

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

*На правах рукописи*



**Цепляев Максим Николаевич**

УДК: 624.074.433+624.042.12

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


05.23.01- Строительные конструкции, здания и сооружения

**Диссертация**  
на соискание ученой степени кандидата  
технических наук



Научный руководитель:  
**Мушанов Владимир Филиппович**  
доктор технических наук, профессор

Идентичность всех экземпляров  
Диссертации подтверждаю:  
Учёный секретарь  
Диссертационного совета  
Д 01.006.02



**Т.В. Радионов**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА КОНСТРУКЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ КОЛЬЦАМИ ЖЁСТКОСТИ.....	16
1.1. Классификация факторов, влияющих на прочность и устойчивость стенок вертикальных цилиндрических резервуаров и их влияние на надежность элемента .....	16
1.1.1. Конструктивное решение.....	17
1.1.2. Геометрические несовершенства и дефекты конструкции .....	18
1.1.3. Нагрузки и воздействия, а также факторы, возникающие во время эксплуатации резервуара .....	19
1.1.4. Отказы конструкции вследствие действия ветровой нагрузки .....	20
1.2. Теоретические предпосылки усиления резервуаров кольцами жёсткости .....	23
1.3. Нормативные методики проектирования резервуаров с кольцами жёсткости	28
1.3.1. Европейские кодексы .....	29
1.3.2. Нормативные документы Российской Федерации .....	31
1.3.3. Нормативные документы Украины .....	33
1.3.4. Нормативные документы США .....	33
1.4. Обзор публикаций и литературы по вопросу проектирования резервуаров с кольцами жёсткости .....	37
1.5. Выводы по первой главе. Формулировка цели и задач исследований .....	45
РАЗДЕЛ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ .....	47
2.1. Общая характеристика методов исследования .....	47
2.2. Экспериментальная верификация численной модели .....	49
2.2.1. Цель и задачи экспериментальных исследований .....	50
2.2.2. Проводимые испытания. Общая схема испытательных установок .....	50
2.2.3. Подбор необходимого оборудования .....	59

2.4. Обработка результатов эксперимента .....	65
2.4.1. Результаты испытания модели №1 .....	69
2.4.2. Результаты испытания модели №2 .....	73
2.4.3. Результаты испытания модели №3 .....	76
2.4.4. Анализ характерных закономерностей результатов испытаний .....	80
2.5. Создание конечно-элементной модели на основе результатов экспериментальной верификации .....	83
2.5.1. Структурные составляющие принятой конечно-элементной модели .....	85
2.5.2. Моделирование рассматриваемого дефекта .....	87
2.5.3. Моделирование расчётного сочетания нагрузок .....	88
2.6. Выводы по второй главе .....	89
РАЗДЕЛ 3. РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ КОЛЕЦ ЖЁСТКОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ .....	91
3.1. Локальные напряжения, возникающие в зоне размещения колец жесткости .	91
3.1.1. Установление закономерностей величины и распределения на основе численного эксперимента в зависимости от жесткости кольца .....	91
3.1.2. Анализ прочности зоны кольца при действии гидростатической нагрузки .....	97
3.1.3. Вывод о необходимости учёта возникающих напряжений в зоне колец жёсткости .....	98
3.2. Устойчивость стенки при расположении колец жёсткости по существующим методикам и типовым проектам .....	99
3.2.1. Определение параметра $\lambda$ .....	99
3.2.2. Устойчивость стенки при расположении колец жесткости по нормативным методикам и типовому проекту. Выбор наиболее рационального варианта .....	100
3.3. Устойчивость стенки при альтернативных вариантах размещения кольцевых рёбер жёсткости .....	102
3.3.1. Обеспечение максимальной устойчивости стенки резервуара при размещении одного кольца жёсткости .....	102

3.3.2. Обеспечение максимальной устойчивости стенки резервуара при размещении двух колец жёсткости .....	106
3.3.3. Обеспечение максимальной устойчивости стенки резервуара при размещении трёх колец жёсткости .....	109
3.4. Определение рационального количества колец жёсткости .....	110
3.4.1. Рациональное количество колец жёсткости исходя из условия обеспечения максимального коэффициента запаса устойчивости .....	112
3.4.2. Рациональное количество колец жёсткости исходя из условия обеспечения минимальной металлоёмкости стенки .....	115
3.5. Выводы по третьей главе .....	118
<b>РАЗДЕЛ 4. РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ КОЛЕЦ ЖЁСТКОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОБОЛОЧКИ С ДЕФЕКТАМИ ФОРМЫ .....</b>	<b>120</b>
4.1. Установление закономерностей изменения КЗУ стенки на основе численного эксперимента в зависимости от ориентации и габаритов дефекта .....	121
4.1.1. Устойчивость стенки резервуара в зависимости от ориентации дефекта .....	121
4.1.2. Выбор наиболее невыгодных параметров дефекта для устойчивости стенки .....	123
4.2. Определение рационального количества колец жёсткости в случае наличия дефекта .....	124
4.2.1. Расположение колец жёсткости, обеспечивающее максимальный КЗУ в случае наличия рассматриваемого дефекта .....	124
4.2.2. Рациональное количество колец жёсткости при наличии рассматриваемого дефекта .....	125
4.2.3. Определение системы корректирующих коэффициентов учёта наличия дефекта стенки .....	127
4.3. Выводы по четвёртой главе .....	129
<b>РАЗДЕЛ 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УТОЧНЕНИЮ МЕТОДИКИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОЛЕЦ ЖЁСТКОСТИ .....</b>	<b>130</b>

5.1. Рекомендации по уточнению требуемого шага колец для вновь проектируемых резервуаров .....	130
5.2. Рекомендации по уточнению требуемого шага колец для эксплуатируемых резервуаров в случае наличия дефекта угловатости вертикального монтажного сварного шва .....	131
5.3. Определение коэффициентов к нормативным выражениям для определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости .....	132
5.3.1. Поправочные коэффициенты в случае отсутствия дефекта .....	133
5.3.2. Поправочные коэффициенты в случае наличия дефекта.....	134
5.4. Уточнённая методика размещения колец жёсткости .....	135
5.5. Выводы по пятой главе .....	137
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....	138
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А (методика задания ветровой нагрузки через текстовый файл в программе ЛИРА-САПР 2015 R4).....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Расчёт КЗУ стенки для различных резервуаров при различном положении колец жёсткости) .....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ В (Вычисление коэффициентов приращения для КЗУ при их вычислении аналитически и численно) .....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (табличные значения для применения методики рационального расположения колец жесткости).....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (блок схема и код программы для автоматизации методики размещения) .....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Е (Справка о внедрении результатов диссертационной работы)..	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (Справка о внедрении результатов диссертационной работы).	165

## ВВЕДЕНИЕ

Стальные вертикальные цилиндрические резервуары – это надземные сооружения, предназначенные для приёма, хранения, подготовки и выдачи жидких продуктов. Чаще всего такие конструкции применяются для хранения нефти и нефтепродуктов, пожарной или питьевой воды, минеральных удобрений. Соответственно резервуары делят по назначению на: сырьевые, технологические и товарные. Внутренний объём используемых на сегодняшний день резервуаров составляет от 25 до 120000 м<sup>3</sup>. Также есть несколько основных типов, отличающихся методом изготовления и монтажа цилиндрической стенки: рулонированные, листовые, комбинированные. Все перечисленные типы резервуаров получили широкое распространение. Есть целый ряд других критериев, по которым классифицируются типы резервуаров, но все они существенно не меняют принципы проектирования таких конструкций.

Часто резервуары располагаются группами, образуя «резервуарные парки». Поскольку в случае аварии на таких объектах окружающей среде, имуществу и здоровью людей может быть нанесён значительный ущерб, резервуары относятся к сооружениям с высоким уровнем ответственности.

Основным элементом вертикальных стальных резервуаров является цилиндрическая стенка, как правило, состоящая из поясов различной толщины. По своим параметрам стенку относят к тонкостенным безмоментным оболочкам при конструктивных расчётах.

**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 [42, 53]. Кроме того, увеличивающаяся потребность в нефти и нефтепродуктах дополнительно обусловлена стремительным развитием химической отрасли, особенно в части производства полимеров и пластиков [79]. Одним из основных технологических сооружений нефтехимической

промышленности для хранения жидкостей являются вертикальные стальные цилиндрические резервуары больших объёмов. Кроме того, использование конструкций такого типа 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 [52]. 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% [1, 11, 23, 29, 80]). И хотя их техническое состояние иногда позволяет продолжать эксплуатацию, возросшие требования к восприятию нагрузок [59, 66] не позволяют продлить эксплуатацию данных конструкций без усиления. Все указанные обстоятельства обуславливают все возрастающую потребность в строительстве новых и обслуживании существующих вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР).

История применения резервуаров большого объёма насчитывает более 130 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 10% всех случаев аварийного отказа конструкции [80]. Повреждённые таким образом конструкции восстановлению не подлежат, что ведёт к ущербу, равному стоимости демонтажа и возведения нового сооружения. Для обеспечения устойчивости стенки резервуара существуют два принципиальных подхода: подбор достаточной толщины стенки либо установка элементов усиления на стенку резервуара.

Отсутствуют комплексные исследования сравнительной материалоемкости конструкции в случае применения обоих методов. Также следует учитывать, что при капитальном ремонте имеется возможность применения только второго подхода.

Существуют различные варианты внешнего усиления. Так, в работе [115] рассматривается использование технологической лестничной клетки для обслуживания кровли. Однако чаще других в качестве усиливающих элементов стенок вертикальных цилиндрических резервуаров применяются горизонтальные кольца жёсткости. При этом 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 вопрос совершенствования и уточнения существующих методик по проектированию усиления стенок резервуаров горизонтальными кольцами жёсткости.

**Степень разработанности темы исследования.** Анализ работы стенки резервуара, усиленной кольцами жесткости, встречается во многих литературных источниках и публикациях, которые будут рассмотрены в разделе 1. Все авторы отмечают эффективность применения горизонтальных колец жёсткости для повышения устойчивости стенки, находящейся под внешним давлением (под внешним давлением, чаще всего подразумевается ветровая нагрузка и вакуум). В частности отмечено, что в зависимости от расположения и сечения постановка даже одного кольца повышает устойчивость от действия кольцевых напряжений не менее чем в 1.5 раза.

