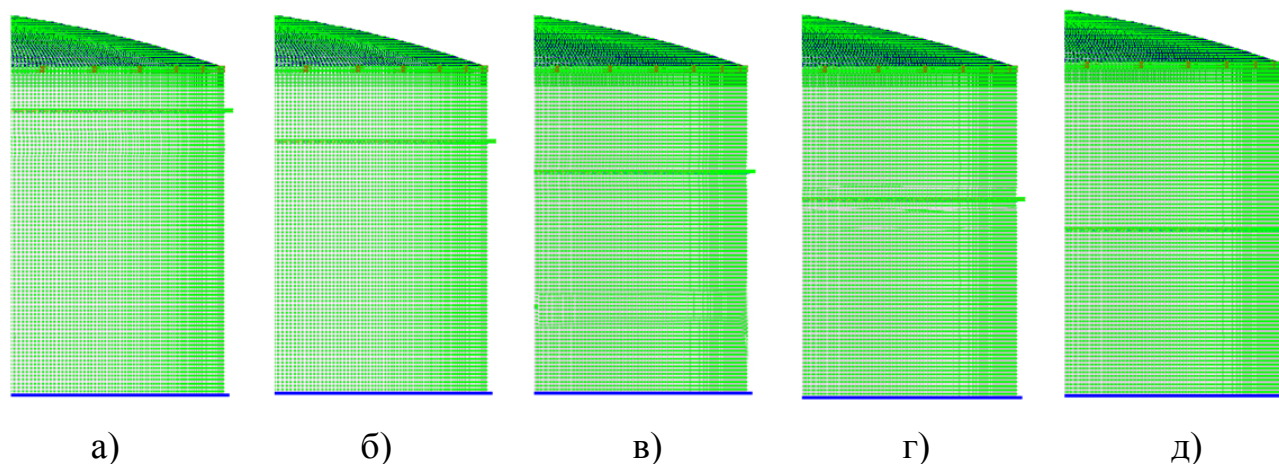


Рис. 3. Фрагменты моделей резервуара объёмом 20 тыс. м<sup>3</sup> с кольцом расположенным на высоте  $H$  и получаемый при этом КЗУ: а ( $H=16,65$ ; КЗУ=1,66); б ( $H=15,15$ ; КЗУ=1,87); в ( $H=13,65$ ; КЗУ=1,94); г ( $H=10,65$ ; КЗУ=2,17); д ( $H=9,15$ ; КЗУ=2,01)

Таким образом, был определён интервал, в пределах которого необходимо искать наиболее эффективное положение кольца. Последовательно располагая кольца с меньшим шагом, было уточнено положение, при котором КЗУ стенки резервуара оказывается максимальным без увеличения числа колец. При этом для найденной высоты были зафиксированы гибкости участков и соотношения между ними.

Далее были проведены аналогичные исследования для случаев 2-х колец, расположенных на стенке резервуара. Поскольку для случая наличия двух колец существует достаточно большое количество комбинаций, то в первую очередь рассматривались варианты размещения, приведенные в таблице 2.

Таблица 2.

КЗУ стенки при различном положении двух колец жесткости для резервуара объемом 20 тыс. м<sup>3</sup>

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=6,15; H_2=12,15$	$\lambda_1/\lambda_2=1,14; \lambda_2/\lambda_3=1,04$	2,72
Смещённые вверх	$H_1=12,3; H_2=15,25$	$\lambda_1/\lambda_2=1,02; \lambda_2/\lambda_3=0,268$	2,26
Гибкость верхнего участка 0,74 от нижележащего	$H_1=8,65; H_2=14,2$	$\lambda_1/\lambda_2=0,74; \lambda_2/\lambda_3=0,74$	2,75
С равной условной гибкостью между участками	$H_1=6,6; H_2=12,5$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=1$	2,93

Далее были проведены дополнительные численные исследования для поиска рационального расположения колец путём варьирования в диапазоне размещения двух колец, обеспечивающих максимальный КЗУ, согласно таблице 2. В результате, также были определены высоты расположения колец и зафиксированы отношения между гибкостями участков стенки, при которых она оказывалась наиболее устойчивой.

Аналогичное исследование было проведено для резервуара с различным расположением трёх колец жёсткости. Из всех рассмотренных вариантов, установлены две основные зависимости между гибкостями участков, при которых КЗУ стенки оказывается максимальным:

- 1) для случая размещения одного КЖ:  $\lambda_1/\lambda_2=0,74$ ;
- 2) для случая размещения двух и более КЖ :  $\lambda_1/\lambda_2=0,85$  и  $\lambda_i/\lambda_{i+1}=0,8$

Для резервуаров объемом 10 и 30 тыс. м<sup>3</sup> указанное отношение между гибкостями также оказалось наиболее эффективным с точки зрения обеспечения устойчивости от действия кольцевых напряжений. Полученные, исходя из предложенного варианта размещения, значения КЗУ сравнивались с вычисленными, при размещении по нормативным методикам. Во всех случаях,

КЗУ стенки при размещении по предложенному принципу оказывались выше на 5-6%.

Полученное соотношение гибкостей, тем не менее, не даёт понимания о рекомендуемом количестве колец. В связи с этим для решения задачи рационального применения колец жесткости установлены зависимости КЗУ от гибкости первого (верхнего) участка стенки (рисунок 4) и определены гибкости, при которых КЗУ резко возрастают для каждого типоразмера резервуара.