Современные нормативные документы также оговаривают возможность усиления стенок вертикальных цилиндрических резервуаров кольцевыми рёбрами жёсткости. Однако методики или рекомендации по их размещению приведены лишь в некоторых. При этом все существующие методики размещения колец основываются на использовании формулы Мизеса-Папковича для определения кольцевых критических напряжений (данная формула впервые была опубликована в 1933 г., далее она была дополнена и уточнена другими исследователями). Основное уточнение касается возможности учёта переменной толщины цилиндрической стенки резервуаров. Методика, приведенная в Еврокоде, предлагает в ограниченной степени учитывать также осевую нагрузку на стенку резервуара при назначении шага кольцевых рёбер жёсткости. Несмотря на некоторые различия, суть методики, вытекающей из формулы Мизеса-Папковича, состоит в выражении через



полученное значение кольцевой критической нагрузки потери устойчивости расстояния между кольцевыми рёбрами жёсткости, при котором потеря устойчивости гарантированно не произойдёт. При этом сама формула была получена для случая действия равномерного внешнего давления на стенку резервуара, что не соответствует реальному распределению ветрового потока на цилиндрическую в плане конструкцию.

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 без увеличения (или даже с уменьшением!) металлоёмкости конструкций резервуаров. 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 уточнении 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 стенки ВЦР в 4-6%, обусловленные использованием разработанной методики рациональной расстановки колец жесткости, что позволяет уточнить значения величин критических значений кольцевых напряжений в стенке по отношению к предусмотренным 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 4-6% 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 корректировочных параметров, позволяющих учесть влияние параметров дефекта на величину критических напряжений устойчивости;

- на основании проведенных исследований и полученных зависимостей предложен повышающий коэффициент для аналитического 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;

- 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.** Определение рационального расположения колец жесткости предлагается анализировать на примере вертикальных цилиндрических резервуаров объёмом 10000 – 30000 м<sup>3</sup> со стационарной сферической кровлей, поскольку резервуары такого типа являются широко применяемыми как в мире, так и в странах постсоветского пространства.

Численное моделирование выполнялось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4.

Для создания адекватной численной модели решалась задача экспериментальной верификации результатов расчёта на устойчивость в применяемом расчётном комплексе на трёх характерных моделях резервуаров под действием внешнего давления. Было проведено сравнение исследуемых величин и

формы потери устойчивости цилиндрической оболочки. Экспериментальные напряжения измерялись при помощи тензорезистивного метода, устройством преобразования сигналов тензодатчиков служили шесть модулей ввода MB110-224.4ТД. В конечные величины значения напряжений преобразовывались через компьютерную программу, написанную в оболочке MasterScada.

#### **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 корректировочных 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 аналитического 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.

**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 чего выделен ряд особенностей, требующих уточнения и дальнейшего развития [30, 44, 48];
- разработаны методология и численные модели, позволяющие выполнить исследование устойчивости цилиндрических стенок резервуаров большого объёма

при совместном действии фактического распределения ветрового потока и вакуума [46, 50, 81, 106];

- проведены исследования влияния различных вариантов расположения и поперечного сечения кольцевых рёбер жесткости на напряжённо-деформированное состояние и устойчивость стенок вертикальных цилиндрических резервуаров [47, 49];

- 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 [47, 50].

**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 и материалы исследований докладывались и обсуждались на:

- четырёх научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, 2016-2019 гг.);

- международной научно-практической конференции «Архитектура и искусство: от теории к практике» «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 международными реферативными базами 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.

## РАЗДЕЛ 1

# АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА КОНСТРУКЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ КОЛЬЦАМИ ЖЁСТКОСТИ

### 1.1. Классификация факторов, влияющих на прочность и устойчивость стенок вертикальных цилиндрических резервуаров, и их влияние на надежность элемента.

На сегодняшний день применение вертикальных цилиндрических резервуаров объемом более 100 тыс. м<sup>3</sup> является обычной практикой, однако нарушение целостности такой конструкции может привести к чрезвычайно высокому материальному и экологическому ущербу. Следовательно, постоянно ведётся работа по повышению надежности резервуаров и их оборудования. При этом совершенствующиеся методики расчёта и прогнозирования применимы и к резервуарам меньших объёмов.

В отечественной школе проектирования работы по изучению надёжности резервуаров больших объёмов появились во второй половине XX века. В частности можно отметить работы М.К. Сафаряна, В.Е. Шутова, В.Л. Березина [6, 61, 63]. Общей чертой всех указанных работ является акцент на определяющем влиянии напряженно-деформированного состояния цилиндрической стенки на надёжность конструкции резервуара в целом. В свою очередь, есть несколько основных факторов, влияющих на прочность и устойчивость стенки вертикальных цилиндрических резервуаров:

- конструктивное решение;
- геометрические несовершенства и дефекты конструкции;
- нагрузки и воздействия, а также факторы, возникающие во время эксплуатации резервуара.

Более подробно будет рассмотрено влияние ветровой нагрузка как одной из основных при расчёте резервуара на устойчивость.



### **1.1.1. Конструктивное решение**

#### **1.1.1.1. Наличие зон концентрации напряжений (краевых эффектов).**

Особенностью сварных листовых конструкций является наличие различных сопряжений (стыков), врезок, которые создают зоны концентрации напряжений. Преимущественно учет зон концентрации напряжений необходим при расчете на прочность, однако для определенных случаев краевой эффект может значительно влиять и на устойчивость стенки. В работах [5, 38, 62] отмечены наиболее эффективные конструктивные мероприятия для нивелирования влияния краевого эффекта - плавные изменения формы оболочек, отсутствие резких изменений толщин стенки, а также обоснованный выбор размеров и размещения колец жесткости.

#### **1.1.1.2. Рулонированный либо полистовой конструктив и способ монтажа стенки.**

Основная задача метода рулонирования, который был разработан в СССР, состоит в ускорении сроков возведения ВЦР и в ряде других преимуществ: уменьшение трудоемкости монтажа в 1,5-2 раза, общих затрат на возведение резервуара - на 30%, повышение надежности резервуара за счет применения заводской автоматической сварки стенки [5, 77]. Однако при использовании данного метода возникает множество локальных деформаций, как следствие НДС резервуара становится более сложным и может привести к сверхпроектным напряжениям [63]. Альтернативой является полистовой метод монтажа. В своей работе Л.М. Спириденко [67] отмечает, что его применение в некоторой мере решает проблему локальных напряжений, возникающих в стенке.

#### **1.1.1.3. Тип кровли резервуара.**

Влияние типа кровли является очень существенным, особенно при расчётах на устойчивость. Наличие либо отсутствие стационарной кровли, а также её форма кардинально меняют форму распределения ветрового потока, что может вызывать совершенно разные эффекты в случае потери устойчивости при одинаковой скорости ветра. В свою очередь, важно распределение снегового давления на кровлю. Конструкция кровли определяет также поперечное

сечение верхнего кольца жёсткости, форма и размер которого существенно влияют на краевые эффекты в зоне верхнего уторного узла.

### **1.1.2. Геометрические несовершенства и дефекты конструкции**

#### **1.1.2.1. Геометрические несовершенства**

По результатам обследования авторами [33, 34, 97] состояния стенок вертикальных сварных цилиндрических резервуаров в натурных условиях определено, что, как правило, форма стенки не представляет собой идеальный цилиндр, а имеет множественные начальные отклонения. Такие деформированные участки могут потерять устойчивость, то есть «вышелкнуть» или «хлопнуть» под действием определенных по величине внутренних или внешних нагрузок: изнутри – гидростатического или избыточного давления, а снаружи – вакуума [19].

Несущая способность тонкостенных цилиндрических оболочек при осевом сжатии также существенно зависит от амплитуды начальных несовершенств формы, это подтверждается в работах С.П. Тимошенко, В.А. Тодчука, В.В. Губанова [22, 71, 72]. При этом во многих случаях экспериментальное исследование – единственный способ для выявления действительного характера работы несущих элементов резервуаров и для определения их несущей способности и степени деформации [1, 18, 23].

#### **1.1.2.2. Дефекты сварных швов.**

Согласно различным литературным источникам и нормативным документам эксплуатация резервуаров допускается лишь с малым перечнем возможных дефектов сварных швов, таких как выпуклость сварных швов и подрез основного металла, при этом на величины данных параметров накладываются жесткие ограничения. С другой стороны, рассматривая конструкции резервуаров, смонтированных методом «рулонирования», нельзя не отметить наличия у почти 80% таких конструкций дефекта в виде угловатости вертикального монтажного сварного шва (подробное описание такого дефекта приводится в диссертационных работах А.А. Кулика и П.Ф. Сильницкого [36, 64]). Следовательно, для некоторых дефектов целесообразно разрабатывать методики их учёта в уже существующих

конструкциях резервуаров, что позволит не только получить экономический эффект, но и повысить общую надёжность таких конструкций.

#### 1.1.2.3. Дефекты листового металла.

К таким дефектам можно отнести не соответствующий проектным требованиям химический состав и неплотности. Методики по учету данных дефектов отсутствуют, поскольку применение металла с дефектами считается недопустимым, и при обнаружении указанных дефектов следует заменить участок, на котором обнаружен дефект, либо полностью прекратить эксплуатацию данного резервуара.

### **1.1.3. Нагрузки и воздействия, а также факторы, возникающие во время эксплуатации резервуара**

1.1.3.1. Величина нагрузок и их цикличность, климатические условия, геологические условия.

Нагрузки являются определяющим фактором напряженно-деформированного состояния стенки резервуара. Для многих видов нагрузок расчетные схемы досконально изучены, а некоторые продолжают уточняться, (например, ветровая нагрузка, в части учёта группового расположения объектов). Менее изученными являются проблемы неравномерной осадки основания резервуаров. В этом случае появляется деформация днища, корпуса и кровли, образуются зоны с повышенным напряжением, особенно в узлах сопряжения корпуса с днищем в нижнем уторе и в соединении технологических трубопроводов с корпусом резервуара.

#### 1.1.3.2. Коррозионный износ.

Коррозия является важным фактором, влияющим на НДС резервуара. На сегодняшний момент экономически целесообразных методов полного исключения коррозии в резервуарах не найдено. Достаточным решением являются методики учета коррозионного износа во времени и методики обоснования дальнейшей пригодности конкретных резервуаров для эксплуатации. Подробный разбор норм, а также методика учета коррозии во времени предложена в работе Г.С. Аммосова [4].

### 1.1.3.3. Другие условия эксплуатации резервуара (чрезвычайные ситуации).

Указанные воздействия учитываются вероятностно-статистическими методами для уникальных сооружений с высокой степенью ответственности.

### 1.1.4. Отказы конструкции вследствие действия ветровой нагрузки

Исследованиями причин возникновения аварий резервуаров и анализом их последствий занимались множество авторов, среди которых можно отметить работу В.Е. Евтихина и В.П. Маркелова [26], в которой впервые системно проведено статистическое моделирование отказов. Также, можно отметить работы В.В. Болотина, О.Г. Кондрашовой, А.А. Землянского, Х.М. Ханухова [7, 29, 35, 80], в которых проведен подробный анализ причин аварий ВЦР, определены распространённые дефекты и место их нахождения.

Диаграмма, сформированная по результатам исследований вышеназванных авторов, изображена на рисунке 1.1 и показывает распределение основных причин аварийных отказов конструкций резервуаров, повлекшее за собой разрушение или прекращение возможности эксплуатации.



Рисунок 1.1 Анализ причин аварий ВЦР больших объёмов.

Однако, по данным ЦНИИПСК им. Мельникова, приведенным в [35], регистрируется не более 40 % всех аварий, происходящих с объектами резервуарного хозяйства. Соответственно, аварий, не приводящих к разрушению,

фиксируется ещё меньше, что позволяет сделать предположение, в частности, о большем проценте фактических аварий, вызванных воздействием ветра и вакуума. Это же подтверждается данными, приведенными в работе О.В. Волкова [11] и В.В. Филиппова [78], где по результатам обследования нескольких резервуарных парков существенные нарушения геометрической формы обнаружены в 30 % всех обследуемых конструкций. Больше половины дефектов геометрии составили вмятины и выпучены, вызванные в том числе действием ветра и вакуума.

Повреждения от кольцевых сжимающих нагрузок, в частности от воздействия ветра и вакуума, имеют характерный вид и форму, представляющую округлую одиночную вмятину с высотой менее  $\frac{1}{4}$  высоты цилиндрической стенки резервуара. При этом глубина вмятины в сотни раз превышает толщину оболочки и определяется параметром отношения к радиусу оболочки, не превышающему значения 0,04.

Рассмотрим случаи потери устойчивости стенок резервуаров от действия ветра и вакуума, приведенные в результатах анализа таких случаев различными авторами.

Так, например, в работе Оливара [108] рассмотрен ряд аварий на резервуарах объемами 5000 – 30000 м<sup>3</sup>, относящихся к рассматриваемым. На рисунке 1.2а изображен резервуар с характерной вмятиной, образованной в результате урагана на острове Гуам в 2002 году. Автор отмечает необходимость уточнения имеющихся методик в части обеспечения надёжности конструкции от действия таких нагрузок.

В работе автора по фамилии Sušnik [118] в качестве примера отказа конструкции в виде потери устойчивости приведен случай, изображённый на рисунке 1.2г. Автор рассматривает проектные недостатки и их последствия.

На рисунках 1.2б и 1.2в изображены случаи потери устойчивости тонкостенной оболочки, произошедшие в Пуэрто-Рико в 1998 году и приведённые в работе К. Бургоса [89]. Автор выполняет компьютерное моделирование для получения аналогичного эффекта методом конечных элементов. В результате отмечено, что указанное повреждение действительно вызвано кольцевыми

сжимающими нагрузками, в данном случае от действия ветрового и вакуумметрического давления.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.2. Потеря устойчивости стенки резервуара от действия ветра и вакуума.

Анализируя характер и габариты возникающего повреждения стенки в виде вмятины, авторы Д. Лемак, М. Джаханжири, Х. Маравеас [98, 100, 102] отмечают наличие поперечной вмятины, характерной для потери устойчивости при действии осевой нагрузки возникновения. Однако проведенные самими авторами численные эксперименты и анализ имеющихся натурных исследований указывают на решающее влияние кольцевых сжимающих нагрузок при такого рода повреждениях. Поперечная угловая вмятина образуется уже после (либо в момент) потери устойчивости, однако сама причина образования вмятины - это кольцевые напряжения, вызванные ветром и вакуумом, что также отмечено в работе [99]. В

пользу этого утверждения служит картина распределения ветрового потока на кровлях подобных конструкций. Как правило, сжимающая нагрузка на кровлю резервуара от действия ветра минимальная, либо отсутствует совсем ввиду «отрывающего» характера его воздействия, то есть в стенке под действием ветра возникают растягивающие осевые напряжения. Графическое изображение формы распределения ветрового потока, смоделированной в программе ЛИРА-САПР 2015 г4, для резервуара объёмом 20 тыс. м<sup>3</sup> со сферическим покрытием для двух характерных сечений приведено на рисунках 1.3а и 1.3б.

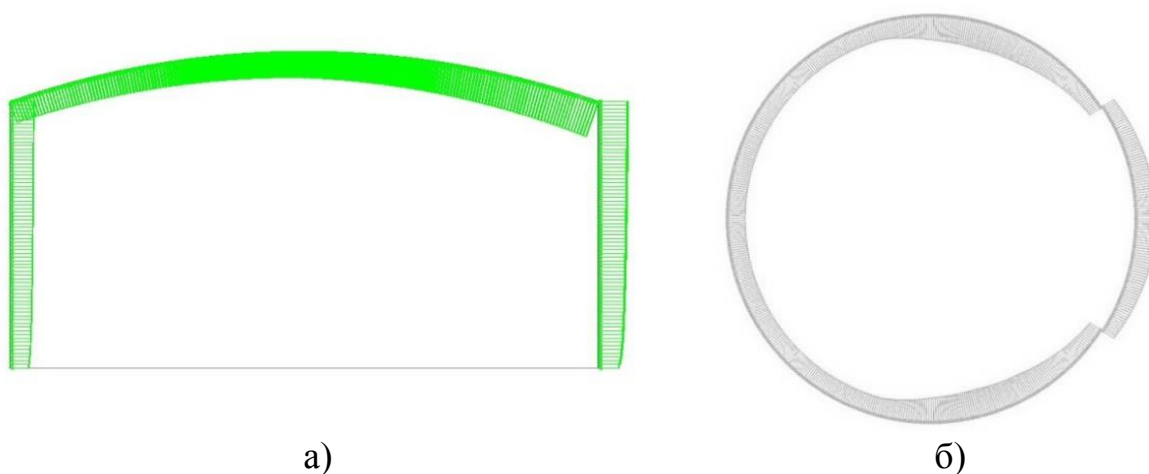


Рисунок 1.3. Ветровая нагрузка в программе ЛИРА-САПР 2015 г4 – ветровая нагрузка по Еврокоду: а - продольный разрез, б – поперечный разрез.

## 1.2. Теоретические предпосылки усиления резервуаров кольцами жёсткости

Достаточно высокая степень опасности таких конструкций, как резервуары, в комплексе с широким их распространением, особенно с началом «нефтяной» эпохи, требовали усовершенствования методик и способов расчёта таких конструкций как с учетом экономичности, так и с целью повышения надёжности. Как уже отмечено ранее, ветровая нагрузка оказывает определяющее воздействие на значение кольцевых напряжений, соответственно, для их нивелирования необходимы рёбра жёсткости, расположенные в кольцевом направлении. Однако такое решение не было очевидным на этапе зарождения теории оболочек. Развитие задачи устойчивости оболочки от действия кольцевых сжимающих напряжений, решение которой дало основу для появления колец жёсткости, приведено ниже.

Рассмотрим простейший вариант задачи устойчивости цилиндрической оболочки при равномерном внешнем давлении. Таковым является вариант бесконечно длинной оболочки, ввиду размера которой характер закрепления концов не влияет на поведение при потере устойчивости – рисунок 1.4. В таком случае оболочка может деформироваться без удлинений и сдвигов, соответственно, можно воспользоваться решением задачи устойчивости кольца под действием равномерного внешнего давления. Общепринятое решение такой задачи было получено ещё в начале прошлого столетия и в различных формулировках приводится в работах многих авторов. Один из вариантов решения приведен ниже.

Для кольца собственные значения интенсивности нагрузки определяются по формуле (1.1):

$$q_n = \frac{(n^2 - 1)EJ}{R^3}, \quad (1.1)$$

где  $n$  – число волн потери устойчивости,  $E$  – модуль упругости,  $J$  – момент инерции,  $R$  – радиус оболочки.

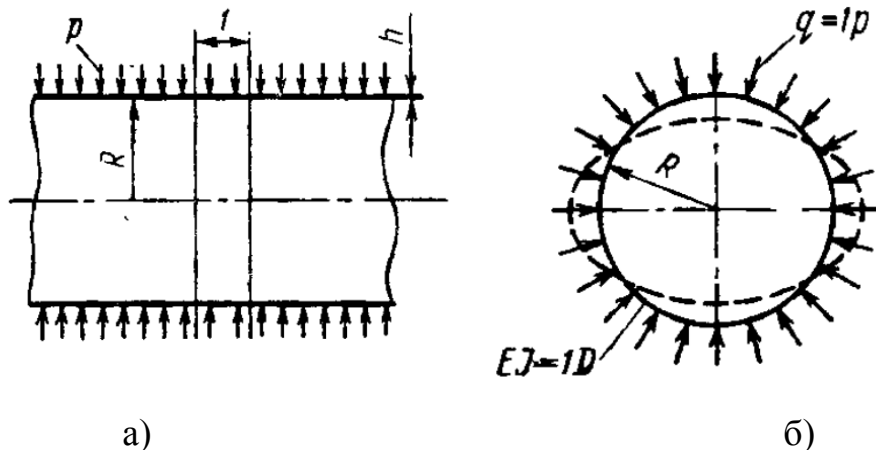


Рисунок 1.4. Расчётная схема бесконечно длинной оболочки под внешним давлением: а - продольный разрез; б – поперечный разрез.