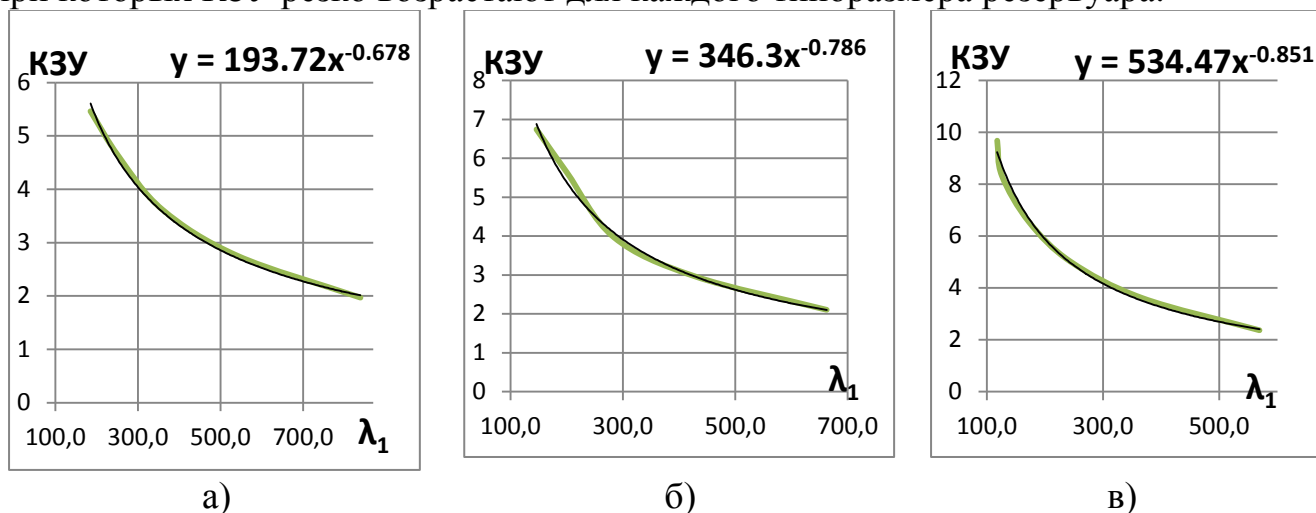


Рис. 4. Изменение КЗУ стенки в зависимости от гибкости первого участка  $\lambda_1$  для резервуаров объёмом: а – 10 тыс. м³; б – 20 тыс. м³; в – 30 тыс. м³

Полученные функциональные зависимости позволяют сделать вывод о применимости полученных данных для резервуаров промежуточных объёмов в диапазоне 10000 – 30000 м³.

Далее определены зависимости изменения веса стенки при постановке различного количества колец жёсткости. Рассматривался случай вновь проектируемого резервуара, требуемая толщина которого определялась по методике, приведенной в СП16.13330.2017.

Установлены зависимости материалоемкости стенки от количества кольцевых рёбер жесткости (рисунки 5, а-в). Для каждого рассматриваемого объёма резервуара на графиках приведены две кривые, одна из которых учитывает снижение веса конструкций стенки, вторая учитывает вес устанавливаемых колец жёсткости.

В результате проведенных исследований определены рекомендуемые гибкости 1-го участка исходя из условий:

**1) обеспечения максимальной устойчивости:**

- для резервуара с  $r/H = 0,79$ , КЗУ стенки резко возрастает при гибкости  $\lambda_1$  первого участка менее 570;
- для резервуара с  $r/H = 1,11$  при  $\lambda_1$  менее 330;
- для резервуара с  $r/H = 1,27$  при  $\lambda_1$  менее 270.

**2) минимального расхода стали:**

- для резервуара с  $r/H = 0,79$  оптимальное количество КЖ не более 2-х, что соответствует  $\lambda_1$  более 540;
- для резервуара с  $r/H = 1,11$  оптимальное количество КЖ также не более 3-х, что соответствует  $\lambda_1$  более 280;

- для резервуара с  $r/H = 1,27$  оптимальное количество КЖ не более 3-х, что соответствует  $\lambda_1$  более 245.