Используя собственные функции, соответствующие значениям нагрузки, и приняв для кольца единичной ширины  $n=2$ , а также  $EJ=D$ , где  $D$  – цилиндрическая жёсткость оболочки, можно определить значение критического внешнего давления ( $p_{кр}$ ) – формула 1.2:



$$p_{кр} = \frac{3D}{R^3} = \frac{Eh^3}{4(1-\mu^2)R^3}, \quad (1.2)$$

где  $E$ ,  $R$  – аналогично ф-ле 1;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $h$  – толщина оболочки;

$D$  – цилиндрическая жёсткость оболочки

В формуле 1.2 отсутствует какая-либо привязка к длине оболочки, соответственно, отсутствует возможность определения необходимости закрепления оболочки, в том числе промежуточного.

Растущее во всем мире количество ВЦР привело еще в конце XIX века к развитию теории оболочек. Безусловно, для решения задачи устойчивости оболочки конечной длины, которыми являются стенки ВЦР, необходимо было ввести в формулу 1.2 учёт граничных условий. Впервые такое решение было получено для шарнирного опирания краёв оболочки длиной  $l$  (рисунок 1.5).

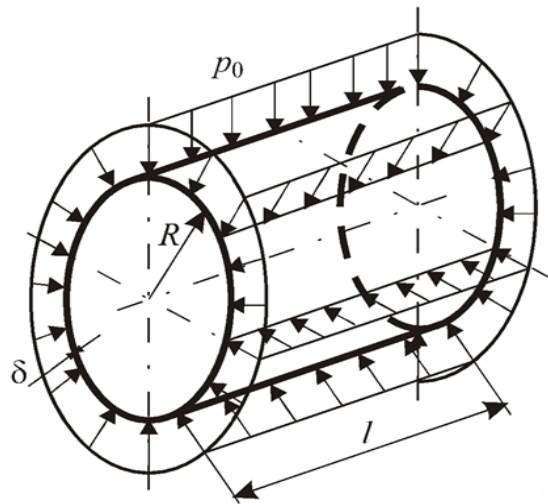


Рисунок 1.5. Расчётная схема оболочки длиной  $l$  под внешним давлением.

Рассмотрен вариант решения, приведенный в работе Н.А. Алфутова «Основы расчёта упругих систем» [2], далее будут приведены его основные пункты. Для принятых граничных условий: при  $x=0$ :  $\omega=0$ ,  $\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} = 0$ ; при  $x=l$ :  $\omega=0$ ,  $\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} = 0$ , также при внешнем давлении  $p_0=\text{const}$ , усилия в оболочке будут равны:  $N_x(0)=0$ ,  $N_{xy}(0)=0$ ,  $N_y(0)=p_0 \cdot R$ . В таком случае уравнение устойчивости принимает вид : [формула 1.3]

$$D \cdot \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \omega + \frac{E \cdot h}{R^2} \cdot \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + q \cdot R \cdot \nabla^2 \nabla^2 \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (1.3)$$

где  $D, E, h, R$  – аналогично формуле 1.2;  $q$  – внешнее давление;  $\omega$  – функция прогиба;  $\nabla$  – определяется по формуле 1.4.

Значение оператора  $\nabla$  в формуле [1.3] определяется по формуле [1.4]:

$$\nabla^2(*) = \frac{\partial^2(*)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(*)}{R^2 \partial \varphi^2} \quad (1.4)$$

где  $R$  – радиус оболочки.

Тогда, если задать прогиб в виде определённого ряда данных и подставив его в уравнение 1.3, можно получить равенство для определения собственных значений наружного давления  $p_0$ . При этом  $p_0$  зависит от числа полуволн в окружном ( $n$ ) и осевом ( $m$ ) направлениях. Случай, когда  $m=1$ , приводит к минимальному значению  $p_0$ , следовательно, он считается основным. Отыскивая минимум полученного равенства при варьировании параметров  $h/R$  и  $R/l$  для оболочек средней длины, которыми являются цилиндрические стенки ВЦР, итоговое выражение примет вид [формула 1.5]:

$$p_{кр} = 0,856 \cdot \frac{E}{(1-\mu^2)} \cdot \frac{R}{l} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^{\frac{5}{2}}, \quad (1.5)$$

где  $\mu, E, h, R$  – аналогично формуле 1.2;  $l$  – длина оболочки.

Полученная формула часто называется «Саутуэлла—Папковича». Множество других исследователей получили близкие либо аналогичные результаты, поэтому часто в литературе встречается формула с названием «Папковича-Мизеса», приводящая почти к идентичному значению критического внешнего кольцевого давления. Основные вариации формулы вызваны отличающимися подходами в учёте различных условий закрепления и способа их математического моделирования. Также многие авторы ставили более широкие задачи, в частности учёт переменной толщины стенки.

Основной вывод из полученного выражения состоит в определении перечня варьируемых параметров  $R, l, h$  при подборе оптимальных значений, которые обеспечат максимальное значение критической нагрузки при потере устойчивости. Однако на практике высота резервуара обосновывается необходимостью максимальной вместимости при минимальной занимаемой площади.

Соответственно, остаётся всего один варьируемый параметр  $h$  – толщина оболочки. Единственной альтернативой является решение использовать промежуточные подкрепления, которые позволяли бы уменьшить расчётную высоту стенки – кольцевые рёбра жёсткости (КЖ).

Причиной редкого использования КЖ в реальных конструкциях уже после появления теоретического обоснования их эффективности служит недостаточная развитость, а до начала XX века и полное отсутствие технологии сварки. Первые цилиндрические резервуары собирались полностью с использованием заклёпочного соединения, соответственно, крепление колец жёсткости по такому методу являлось сложной и трудоёмкой задачей. К моменту активного использования сварочных работ уже была сформирована определённая школа проектирования резервуаров, и предпочтительным вариантом являлось использование стенки достаточной толщины. Тем не менее существенно возрастающие объёмы добычи нефти, общее развитие промышленности и, соответственно, увеличивающаяся потребность резервуаров заставили пересмотреть сформировавшиеся подходы к обеспечению устойчивости цилиндрических стенок резервуаров уже в 50-х годах прошлого столетия. Начался новый этап в развитии резервуаростроения с активным использованием усиливающих элементов стенки, монтируемых с применением сварки.

Сегодня кольцевые рёбра жёсткости применяются в широкой практике проектирования и упоминаются в основных нормативных документах Европы, США и РФ, регламентирующих расчёт листовых конструкций. Примеры использования таких конструкций на практике изображены на рисунках 1.6 а-г. Применяются самые различные формы и типы поперечных сечений. В зарубежной практике набирает популярности использование вместо колец сплошного сечения из листового металла решетчатых ферм жёсткости (рисунок 1.6а). Характер работы таких колец не отличается от других, однако такое решение может оказаться более экономичным, исходя из параметра металлоёмкости. Что касается промежуточных подкреплений самого кольца – эта необходимость вызвана в первую очередь недостаточной надёжностью монтажного сварного шва крепления колец (рис. 1.6б).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.6. ВЦР усиленные кольцевыми ребрами жёсткости: а – решетчатая конструкция КЖ; б-г – КЖ выполненные из листового металла.

При расчётах устойчивость кольца требуется вычислять без учёта усиливающих элементов, поэтому расстановка промежуточных подкреплений регламентируется, как правило, конструктивными требованиями и идёт в запас.

Основным варьируемым параметром является ширина кольца, определяемая из расчёта необходимой жёсткости. Чаще всего применяются КЖ с поперечным сечением в виде уголка, в котором вертикальный участок необходим для обеспечения устойчивости самого кольца.

### **1.3. Нормативные методики проектирования резервуаров с кольцами жёсткости**

В данном параграфе рассмотрены нормативные документы, касающиеся расчёта вертикальных цилиндрических резервуаров больших объёмов, применяемые

в странах Европейского Союза, Российской Федерации, Украины, США. Отмечено всего два принципиальных подхода по обеспечению устойчивости стенок ВЦР от действия кольцевых сжимающих нагрузок: подбор достаточной толщины стенки либо установка кольцевых рёбер жесткости на стенку резервуара. Ниже в развёрнутом виде описаны отличия второго подхода в рассмотренных нормативных документах.

### 1.3.1. Европейские кодексы

#### 1.3.1.1. Общие принципы расчёта на устойчивость (Еврокоды)

Аналитический расчет устойчивости по вычисленным значениям действующих значений напряжений выполняется их сравнением с допустимыми. Основное условие, формулируемое в EN 1993-1-6 [91], представлено в виде формулы 1.6:

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) + \left( \frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_{\theta}} + \left( \frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_{\tau}} \leq 1, \quad (1.6)$$

где  $\sigma_{x,Ed}$ ,  $\sigma_{\theta,Ed}$  и  $\tau_{x\theta,Ed}$  – расчетные значения сжимающих мембранных меридиональных, кольцевых и касательных напряжений в оболочке;  $\sigma_{x,Rd}$ ,  $\sigma_{\theta,Rd}$  и  $\tau_{x\theta,Rd}$  – критические значения составляющих напряжений;  $k_x$ ,  $k_{\theta}$ ,  $k_{\tau}$  и  $k_i$  – параметры взаимодействия при продольном изгибе.

Учитывая, что в приведенной выше формуле в опосредствованном виде учитывается качество сборки и монтажа, допуск некруглости, а также вмятины, то в целом учет геометрических несовершенств при расчете на устойчивость неподкрепленной оболочки достаточно детальный и охватывает основной спектр возможных ситуаций.

#### 1.3.1.2. Учёт наличия КЖ при расчёте на устойчивость (Еврокоды)

При использовании КЖ аналитические выражения приведены в упрощенном виде и не учитывают возможных геометрических несовершенств (учитывают в запас). Поскольку методики расчета резервуара с КЖ и без них в Еврокоде

проработаны неравнозначно, то для резервуара с КЖ принимаются завышенные коэффициенты надежности, что отражается на экономичности конструкции и оценке целесообразности постановки КЖ.

Устойчивость оболочек по EN 1993-1-6 [91] оценивается на основе методики, учитывающей совместное действие поперечных и меридиональных нагрузок. Как возможность повышения кольцевых критических напряжений потери устойчивости оговаривается возможность усиления оболочки кольцами жесткости. Устойчивость подкрепленных оболочек в [91] предлагается оценивать по указаниям раздела 11 EN 1993-4-2 [92].

Суть методики - в определении допустимой высоты стенки, в пределах которой нет необходимости устанавливать кольца жесткости  $H_p$  (формула 1.7), эквивалентной высоты стенки  $H_E$  (формула 1.8).

$$H_p = 0,46 \left( \frac{E}{p_{Ed}} \right) \left( \frac{t_{\min}}{r} \right)^{2,5} rK, \quad (1.7)$$

$$H_E = \sum h \left( \frac{t_{\min}}{t} \right)^{2,5}, \quad (1.8)$$

где  $t_{\min}$  - номинальная толщина самого тонкого пояса;  $t$  - толщина расчетного пояса;  $h$  - высота пояса;  $p_{Ed}$  - расчетное боковое давление (ветер + вакуум);  $K$  - коэффициент, учитывающий осевое давление;  $r$  - радиус оболочки.

#### 1.3.1.3. Требования к расположению КЖ (Еврокоды)

Требуемое количество колец определяется из отношения  $H_E/H_p$ , определённых по формулам 1.1 и 1.2. Располагать кольца жёсткости рекомендуется с равным шагом по высоте  $H_E$ .

#### 1.3.1.4. Конструктивные требования к КЖ (Еврокоды)

Требования к форме поперечного сечения и креплению КЖ отсутствуют. В разделе 11 [92] приводится формула для определения минимально необходимого момента инерции кольца жесткости из условия действия максимально возможного отрицательного давления.

### 1.3.2. Нормативные документы Российской Федерации

Рассмотрены два нормативных документа РФ: обязательный к соблюдению СП 16.13330.2011 [65] и носящий рекомендательный характер документ СТО–СА–03–002–2009 [60].

#### 1.3.2.1. Общие принципы расчёта на устойчивость (нормы РФ)

Формула для расчета на устойчивость замкнутых цилиндрических оболочек вращения, подверженных осевому и кольцевому давлению, общая для документов [49, 50] и имеет следующий вид [формула 1.9]:

$$(\sigma_1 / \sigma_{cr,1} + \sigma_2 / \sigma_{cr,2}) / \gamma_c \leq 1, \quad (1.9)$$

где  $\sigma_1$  – осевые действующие напряжения;  $\sigma_{cr1}$  – осевые критические напряжения;  $\sigma_2$  – меридиональные действующие напряжения;  $\sigma_{cr2}$  – меридиональные критические напряжения;  $\gamma_c=1$  – коэффициент условий работы.

Учет возможных дефектов в СТО–СА–03–002–2009 [60] приводится в виде таблицы с допустимыми параметрами вмятин, хлопунгов и других дефектов, без превышения которых можно использовать приведенную методику расчета на устойчивость. Каким образом поступать при превышении указанных величин в нормах (а это зачастую встречается в практике обследования) и меняются ли возможные пределы допусков при наличии КЖ, не оговаривается.

В свою очередь в СП 16.13330.2011 [65] указаний по учету возможных геометрических отклонений, качества сборки и допуска на коррозию не приводится, хотя опосредствованно этот учет осуществляется с помощью соответствующих значений коэффициентов, используемых при определении величин критических напряжений.

При нормировании ветровой нагрузки по СТО последнее ссылается на СП 20.13330.2011. «Нагрузки ...» [66] и предлагает в качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу п. 3.5.8.5 [60]. В свою очередь в СП указаний по приведению ветровой эпюры к упрощенной не приводится.

#### 1.3.2.2. Учёт наличия КЖ при расчёте на устойчивость (нормы РФ)

В СП 16.13330.2011 [65] критические кольцевые напряжения, для резервуаров рассматриваемых объёмов, определяются по формуле [1.10]:

$$\sigma_{cr,2} = 0,55E(r/l)(t/r)^{3/2} \quad (1.10)$$

где  $l$  – высота стенки резервуара;  $t$  – толщина стенки;  $r$  – радиус оболочки.

Учёт наличия КЖ достигается подстановкой в формулу 1.3 вместо длины оболочки  $l$  расстояния между подкрепляющими рёбрами  $s$ .

В СТО–СА–03–002–2009 [60] критические кольцевые напряжения, для резервуаров рассматриваемых объёмов, определяются по формуле 1.11:

$$\sigma_{cr,2} = 0,55 \frac{r}{H_r} \frac{E}{\sqrt{\delta^3}} \quad (1.11)$$

В формуле 1.11 в качестве расчетной высоты стенки используется редуцированная высота стенки  $H_r$ , определяемая по формуле 1.12, и величина  $\delta$  по формуле 1.13:

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_i \left( \frac{t_{mr}}{t_{ir}} \right)^{2,5}, \quad (1.12)$$

$$\delta = \frac{r}{t_{mr}}, \quad (1.13)$$

где  $t_{mr}$  – расчетная толщина самого тонкого пояса стенки;  $t_{ir}$  – расчетная толщина  $i$ -го пояса стенки;  $h_i$  – высота  $i$ -го пояса стенки;  $r$  – радиус оболочки.

Учёт наличия КЖ достигается подстановкой в формулу 1.6 величины  $H_r$  вычисленной для расстояния между подкрепляющими рёбрами.

### 1.3.2.3. Требования к расположению КЖ (нормы РФ)

В СП 16.13330.2011 [65] требования к расположению колец жесткости и их количеству не приводятся. При этом отмечается возможность использования такого способа усиления.

В СТО–СА–03–002–2009 [60] место установки промежуточного кольца рекомендуется выбирать с учетом обеспечения равенства значений  $H_r$  (формула 1.12) для участков стенки ниже и выше кольца и быть не ближе 150 мм от горизонтального сварного шва во избежание влияния сварочных напряжений.

### 1.3.2.4. Конструктивные требования к КЖ (нормы РФ)



Согласно п. 11.2.4 [60] должно быть обеспечено условие устойчивости КЖ в своей плоскости. Расчетная длина стержня должна приниматься  $l_{ef}=1.8r$  (где  $r$  – радиус оболочки), при этом в сечение ребра следует включать участки оболочки с каждой стороны от оси ребра, а условная гибкость стержня не должна превышать 6.5, что определяет достаточно широкую конструкцию кольца. Других требований не приводится.

Момент сопротивления КЖ должен быть не менее чем (формула 1.14):

$$W_{zi} = \frac{1,4p_{w0} + 1,2p_v}{215R} D^2 H_{r \max} \quad (1.14)$$

где  $H_{r \max}$  – максимальное из значений редуцированной высоты участка стенки выше или ниже промежуточного кольца;  $p_v$  – нормативное значение вакуума;  $p_{w0}$  – нормативное ветровое давление;  $D$  – диаметр резервуара;  $R$  – расчетное сопротивление.

### 1.3.3. Нормативные документы Украины

Общие принципы расчёта на устойчивость, требования к размещению, конструкции и учёту наличия колец жёсткости, согласно ДБН В.2.6-198:2014 [24] и ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [25], аналогичны изложенным в СП 16.13330.2011 [65], поэтому отдельно рассматриваться не будут.

### 1.3.4. Нормативные документы США

Рассматривается основной документ по проектированию резервуаров в США – API 650 [84]. Методика расчета несколько отличается от Еврокода и норм РФ. В API 650 предлагается выполнить расчет на прочность стенки и затем, используя приведенные формулы, определить высоту стенки, не требующую подкрепления. То есть, для получения конструкции без КЖ следует увеличивать толщины стенки до тех пор, пока высота стенки, не требующей подкрепления, будет равна или больше редуцированной высоты стенки.

В расчётных уравнениях учитывается переменный коэффициент устойчивости,  $\psi$ , который зависит от величины вакуумного давления, а также

коэффициент «слома» 0.8 для учета несовершенства геометрии цилиндра. Однако, какие именно несовершенства учитывает данный коэффициент и с какими параметрами - не уточняется.

Что касается расчетных вариантов приложения ветровой нагрузки, в п. 5.9.7.1. [84] указывается, что по теоретическому режиму потери устойчивости ветровая нагрузка является равномерной.

#### 1.3.4.1. Учёт наличия КЖ при расчёте на устойчивость (нормы США)

При наличии вакуума расчет стенки резервуара на устойчивость следует вести по приложению V [84]. Вычисляется трансформированная высота стенки резервуара  $H_{ts}$ . Далее по формуле 1.15 вычисляется максимальная допустимая высота неусиленного корпуса и определяется требуемое количество ребер.

$$H_{safe} = \frac{(t_{s\ min})^{2.5} E}{15203 D^{1.5} P_s \psi}, \quad (1.15)$$

где  $P_s$  - конечное расчетное внешнее давление для корпуса;  $\psi$  - коэффициент устойчивости, который зависит от величины вакуумного давления;  $D$  - диаметр резервуара;  $E$  - модуль упругости стали;  $t_{s\ min}$  - номинальная толщина самого тонкого пояса.

Максимальная высота неукрепленной цилиндрической оболочки вычисляется по формуле [1.16]:

$$H_l = 9.47 t \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 \left(\frac{190}{V}\right)^2}, \quad (1.16)$$

где  $t$  - номинальная толщина самой тонкой части оболочки;  $D$  - номинальный диаметр оболочки;  $V$  - расчетная скорость ветра.

#### 1.3.4.2. Требования к расположению КЖ (Нормы США)

Кольцо необходимо располагать посередине трансформированной высоты стенки  $H_{ts}$ . Если половина трансформированной высоты корпуса превышает максимальную высоту  $H_l$ , то следует использовать второе ветровое кольцо для уменьшения высоты неподкрепленной оболочки до высоты менее максимальной.

### 1.3.4.3. Конструктивные требования к КЖ (Нормы США)

Приводятся несколько принципиально возможных форм поперечного сечения КЖ (рисунок 1.7) и возможность использования ферм жесткости.