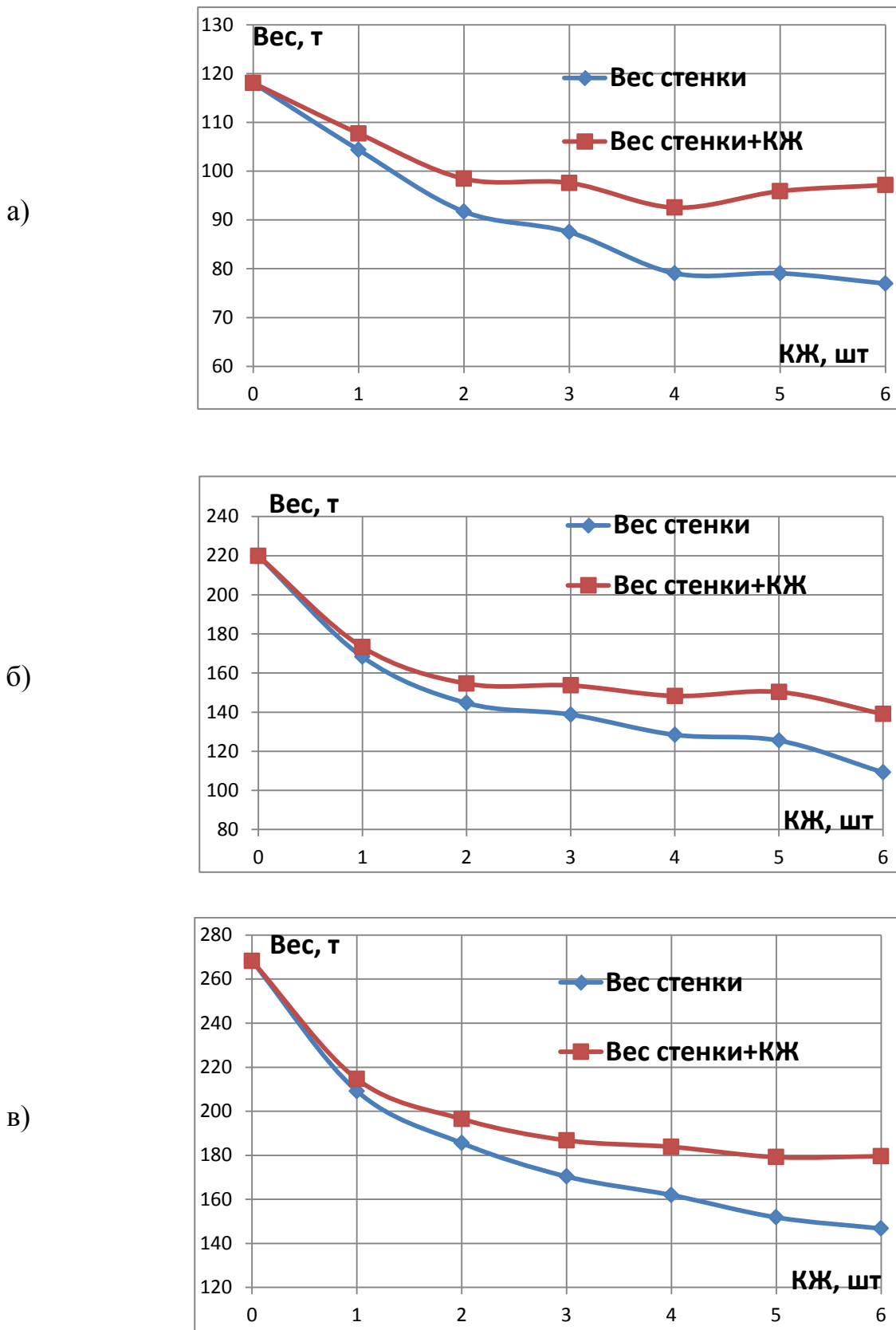


Рис. 5. Металлоёмкость конструкции стенки, в зависимости от количества колец, для резервуаров объёмом: а – 10 тыс. м<sup>3</sup>; б – 20 тыс. м<sup>3</sup>; в – 30 тыс. м<sup>3</sup>



**Исходя из полученных данных, величину  $\lambda_1$  для оболочки без дефектов следует принять:**

- 1) для резервуаров с отношением радиуса к высоте стенки с  $r/H = 0,79$ , гибкость  $\lambda_1 = 540..570$ ;
- 2) для резервуаров с  $r/H = 1,11$ , гибкость  $\lambda_1 = 280..330$ ;
- 3) для резервуаров с  $r/H = 1,27$ , гибкость  $\lambda_1 = 245..270$

Поскольку распределение ветрового потока имеет одинаковую характерную форму, для круглых в плане конструкций рассматриваемых габаритов при скоростях ветра до 50 м/с допустимо ввести в полученную зависимость учёт величины ветрового давления. Поэтому, рекомендуемая гибкость первого участка ( $\lambda_1$ ) будет записана в виде формулы 2:

$$\lambda = \frac{29}{V_p} \cdot \lambda_1, \quad (2)$$

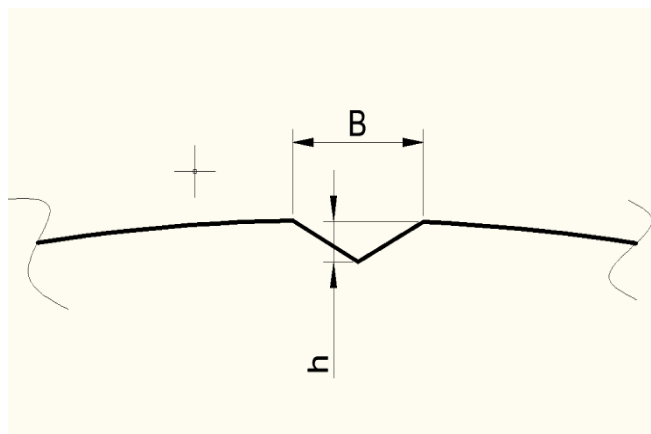
где  $V_p$  – расчётная скорость ветра,  $\lambda_1$  – рекомендованная гибкость первого участка при скорости ветра 29 м/с.

**В четвёртом разделе «Рациональное размещение колец жёсткости по результатам численных исследований для оболочки с дефектами формы»** на основе полученной верифицированной модели были уточнены рекомендуемые гибкости участков и, соответственно, количество колец жёсткости в случае наличия характерного дефекта.

Рассмотрен дефект в виде угловатости монтажного сварного шва резервуаров, монтируемых методом рулонирования (рисунок 6а), и изучено его влияние на устойчивость стенки. Из статистических данных были определены пределы варьирования параметров (рисунок 6б) таких дефектов для каждого из рассматриваемых типоразмеров резервуаров.



а)



б)

Рис. 6. Дефект в виде угловатости вертикального монтажного сварного шва стенки резервуара: а – фото реального дефекта; б – варьируемые параметры дефекта

Далее были сформированы и рассмотрены численные модели резервуаров с такими дефектами, и выполнен анализ влияния параметров дефекта на устойчивость стенки. В результате были определены параметры дефекта -  $V/h=20..60$ , при которых наблюдается снижение устойчивости исследуемого элемента конструкции. Далее проведены численные исследования по рациональному размещению колец с точки зрения обеспечения максимальной устойчивости стенки. Для одного из исследуемых типоразмеров резервуаров результаты расчёта приведены в таблице 3.

Таблица 3

КЗУ стенки при различном размещении колец для ВЦР объёмом 20 тыс. м<sup>3</sup>,  
дефект с размерами ( $B=600$  мм,  $h=30$  мм)

Методика расположения	КЗУ стенки при количестве колец жёсткости ЛИРА-САПР 2015 R4					
	0	1	2	3	4	5
СП (Равный шаг)	1,14	1,83	2,66	3,4	4,3	5,49
СТО, EN, API	1,14	2,06	2,96	3,83	5,77	6,7
Оптимальное размещение для ВЦР без дефектов	1,14	2,21	3,15	4,03	5,77	6,99

В результате было определено, что расположение усиливающих рёбер, исходя из соотношений между гибкостями, полученными для участков стенки оболочки без дефектов, являются наиболее эффективными и в случае наличия угловатости монтажного сварного шва. В развитие установленных закономерностей выполнена верификация зависимости КЗУ от  $\lambda_1$  для рассматриваемого случая (рисунок 7) и проведено уточнение правой границы рекомендуемой гибкости первого участка.

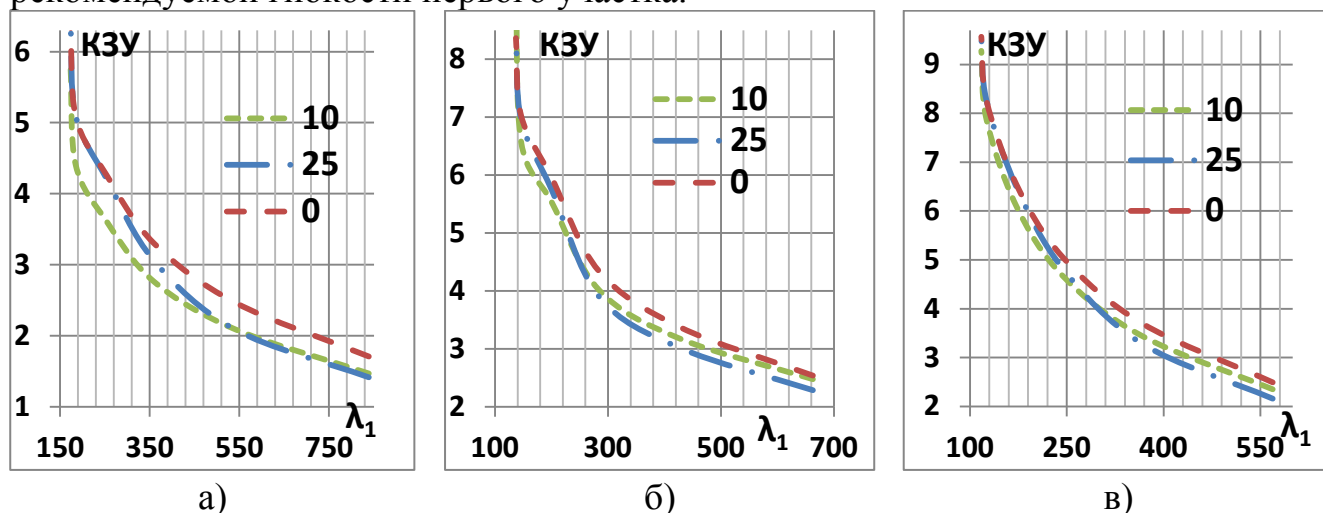


Рис. 7. Изменение КЗУ стенки в зависимости от гибкости первого участка  $\lambda_1$  для резервуаров с наличием либо отсутствием дефекта объёмом: а – 10 тыс. м<sup>3</sup>; б – 20 тыс. м<sup>3</sup>; в – 30 тыс. м<sup>3</sup> (на графиках 0, 10, 25 – глубины углового несовершенства, мм)

Затем был сформирован массив данных, включающих в себя, в том числе, требуемую гибкость первого участка, при обеспечении которой наличие дефекта нивелируется. Эти данные получены путем сравнения КЗУ стенки с дефектом и

без него для случаев наличия различного количества колец жёсткости. На основе указанных данных были построены графики зависимости между  $r/H$  (радиус к высоте оболочки) и  $\lambda_1$  (нивелирующая наличие дефектов с выбранными параметрами) – рисунок 8а.