Момент инерции и площадь кольца должны быть не менее определённых, соответственно, по формулам 1.17 и 1.18.

$$I_{reqd} = \frac{37.5 Q D^3}{E(N^2 - 1)}, \quad (1.17)$$

где  $Q$  - радиальная нагрузка, действующая на промежуточные усиления со стороны корпуса;  $N$  - количество волн выпучивания корпуса под внешним давлением.

$$A_{reqd} = \frac{Q D}{2 f_s} \quad (1.18)$$

где  $f_s$  - меньшее из допустимых напряжений растяжения материала.

Подкрепляющих ребер для КЖ не требуется, если ширина выступающей части в радиальной вертикальной плоскости не превышает ее толщину в 16 раз.

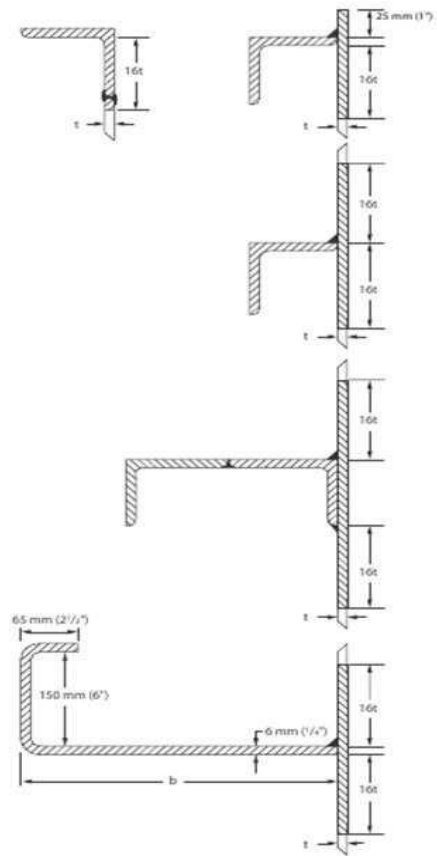


Рисунок 1.7: варианты поперечного сечения КЖ по API 650.

Современная форма поперечного сечения колец жёсткости, несмотря на существенное развитие теории оболочек, и в частности теории устойчивости оболочек, не претерпела существенных изменений. Не считая решётчатых (ферменных) типовых кольцевых рёбер жёсткости, форма поперечного сечения типа «уголок» считается оптимальной.

Для более наглядной демонстрации отличий требований по расчёту и проектированию ВЦР составлена таблица 1.1, включающая в себя ключевые требования нормативных документов по рассматриваемому вопросу. В указанной таблице:  $r$  — радиус цилиндрической оболочки,  $l$  — шаг колец жёсткости.

Таблица 1.1

Сравнение методик проектирования и расчёта ВЦР приведённых в строительных нормах.

Страны	Документ	Проверка устойчивости стенки резервуара без КЖ	Проверка устойчивости стенки резервуара с КЖ	Требования к размещению КЖ	Требования к конструкции КЖ	Учет геометрических несовершенств и дефектов	Методика учета реальной эпюры ветровой нагрузки для резервуаров в группе
Евросоюз	EN 1993-1-6	Формула 1.6. Позволяет учесть все возникающие напряжения	Ссылается на EN 1993-4-2	нет	нет	Частично реализован	Есть только для одиночного резервуара
	EN 1993-4-2		Определение допустимой высоты стенки, в пределах которой нет необходимости устанавливать КЖ	Равный шаг КЖ по высоте редуцированной стенки с учётом осевой нагрузки	Конструктивных нет. Есть требования к минимальному моменту инерции	Приведены параметры предельно допустимых отклонений	В качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу
РФ	СП 16.13330.2011	Формула 1.9. Учитывает кольцевые и меридиональные напряжения	Реализуется подстановкой расстояния между КЖ в формулу 1.5, для определения критических напряжений	КЖ должны располагаться с шагом $l \geq 0.5r$ .	Конструктивных нет. Условная гибкость КЖ, с расчетной длиной $l_{ef}=1.8r$ , не более 6.5	Не оговорен, учтён коэффициентами запаса	Прямых указаний, в каком виде следует задавать ветровую нагрузку, нет.
	СТО-СА-03-002-2009	Аналогично СП 16.13330.2011	Снижение расчетной высоты при размещении КЖ	Обеспечение равенства значений $H_r$ выше и ниже кольца.	Неразрезное сечение. Если ширина больше 16 толщин КЖ, устанавливаются опоры. Приведена формула минимального момента инерции	Приведены параметры предельно допустимых отклонений	В качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу
США	API 650	Прямо учитывает только кольцевые напряжения	Вычисляется максимальная допустимая высота корпуса без усиления и определяется требуемое количество ребер.	КЖ следует располагать с равным шагом по высоте редуцированной стенки	Если ширина больше 16 толщин КЖ, устанавливаются опоры. Приведена формула минимального момента инерции и площади поперечного сечения КЖ.	Введен «понижающий» коэффициент	В качестве расчетного ветра брать равномерное сжатие по кольцу
Украина	ДБН В.2.6-198:2014; ДСТУ Б В.2.6-183:2011	Аналогично СП 16.13330.2011	Аналогично СП 16.13330.2011	Аналогично СП 16.13330.2011	Аналогично СП 16.13330.2011	Не оговорен, учтён коэффициентами запаса	Аналогично СП 16.13330.2011

#### **1.4. Обзор публикаций и литературы по вопросу проектирования резервуаров с кольцами жёсткости**

Рассмотрение обзора литературы целесообразно начать с исторического экскурса становления основных принципов расчёта теории оболочек. Количество работ различных исследователей, касающихся расчёта листовых конструкций, в частности вертикальных цилиндрических резервуаров, увеличивалось прямо пропорционально к их применению. Безусловно, основной причиной развития стало развитие нефтепромыслов. В истории этот период начинается с середины XIX века, однако тогда в мире распространёнными являлись стальные кубические резервуары. Исследователи, рассматривающие тему возникновения стальных цилиндрических резервуаров, разнятся в своих выводах о времени и месте строительства первой такой конструкции [37]. Однако в Российской империи основоположником применения стальных цилиндрических резервуаров в качестве основного сооружения для хранения нефти и нефтепродуктов был В.Г. Шухов [56]. В 1883 году им была опубликована статья, где затрагивалась проблема отсутствия описания в технической литературе рациональной формы резервуаров для жидкостей. Результаты, изложенные в его работе, доказывали, что цилиндрическая форма резервуара оптимальная и обеспечивает максимальную экономичность по части металлоёмкости. Кроме формы стенки, Шухов разработал технические решения по конструктиву фундаментов и покрытий цилиндрических резервуаров, а также по уменьшению потерь от испарения хранимого продукта.

Указанные разработки привели к резкому росту случаев применения стальных ВЦР. Первый стальной клепаный резервуар был построен в 1878 по проекту В.Г. Шухова и А.В. Бари. Как отмечает в своей работе Муталлапов Н.Г., к концу 1880-х годов в России насчитывалось около 130 резервуаров, а в 1917 году их было уже более трёх тысяч, к середине XX века в СССР эта цифра превысила 10 тысяч [42]. И хотя импульс к развитию был заложен, В.Г. Шухов был в первую очередь практиком, и само совершенствование методов расчёта и

развитие теории оболочек его интересовало меньше. К тому же вопросы обеспечения устойчивости в то время решались, как правило, назначением толщины из «опыта проектирования», а определяющим был расчёт на прочность от действия гидростатической нагрузки. При этом, как уже отмечалось ранее в п. 1.2, до начала XX века все резервуары были клёпанные, что накладывало целый ряд конструктивных особенностей, в том числе усложняло применение колец жёсткости. Время их использования в практике наступит несколько позже.

Первые зафиксированные экспериментальные исследования по изучению потери устойчивости оболочек теории были проведены английским учёным В. Фейербёрном в 1858 г., об этом говорится в работе Е.А. Матвеева [39]. Исследование проводилось на цилиндрической оболочке под внешним давлением, однако теоретических выводов получено не было. В историческом обзоре автор Э.Ш. Гайсин [16] отмечает попытку получить зависимости по результатам проведённых экспериментов, предпринятую 1859 г. в Германии Ф.В. Грасгофом и во Франции М. Брессом. Исследования проводились для цилиндрических оболочек в виде труб, то есть способ закрепления торцов не влиял на результат. Однако формула не учитывала коэффициент Пуассона, что потребовало уточнения полученного выражения, которое было выполнено Брайаном в его работе 1888 года.

Одними из первых существенные результаты в теории устойчивости оболочек получены русским ученым С.П. Тимошенко и немецким исследователем Лоренцем в 1908–1911 гг. В своих работах Лоренц [101] и С. П. Тимошенко [69], используя статический критерий Л. Эйлера, рассмотрели устойчивость шарнирно-опертой круговой цилиндрической оболочки при осевом сжатии в линейной постановке. Лоренц также рассмотрел оболочку с аналогичным закреплением под действием равномерного сжимающего кольцевого давления. И хотя полученная в этих работах величина критической нагрузки не подтвердилась экспериментально, согласно законам математики полученные ими выводы не являлись ошибочными, поэтому дальнейшие исследования строились на их основе.

Первое упоминание о применении кольцевого усиления цилиндрических оболочек в качестве усиления конструкций, схожих по габаритам с резервуарами больших объёмов, встречается в работе фон Мизеса 1914 г. [104]. В работе определено выражение для вычисления величины критической нагрузки потери устойчивости от действия равномерных кольцевых сжимающих нагрузок. Соответственно, из данного выражения можно получить расстояние между закреплениями, при котором потеря устойчивости гарантированно не произойдёт. Работа Мизеса упомянута первой, поскольку в ней есть посыл к применению колец, однако в тот период был проведен ещё целый ряд аналогичных исследований различными учёными, в частности: в 1913-1915 гг. задачей определения критического кольцевого напряжения занимался британский математик Саусвелл [114], в 1914 г. – Бубнов [8], в 1932 г. - Флюгге [94], в 1934 г. - русский инженер П.Ф. Папкович [54]. Все указанные исследователи получили выражения очень близкие по своему результату, при этом рассматривалась оболочка с шарнирным закреплением краёв постоянной толщины.

В 1934 году Винденбург и Триллинг в своей работе [122] упростили выражения, полученные Мизесом. При этом допущения о равной толщине и действии равномерного внешнего давления оставались в силе. Соответственно, в случае использования кольцевого усиления располагать их требовалось с равным шагом.