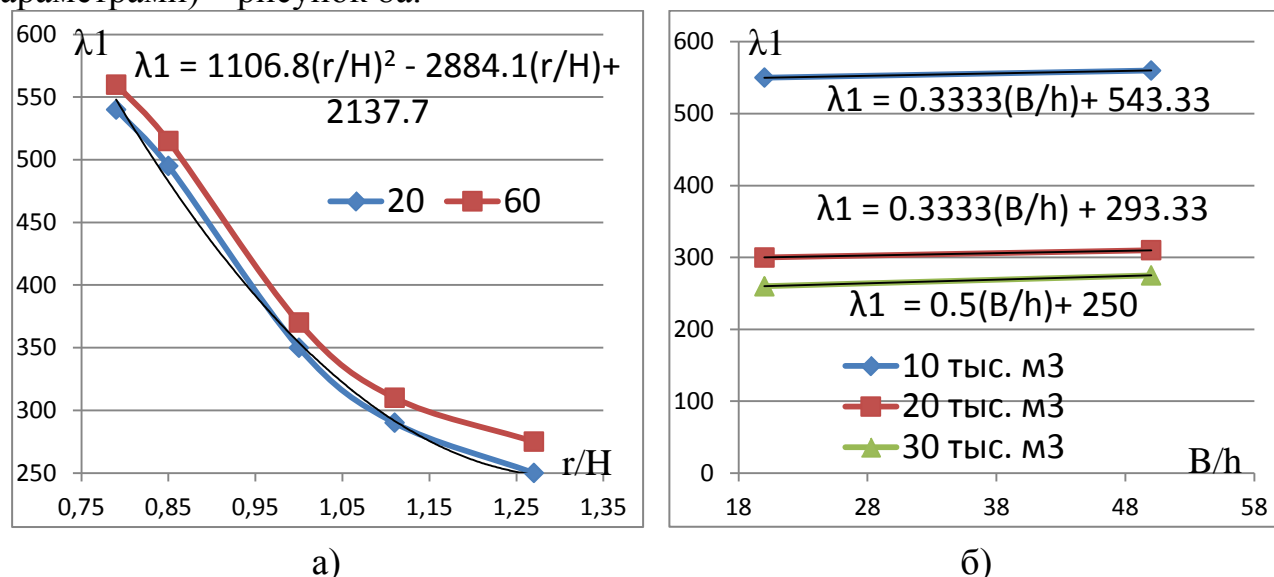


Рис. 8. Требуемая гибкость в случае наличия дефекта в зависимости от параметров: а -  $r/H$  (радиус к высоте оболочки), 20 и 60 – габариты дефекта  $B/h$ ; б -  $B/h$  (ширина к глубине дефекта), 10..30 тыс.  $m^3$  – объём ВЦР для которого построена прямая

На рисунке 8б изображены прямые, характеризующие изменение требуемой гибкости  $\lambda_1$  в зависимости от  $B/h$  (отношение ширины к глубине дефекта) для трёх размеров резервуаров. Это позволяет определить коэффициенты  $k$  (наклона каждой прямой), показывающие интенсивность возрастания требуемой гибкости в зависимости от параметра  $B/h$ . Данным коэффициентам присвоен индекс «деф». Используя полученные данные, была определена аналитическая зависимость (3) для определения правой границы рекомендуемой гибкости в зависимости от габаритов резервуара и параметров дефекта.

$$\lambda_{1(ДЕФ)} = 1106.8 \left( \frac{r}{H} \right)^2 - 2884.1 \left( \frac{r}{H} \right) + 2137.7 + k_{ДЕФ} \left( \frac{B}{h} - 20 \right), \quad (3)$$

где:  $k_{ДЕФ}$  - при  $r/H=0,79..1,11$  равно 0,3; при  $r/H=1,27$  равно 0,5;  $B$  и  $h$  – параметры дефекта.

**Исходя из полученных данных, величину  $\lambda_1$  для оболочки с дефектом в виде угловатости сварного шва следует принимать:**

- 1) для резервуаров с отношением радиуса к высоте стенки с  $r/H=0,79$ , гибкость  $\lambda_1=540.. \lambda_{1(ДЕФ)}$ ;
- 2) для резервуаров с  $r/H=1,11$ , гибкость  $\lambda_1=280.. \lambda_{1(ДЕФ)}$ ;
- 3) для резервуаров с  $r/H=1,27$ , гибкость  $\lambda_1=245.. \lambda_{1(ДЕФ)}$

**В пятом разделе «Рекомендации по уточнению методики размещения колец жёсткости» приводится алгоритм расстановки колец жёсткости при**

расчёте стенки резервуара на устойчивость и обосновываются рекомендуемые поправочные коэффициенты к аналитическим выражениям для расчёта кольцевых критических напряжений потери устойчивости, используемым в нормативных документах.

Принципиальная последовательность назначения размещения КЖ следующая:

1) Определяется гибкость всей стенки по формуле:

$$\lambda_0 = H^2 \div \sum_{i=1}^n t_i h_i \quad (4)$$

где  $H$  – высота всей стенки ВЦР,  $t_i$  – толщина  $i$ -го пояса,  $h_i$  – высота  $i$ -го пояса,  $n$  – количество поясов

2) В зависимости от габаритов резервуара, при наличии либо отсутствии дефекта, выбирается рекомендуемый диапазон гибкостей первого участка;

3) Для резервуара рассматриваемых габаритов определяется подходящий диапазон гибкостей первого участка; определяется ориентировочное требуемое количество колец по формуле:

$$n = \lambda_0 / \lambda_1 \quad (5)$$

4) Определяется точное требуемое количество колец  $n^*$ :

- если  $n < 1.5$ , требуемое количество колец считается равным единице.

- если  $n \geq 1.5$ , точное количество колец определяется по формуле 6:

$$n^* = \log_b \left( 1 - \frac{\left( \frac{\lambda_0 k}{\lambda_{1y} a} - 1 - \frac{1}{a} \right) (1 - b)}{b} \right) \quad (6)$$

где  $\lambda_{1y}$  – уточнённая гибкость 1-го участка стенки;  $\lambda_0$  – гибкость всей стенки;  $a, b, k$  – см. прил. I.

5) Вычисляется требуемая гибкость каждого участка из отношений 7-9:

- если  $n=1$ :  $\lambda_2 = \lambda_0 / 0,75$  (7)

- если  $n > 1$ :  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,85$  (8)

$\lambda_i / \lambda_{i+1} = 0,8$  (9)

6) Вычисляется требуемая высота размещения колец, обеспечивающая значения гибкостей, максимально близкое к требуемым. Сложность последнего пункта состоит в том, что для его решения приходится пользоваться методом подбора. Поэтому для автоматизации этого процесса была написана специальная компьютерная программа (упрощённая блок-схема изображена на рисунке 9). Основной особенностью алгоритма является минимизация невязки по методу ограниченной оптимизации линейным приближением. Код реализован на программном языке Python.

Учитывая, что реализация предлагаемой методики рационального расположения горизонтальных кольцевых ребер жесткости позволяет не только обеспечить снижение металлоемкости конструкции, но одновременно повысить величину критических кольцевых напряжений, то при использовании разработанной методики размещения колец это позволяет ввести уточняющий

повышающий коэффициент к формулам для определения кольцевых критических напряжений, приведенным в нормативных документах СТО СА 03-002-2009 и СП16.13330.2017, при сохранении используемого в нормах уровня КЗУ.

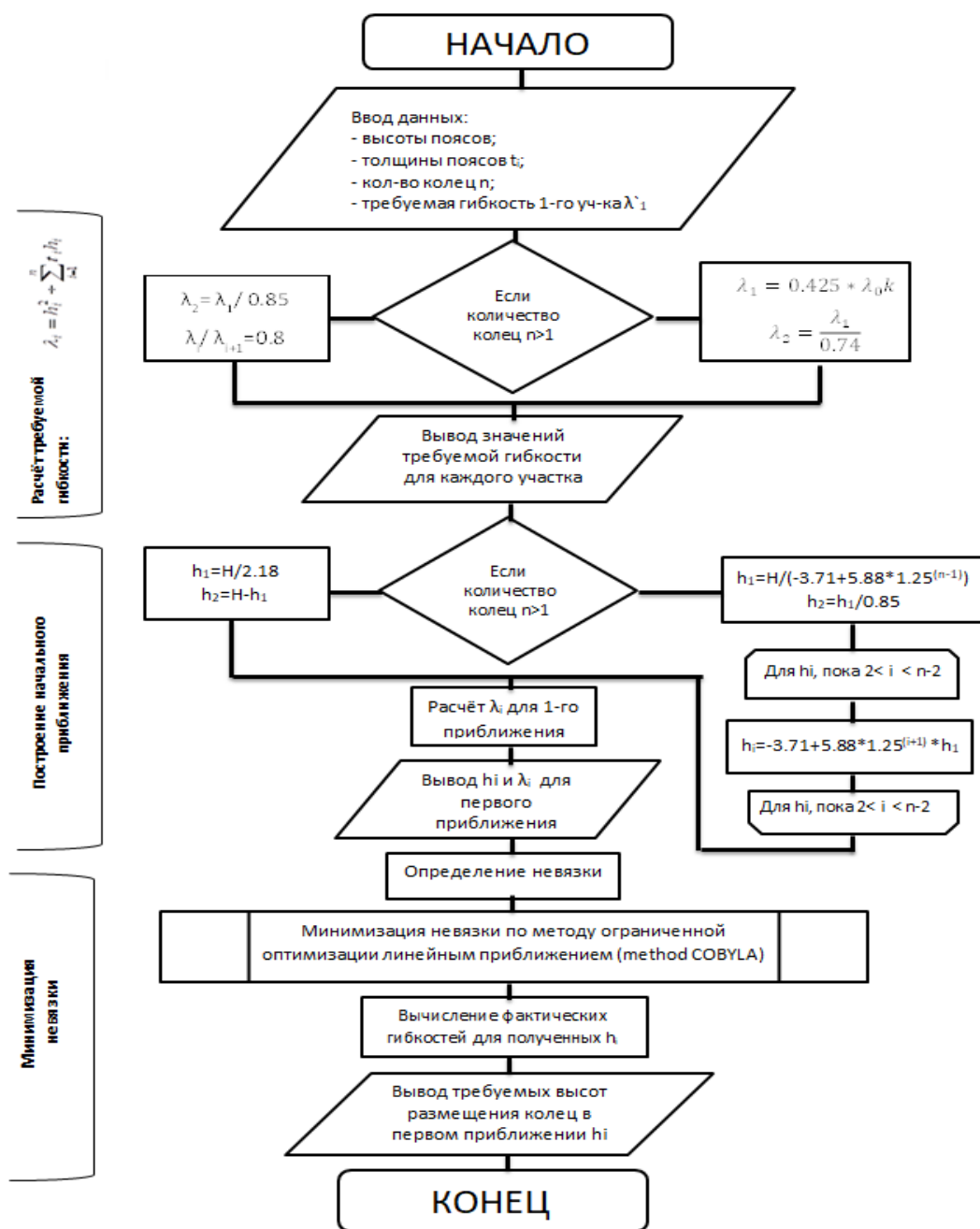


Рис. 9. Блок-схема программы для автоматизации методики размещения кольцевых рёбер жёсткости на стенках ВЦР

С этой целью выполнены аналитические и численные расчёты КЗУ при размещении от 0 до 5 КЖ и проведено их сравнение. Однако, поскольку в аналитических формулах заложены определенные коэффициенты надежности, то сравниваются не сами значения КЗУ, а их увеличение по отношению к первоначальному (через коэффициенты приращения). Коэффициент приращения определялся как отношение  $i$ -го КЗУ к нулевому, где  $i$  - кол-во КЖ.

Результаты исследований приведены в таблицах 4 – 7, где приведено сравнение приращений КЗУ для ВЦР с наиболее невыгодными параметрами

рассматриваемого дефекта и без него для двух нормативных документов. В таблицах 4-7: К(1) – коэффициент приращения КЗУ при расчёте по аналитической зависимости нормативных документов; К(2) – коэффициент приращения КЗУ, определяемый расчётом при помощи комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4.

Таблица 4.

Отношение К(2) / К(1) (без дефекта) для норм СП16.13330.2017

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.06	1.07	1.08	1.12	1.19
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.05	1.08	1.10	1.10	1.05
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.40	1.45	1.31	1.48	1.62

Таблица 5.

Отношение К(2) / К(1) (наличие дефекта) для норм СП16.13330.2017

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.05	1.05	1.07	1.09	1.19
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.05	1.05	1.06	1.07	1.04
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.38	1.41	1.26	1.44	1.61

Таблица 6.

Отношение К(2) / К(1) (без дефекта) для норм СТО СА 03-002-2009

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.05	1.06	1.08	1.10	1.09
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.05	1.08	1.10	1.12	1.07
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.13	1.16	1.16	1.26	1.30

Таблица 7.