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). Возвращаясь к истории, в 1935 году впервые в СССР изготовлен и смонтирован сварной вертикальный цилиндрический резервуар емкостью 1000 м<sup>3</sup>. Дальнейшее развитие работ по устойчивости оболочек сводилось к поиску решения задачи существенного отличия теоретических и экспериментальных значений критической нагрузки потери устойчивости, что отмечается в книге Л.И. Седова [40]. В целом же теория оболочек активно

развивалась, это было обусловлено их активным практическим применением. В период 1932-1939 годов наиболее существенными результатами стали работы А.А. Гвоздева, П.Л. Пастернака, В.З. Власова [13, 14, 17, 55]. Задача этого периода не столько уточнить теорию оболочек, сколько упростить выражения для практических расчётов, отмечает в своём обзоре В.В. Новожилов [51]. В.З. Власовым разработана приближённая теория оболочек, которая несколько сужала круг её применения, но была заметно проще имеющихся на тот момент решений.

В 1939 году Х.М. Муштари получил выражение, описывающее явление «хлопка» для сферической оболочки от равномерного внешнего давления [43], с результатами, имеющими хорошую сходимость с экспериментом. Формула применяется и по сей день, например для расчёта глубоководных аппаратов. Однако для цилиндрической оболочки аналогичные выражения с хорошей сходимостью вывести не удалось.

С наступлением компьютерной эры появились возможности нового взгляда на решение задачи усиления цилиндрических оболочек кольцами жёсткости, что повлекло за собой всплеск количества исследований по данной тематике. Конечно, многие выводы были получены на фундаментальных исследованиях предшественников [40]. Кроме того, усилия исследователей в основном были направлены на учёт краевых эффектов, а также начальных несовершенств. В СССР одними из первых использовали электронные вычислительные машины А. С. Вольмир и В. И. Феодосьев, кроме того, можно отметить работы Э.И. Григолюка и того же С.П. Тимошенко, которые, получив ряд новых результатов [19, 20, 70] по влиянию закреплений на устойчивость оболочек, внесли дополнения к существующей формуле Мизеса-Папковича для определения кольцевых критических напряжений.

Однако задачи обеспечения устойчивости оболочек на практике по-прежнему решались системой поправочных коэффициентов безопасности, полученных экспериментальным путём.



В 1963 году американский учёный McGrath преобразовал и незначительно уточнил выражение, имеющее название формула Саусвелла-Папковича, в части учёта ступенчатой толщины стенки [103]. Выражения, полученные в данной работе, легли в основу методики расположения колец жёсткости, согласно основным нормам для расчёта и проектирования резервуаров в США – API 650. Полученная формула для расчёта кольцевых критических напряжений потери устойчивости не претерпела существенных изменений до сегодняшнего дня. Во многих нормативных документах она используется как основная для вычисления названного напряжения с учётом коэффициентов безопасности и других особенностей. Тем не менее вопрос упрощений, использованных при выводе формулы, остаётся не решённым. Шаг кольцевых рёбер жесткости основывается на их равном расположении по высоте стенки приведенной толщины и высоты, при этом неравномерная внешняя нагрузка и локальные эффекты потери устойчивости не учитываются.

Начиная с 1970 годов фундаментальных уточнений в практическую формулу для расчёта кольцевых критических напряжений потери устойчивости цилиндрической оболочки не вносилось. Соответственно, не решены вопросы по оптимальному размещению колец жёсткости. Однако, особенно с появлением доступных мощных компьютеров, а также активного применения метода конечных элементов, многие авторы рассматривают возможность уточнения имеющейся формулы для конкретных типов конструкций и нагрузок. Ниже приведен обзор литературных источников, затрагивающих вопросы обеспечения устойчивости стенок ВЦР от действия поперечных нагрузок на основании методики размещения колец жёсткости.

В книгах авторов Самуэльсона и Эггвертца 1992 г [112], а также Тенга и Роттера 2003 года [119] рассматривается работа стенки резервуара с кольцами жёсткости и аналогичных - без кольцевого усиления. В результате отмечено, что постановка даже одного кольца жёсткости повышает сопротивление потере устойчивости в 1.5 раза. Авторы проводят исследование эффективности установки колец как способа повышения устойчивости, рассматривают различные

варианты конструктива кольца, а также его учёта при расчётах в рамках существующих методик. Однако обоснований принципов расположения колец жёсткости и их оптимального количества не приводят, за исключением рекомендации усиливать верхнюю часть стенки резервуаров.

Автор Д. Лемак в своей статье 2005 года [100] рассматривает проблематику несовершенных методик по усилению цилиндрических оболочек кольцевыми рёбрами жёсткости. В работе на основе численных исследований установлен шаг колец, обеспечивающий устойчивость от поперечного равностороннего сжимающего действия нагрузки на цилиндрическую оболочку. Автор не рассматривает какую-либо привязку к существующей методике, тем не менее получает зависимости, позволяющие обеспечить устойчивость рассматриваемой конструкции минимальным количеством колец. Тем не менее применимость результатов работы к резервуарам больших объёмов не является возможным, поскольку автором рассматривались конструкции отличающихся габаритов.

В работе Е.А. Егорова [28] 2006 года рассматривается случай усиления реального резервуара объёмом  $5000 \text{ м}^3$  двумя кольцами жёсткости нестандартного сечения. В результате оба кольца были расположены в верхней части стенки резервуара. Авторы подчёркивают эффективность такого метода, тем не менее не приводят обоснования размещения колец. Этот же автор с другими исследователями в своей работе 2014 года [27] рассматривают требования к проектированию резервуаров согласно украинским ДБН [24]. Авторы отмечают, что в рассмотренном нормативном документе отсутствуют чёткие указания по расстановке колец жёсткости и методы учёта наличия кольца требуют уточнения. По результатам исследования на нескольких численных моделях автор отмечает необходимость уточнения имеющихся норм в части требуемого шага колец жёсткости. Однако конкретных предложений в работе не приводится.

В работе автора Джахаранжири [98] 2012 года при помощи расчётного комплекса Ansys проводится сравнение устойчивости стенки двух резервуаров объёмом по  $10 \text{ тысяч м}^3$  с кольцами жёсткости и без. В качестве нагрузки

рассматривается ураганный ветер до 80 м/с. Учитывается случай наличия двух колец в верхней части стенки резервуара. Методика, по которой было выбрано такое расположение, не приводится. Однако отмечено, что постановка двух колец позволила повысить коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) стенки каждого из резервуаров более чем в 2 раза.

В работе Мочалина 2014 года [41] обсуждается проблема математически обоснованного способа учёта неравномерного внешнего давления в комплексе с переменной толщиной стенки при вычислении кольцевых критических напряжений потери устойчивости. Автором получены выражения, позволяющие частично решить указанные вопросы, однако их использование применимо для случая имеющейся функции изменения толщины оболочки и внешнего давления на неё. В реальных конструкциях такую зависимость получить не всегда представляется возможным, кроме того, автор не приводит экспериментальных исследований по результатам полученных зависимостей.

Исследователем Ви в своих работах 2015-2016 годов [86, 87] рассматривается возможность уточнения методики API 650 по расстановке колец жёсткости. Используя комплекс Ansys, автор учитывает реальную эпюру ветра и определяет уточнённые значения высоты стенки, не требующей подкрепления. Однако автор рассматривает случай расположения колец только с равным шагом по высоте стенки и рассматривает только один типоразмер ВЦР. И хотя методика, которую уточняет автор, является наиболее распространённой на сегодняшний день в современных нормативных документах, полученных выводов недостаточно для получения универсального решения хотя бы для группы типопредставителей резервуаров.

Отдельно стоит отметить отличие НДС оболочки при учёте реальной эпюры ветрового давления взамен упрощённого равномерного сжатия по кольцу. Количество работ по этой тематике начало расти, в особенности в последнее время: можно отметить работы В.Ф. Муцанова, А.В. Зубенко, П.В. Чепура, Ю.В. Ивченко и других [30, 31, 47, 82, 102, 105, 109]. Появление современных расчётных комплексов значительно снизило сложность моделирования

геометрически сложных нелинейных нагрузок, таких как ветровая, и соответственно, отпадает необходимость использования аналитических формул приведения к упрощённым нагрузкам для определения возникающих напряжений [10, 58]. Однако для расчёта конструкции стенки вертикального цилиндрического резервуара с кольцами жёсткости такой подход не работает, поскольку основная формула методики расположения колец получена исходя из равномерного сжатия по кольцу, что делает рассчитанный шаг колец не оптимальным.

Ещё одним моментом, требующим особого внимания, является учёт наличия дефектов и несовершенств геометрии цилиндрической стенки. Все авторы рассмотренных работ [9, 20, 21, 33, 95] указывают на значительное влияние геометрических отклонений на устойчивость таких оболочек. Основной причиной расхождения теоретических и практических значений критической силы потери устойчивости как в кольцевом, так и в меридиональном направлениях на сегодняшний день, по мнению большинства исследователей, являются именно неучтённые геометрические несовершенства [57, 72, 83, 96]. При этом большинство таких дефектов невозможно точно спрогнозировать на этапе проектирования, поэтому их учёт базируется на системе коэффициентов безопасности, полученных из вероятностно-статистического анализа теории надёжности [16]. Однако при эксплуатации резервуаров наблюдаются случаи наличия характерных дефектов, которые, как правило, превышают установленные допуски, и тем не менее эксплуатируются с такими дефектами продолжительное время. К таким дефектам относится угловатость вертикального монтажного сварного шва резервуаров, монтируемых по методу рулонирования. Учёт такого типа дефекта рассматривают в своих диссертационных работах А.А. Кулик и А.Д. Колосков [32, 36]. При этом авторы не затрагивают вопрос устойчивости в случае наличия таких дефектов. Как уже было отмечено, для таких широко распространённых дефектов целесообразно разработать рекомендации по их учёту.