Отношение К(2) / К(1) (наличие дефекта) для СТО СА 03-002-2009

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.04	1.04	1.06	1.07	1.08
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.04	1.05	1.05	1.08	1.07
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.11	1.13	1.12	1.23	1.27

В итоге в качестве поправочного коэффициента предлагается взять минимальное значение приращения. Следовательно, при расположении колец по приведенной методике, к аналитической формуле для определения кольцевых критических напряжений, приведенной в СТО СА 03-002-2009, допустимо ввести повышающий коэффициент:

- 1.04 (при наличии рассмотренного дефекта);
- 1.05 (без дефекта).

Для определения кольцевых критических напряжений по формуле, приведенной в СП16.13330.2017, допустимо ввести повышающий коэффициент:

- 1.05 (при наличии рассмотренного дефекта);
- 1.07 (без дефекта).

## ВЫВОДЫ

1. Достигнута основная цель исследований - разработаны рекомендации по уточнению методики проектирования резервуаров больших объемов со стенкой переменной толщины в части рационального обеспечения устойчивости их стенок при помощи кольцевых рёбер жёсткости.

2. На основании проведенного критического анализа установлено, что при нормировании значений критических кольцевых напряжений в недостаточной степени учтены:

- влияние изменения толщины стенки;
- фактическая неравномерность распределения ветровой нагрузки по поверхности стенки резервуара;
- отсутствие учета критерия металлоемкости стенки при назначении рационального расположения колец жесткости.

3. Для разработанной в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 конечно-элементной модели резервуара для проведения теоретических исследований потери устойчивости оболочки, подкреплённой кольцами жёсткости от действия ветра и вакуума, выполнена экспериментальная верификация расчетной модели, результаты которой позволили подтвердить ее корректность и возможность использования при проведении дальнейших численных исследований.

4. По результатам выполненных исследований для вновь проектируемых резервуаров объёмами 10-30 тыс. м<sup>3</sup> со стенкой переменной толщины с идеальной геометрией установлены зависимости, позволяющие выполнить рациональную расстановку колец жесткости, при одновременном увеличении КЗУ по сравнению с рекомендациями действующих нормативных документов на 4-6%:

- для случая размещения одного КЖ:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,74$ ;
- для случая размещения двух и более КЖ:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,85$  и  $\lambda_i / \lambda_{i+1} = 0,8$ ,

где: для ВЦР с отношением радиуса к высоте стенки с  $r/H = 0,79$ , гибкость  $\lambda_1 = 540..570$ ; при  $r/H = 1,11$ ,  $\lambda_1 = 280..330$ ; при  $r/H = 1,27$ ,  $\lambda_1 = 245..270$ .

5. Установлены граничные параметры дефекта угловатости вертикального сварного шва, при которых наблюдается максимальное снижение устойчивости стенки, на которую воздействует поперечная нагрузка (ветер и вакуум). Для зависимостей, полученных для оболочки с идеальной геометрией, разработана система корректирующих параметров ( $\lambda_{1(ДЕФ)}$ ,  $k_{ДЕФ}$ ), позволяющих учесть влияние параметров дефекта на величину критических напряжений устойчивости.

6. Предложена уточненная методика размещения колец жесткости по высоте стенки ВЦР, учитывающая в отличие от ранее разработанных, влияние изменения толщины стенки, фактическую неравномерность распределения ветровой нагрузки по поверхности стенки резервуара, и обеспечивающая максимальные значения коэффициента запаса устойчивости при одновременном снижении металлоемкости стенки.

7. На основе проведенных исследований полученных зависимостей предложен повышающий коэффициент для вычисления значений кольцевых критических напряжений по нормам СТО СА 03-002-2009 и СП16.13330.2017, при использовании методики размещения колец приведенной в данной работе.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### - публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Цепляев М.Н. Моделирование реальной эпюры ветрового давления на цилиндрический резервуар в среде SCAD [Текст] // Металлические конструкции. - 2016. – Т.22 - №4. С. 183-192. Включено в РИНЦ.

2. Мущанов В.Ф. Сравнительный анализ эффективности конструктивных и расчетных методов обеспечения устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / В.Ф. Мущанов, **М.Н. Цепляев** // Металлические конструкции. – Макеевка: ДонНАСА. – 2017. № 3 (23) – С. 123-137. Включено в РИНЦ. *(Выполнен анализ методик расстановки КЖ).*

3. Мущанов В.Ф. Анализ численных и аналитических значений коэффициента запаса устойчивости стенки резервуара [Текст] / В.Ф. Мущанов, **М.Н. Цепляев** // Вестник ДонНАСА. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий: сборник научных трудов. – Вып. 2018-3(131). - С. 105-115. Включено в РИНЦ. *(Проведена верификация численной модели резервуара для расчётов на устойчивость)*

4. Зубенко А.В. Ветровая нагрузка на вертикальный цилиндрический резервуар [Текст] / А.В. Зубенко, Д.И. Роменский, В.Ф. Мущанов, **М.Н. Цепляев**, Р.Н. Степанов // Интернет журнал «Наукоеведение». - 2017. - Т.9 - №6. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/99TVN617.pdf>. Включено в РИНЦ. *(Проведён критический анализа методик по сбору ветровой нагрузки, согласно различных нормативных документов).*

5. Мущанов В.Ф. Напряжения в кровле резервуара, состоящего в группе, при действии ветра [Текст] / А.В. Зубенко, В.Ф. Мущанов, **М.Н. Цепляев** // Строительство уникальных зданий и сооружений. - 2018. - № 5 (68). - С. 36-51. Включено в РИНЦ. *(Выполнено моделирование ветровой нагрузки и проведена оценка напряжённно-деформированного состояния конструкций кровли ВЦР)*

6. Mushchanov V.P. The stress state of a tank shell in the group under wind load [Текст] / **M.N. Tsepliaev**, A.V. Zubenko, V.P. Mushchanov // Инженерно-строительный журнал. - 2018. - № 7 (83). - С. 49-62. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/7\(83\)/maket83.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2018/7(83)/maket83.pdf). Включено в Scopus, Web of science, РИНЦ. *(Выполнено моделирование ветровой нагрузки и проведена оценка напряжённно-деформированного состояния конструкций стенки ВЦР).*

7. Мущанов В.Ф. Обеспечение устойчивости стенок резервуаров на основе рационального расположения колец жёсткости [Текст] / В.Ф. Мущанов, **М.Н. Цепляев** // Строительство уникальных зданий и сооружений. - 2018. - № 9 (72). - С. 58-73. Включено в РИНЦ. *(Определено рациональное количество колец для резервуаров различных объёмов).*

### - публикации по материалам конференций:

8. Мущанов В.Ф. Уточнение НДС стенки резервуара при объёмном моделировании колец жесткости жёсткости [Текст] / В.Ф. Мущанов, **М.Н. Цепляев** // Материалы международной научно-практической конференции:



«Архитектура и искусство: от теории к практике». (Ростов-на-Дону, 24-27 апреля 2018 г.). - Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2018. – Т.1. - С. 76-88. *(Проведена оценка влияния жёсткости кольца на напряжённно-деформированное состояние цилиндрической стенки резервуара).*

9. Мущанов В.Ф. Уточненные подходы к расчету и проектированию вертикальных цилиндрических резервуаров, эксплуатируемых в составе группы [Текст] / А.В. Зубенко, В.Ф. Мущанов, **М.Н. Цепляев** // Научные технологии и инновации: эл. сб. докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. (Белгород, 29 апреля 2019 г.). – Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. – Ч.2. - С. 80-85. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://conf.bstu.ru/shared/attachments/200934>. *(Определены зависимости для оптимального расположения колец жёсткости)*

## АННОТАЦИЯ

**Цепляев Максим Николаевич. Обеспечение устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров на основе рационального расположения колец жесткости.** – Рукопись.

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». – г. Макеевка, 2019 г.

Диссертация посвящена разработке теоретического и экспериментального обоснования обеспечения устойчивости стенки резервуаров больших объемов на основе рациональной расстановки колец жесткости исходя из условий обеспечения максимальной устойчивости и минимального расхода стали с учётом реальной эпюры ветрового давления.

Во введении обосновывается актуальность и общая характеристика работы. Определена цель, задачи исследований, дана характеристика объекта и предмета исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость результатов полученных в диссертационной работе.

В первом разделе рассматривается состояние вопроса. Рассмотрены различные случаи аварий резервуаров. Излагается систематизированная информация об основных исторических этапах развития теории расчёта тонкостенных оболочек в части обеспечения их устойчивости. Определены предпосылки и вся цепочка эволюции взглядов и методов по использованию колец жёсткости в качестве усиливающих элементов для конструкций ВЦР.

Во втором разделе описана методика и результаты экспериментальной верификации численной модели резервуара.

В третьем и четвертом разделах на основе полученной верифицированной модели было определено наилучшее размещение колец жёсткости, с точки зрения обеспечения устойчивости, а также определено их рациональное количество для различных ВЦР. Рассматривались случаи идеализированной оболочки и имеющий характерный дефект.

В пятом разделе приводится алгоритм расстановки колец жёсткости при расчёте на устойчивость и обосновываются рекомендуемые поправочные коэффициенты к аналитическим нормативным формулам расчёта кольцевых критических напряжений потери устойчивости.

**Ключевые слова:** вертикальный цилиндрический резервуар, критические напряжения, метод конечных элементов, цилиндрическая оболочка, кольца жёсткости.

## ABSTRACT

Tseplyaev Maxim. **Ensuring the stability of the walls of vertical cylindrical tanks based on the rational arrangement of stiffening rings.** - The 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, Makeevka, 2019.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences. 05.23.01 - Building structures, buildings and structures. - State educational institution of higher professional education "Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture". - Makeevka, 2019

The thesis is devoted to the development of a theoretical and experimental justification for ensuring the stability of the wall of reservoirs of large volumes on the basis of a rational arrangement of stiffening rings based on the conditions for ensuring maximum stability and minimum consumption of steel, taking into account the real diagram of wind pressure.

The introduction substantiates the relevance and outlines the general characteristics of the work. The goal and objectives of the research are determined, the characteristic of the object and subject of research is given, the scientific novelty and practical results obtained in the dissertation are formulated.

The first section discusses the status of the issue. Various cases of accidents in of the tank are considered. Systematic information on the main historical stages in the development of the theory of calculating thin-walled shells with regard to ensuring their stability is presented. The prerequisites and the entire evolution chain of views and methods for the use of stiffening rings as reinforcing elements for the construction of steel vertical cylindrical tanks are determined.

The second section describes the methodology and results of experimental verification of the numerical model of the reservoir.

In the third and fourth sections, was determined the best placement of stiffening rings from the point of view of ensuring stability on the basis of the obtained verified model. As well was determined rational number placement of stiffening rings for the considered tank types. Cases of an idealized shell and having a typical defect were considered

The fifth section provides an algorithm for arranging stiffness rings when calculating stability and determined the recommended coefficients for analytical normative formulas for calculating circumferential critical buckling stresses.

**Keywords:** vertical cylindrical tank; critical stress; finite element method; cylindrical shell; stiffening rings