Рассматривая другие современные литературные источники и публикации, которые в меньшей степени касаются установления зависимостей, но затрагивают

анализ работы стенки резервуара, усиленной кольцами жесткости, можно выделить работы авторов [88, 90, 121, 123, 125]. Во всех рассматриваемых работах авторы отмечают эффективность применения горизонтальных колец жёсткости для повышения устойчивости стенки, находящейся под внешним поперечным давлением. Под внешним поперечным давлением чаще всего подразумевается ветровая нагрузка и вакуум. Также во всех источниках КЖ располагаются по разному принципу. Причины и рациональность такого выбора остаются не ясными. Остаётся открытым и вопрос границ эффективного применения таких методов усиления.

### **1.5. Выводы по первой главе. Формулировка цели и задач исследований**

В результате проведенного критического анализа литературы был определён ряд особенностей, которые не учитывают существующие методики по обеспечению 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. Формула Мизеса-Папковича для определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости оболочки была получена для случая равномерного внешнего давления по кольцу, однако расположение колец, исходя из такого принципа, может быть не оптимальным. Ещё одним краеугольным вопросом является отсутствие рациональных границ применения кольцевых рёбер жесткости.

Исходя из анализа литературных и нормативных источников краткая формулировка основных вопросов, решение которых позволит уточнить требуемую методику расположения колец жесткости, следующая:

- приведение реальной эпюры ветрового давления к равномерному сжатию по кольцу обеспечивает запас по устойчивости, однако расположение колец, исходя из такого принципа, не является оптимальным;

- нормативные документы не оговаривают рациональные границы применения КЖ;
- существующие методики расположения КЖ не учитывают случаи наличия типовых дефектов.

На основании вышеизложенного были определены вопросы, требующие дополнительного изучения, определена методология выполнения работы, а также сформулированы цель и задачи исследования.

**Целью исследования является** разработка 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.

**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;
- на основе результатов выполненных исследований установить для вновь проектируемых резервуаров со стенкой переменной толщины с идеальной геометрией зависимости, позволяющие выполнить рациональную расстановку колец жесткости, обеспечивающую максимальные значения коэффициента устойчивости при минимальных значениях ее металлоемкости;
- 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.

## **РАЗДЕЛ 2**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ**

На основе определённой цели и задач исследования разработана методология выполнения аналитических, численных и экспериментальных исследований. Рассмотрены вертикальные цилиндрические резервуары объёмами от 10 до 30 тысяч м<sup>3</sup>.

#### **2.1. Общая характеристика методов исследования.**

##### **2.1.1. Аналитические. Используются для:**

- определения запасов в аналитических формулах для расчёта кольцевых критических напряжений согласно отечественным и зарубежным нормативным документам по расчёту резервуаров в сравнении с общепринятыми теоретическими значениями;

- исследования рациональности постановки колец жёсткости при расчёте резервуаров по отечественным нормам проектирования, получения выражений для оптимальной расстановки колец для оболочек без дефектов геометрии и имеющих типовой дефект;

- введения уточняющего коэффициента к формуле для определения значения кольцевого критического напряжения при расстановке колец по предложенной методике.

##### **2.1.2. Экспериментальные – для верификация численной модели путём:**

- определения возникающих напряжений и критической нагрузки потери устойчивости для идеальной оболочки в случае наличия и отсутствия колец жёсткости;

- определения возникающих напряжений и критической нагрузки потери устойчивости для оболочки, имеющей дефекты с кольцами жёсткости и без них.

### 2.1.3. Численные (применяется метод конечных элементов) для:

- создания конечно-элементной (КЭ) модели ВЦР с целью предварительной оценки влияния наличия различных типовых дефектов на устойчивость и определения наиболее невыгодных для дальнейшего исследования;
- создания КЭ модели ВЦР, учитывающей реальную эпюру ветрового давления и данные, полученные при экспериментальной верификации;
- поиска альтернативного размещения колец на верифицированной модели, при котором КЗУ стенки резервуара оказываются выше нормативного в случае наличия одного и более колец жёсткости;
- определения наиболее невыгодных параметров рассматриваемого дефекта и оценки их общего влияния на устойчивость при различном расположении колец.

В общем, методология исследований имеет следующую последовательность:

- 1) обоснование рассматриваемых габаритов конструкций;
- 2) создание и экспериментальная верификация численных моделей резервуаров различных объёмов и конструктивных вариантов. Для численных исследований будет использоваться комплекс ЛИРА-САПР 2015 R4;
- 3) на основе верифицированной модели ВЦР путём системного последовательного моделирования различного положения колец жесткости на стенках ВЦР различных габаритов при наличии и без дефектов определить такое положение, при котором устойчивость стенки оказывается максимальной;
- 4) выполнение аналогичного пункту 3 исследования для оболочки с характерным типовым дефектом;
- 5) определение границ рациональности применения КЖ для резервуаров с различными параметрами исходя из требования обеспечения устойчивости при минимальной металлоёмкости конструкции при действии кольцевых сжимающих нагрузок;
- 6) на основе полученных данных внести дополнения в существующую



методику расчёта резервуаров в части расчёта устойчивости стенок оболочек, усиленных кольцевыми рёбрами жесткости.

Целесообразно также представить методологию исследования в виде логической схемы, изображенной на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. Логическая схема исследования.

## 2.2. Экспериментальная верификация численной модели

Основной расчётной нагрузкой при расчёте на устойчивость вертикальных цилиндрических резервуаров является сочетание ветра и вакуума. Для экспериментального моделирования случая потери устойчивости от ветровой нагрузки требуется крупногабаритная модель резервуара и соответствующая сверхмощная аэродинамическая установка. Кроме того, задача определения оптимального расположения колец требует выполнения многочисленных испытаний. Поэтому в качестве альтернативы была принята задача верификации

результатов расчёта на устойчивость в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 на примере небольшой оболочечной конструкции, находящейся под действием равномерного внешнего давления, потерю устойчивости которой возможно смоделировать экспериментально. В таком случае на верифицированной численной модели возможно далее в широком диапазоне варьировать значения нагрузки, конструктивные особенности и проводить неограниченное количество испытаний.

Для решения задачи верификации, основываясь на разработанной методологии исследования, были определены три характерных экспериментальных модели, различные вариации которых будут рассматриваться в дальнейших численных исследованиях. Параметры и особенности моделей подробно описаны в п. 2.2.2.

### **2.2.1. Цель и задачи экспериментальных исследований**

Цель: проверка адекватности результатов расчёта, получаемых для оболочечных конструкций в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4.

Основываясь на вопросах, исследуемых численно, были определены задачи экспериментальных исследований - это определение критической силы и основных параметров напряжённого состояния для цилиндрической оболочки под действием внешнего давления в трёх конструктивных вариантах исполнения, которые позволят проверить применимость расчётного комплекса для всех вариаций численных исследований методом конечных элементов.

### **2.2.2. Проводимые испытания. Общая схема испытательных установок**

#### **2.2.2.1. Проводимые испытания**

В результате испытаний необходимо:

- зафиксировать значение нагрузки, при которой наблюдается эффект потери устойчивости;
- получить качественную картину действующих меридиональных,

кольцевых и касательных напряжений в характерных точках в момент потери устойчивости оболочки в трёх конструктивных вариантах.

Соответственно проведено три испытания, по одному для каждого из нижеперечисленных конструктивных вариантов моделей резервуара:

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

Выбор указанных вариантов обоснован задачами исследования. Для случая цилиндрической оболочки без дефектов и несовершенств проведено множество экспериментальных и теоретических исследований [3, 94, 104, 107, 113, 114] по определению критического кольцевого напряжения потери устойчивости. В большинстве рассмотренных примеров отношение высоты к радиусу оболочек не соответствует габаритам вертикальных цилиндрических резервуаров большого объёма. Тем не менее нормативные методики по расчёту стальных ВЦР основаны, в том числе и на результатах аналогичных экспериментов, что не позволяет сомневаться в применимости полученных результатов для реальных конструкций. В то же время рассмотрение оболочки с геометрией, отличной от идеальной, не позволяет определить качественное отличие изменения напряженно-деформированного состояния только при сравнении с численной моделью либо с известными результатами экспериментальных исследований. В первом случае это связано с необходимостью верификации самой численной модели, во втором - с наличием множества отличительных особенностей в экспериментальных моделях. Кроме того, существующая проблема значительных отличий экспериментальных и теоретических коэффициентов запасов устойчивости цилиндрических стенок под внешним давлением требует решения, отличного от прямого сравнения результатов натурных и численных исследований [57].

Следовательно, говоря о проверке адекватности результатов расчёта комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4 при расчёте на устойчивость, необходимо в первую очередь руководствоваться сравнением величины приращений, полученных численно и экспериментально как отношение значений возникающих

пределных напряжений при рассматриваемом конструктивном варианте по сравнению с первоначальным. Соответственно, в качестве первоначального варианта, с которым следует сравнивать значения напряжений, вычисленных для других конструктивных вариантов, необходимо моделирование цилиндрической оболочки с идеальной геометрией и без усиления – модель №1.

Поскольку одной из основных задач исследования является определение рационального шага колец, следующим необходимым конструктивным вариантом, требующим экспериментальной верификации, является оболочка с усилением – модель №2. Полученные значения напряжений от действующей нагрузки для случаев численной и экспериментальных моделей и последующее их сравнение позволяет уточнить работоспособность комплекса и в случае необходимости уточнить конечно-элементную модель для обеспечения корректности последующих результатов устойчивости. В качестве варианта, подлежащего сравнению, рассматривается случай наличия одного кольца жёсткости. В таком конструктивном варианте возможно определить изменение НДС и КЗУ цилиндрической стенки по сравнению с неусиленной оболочкой. При этом не требуется обеспечения высоких значений внешней нагрузки для потери устойчивости стенки в случае эксперимента.

Работа конструкции оболочки под внешним давлением с дефектом угловатости вертикального монтажного сварного шва также подлежит сравнению с исходной моделью в численном и натурном исполнении. Сравнение возникающих напряжений и приращений критической нагрузки, соответствующей потере устойчивости, позволит выявить особенности учёта концентрации напряжений и моментного состояния оболочки в зоне указанного дефекта используемым расчётным комплексом. Соответственно, возможно будет сделать вывод о применимости сформированной конечно-элементной модели для учёта рассматриваемого типового дефекта. Параметры дефекта принимались достаточными для обеспечения заметного влияния на исследуемые параметры НДС, подлежащие сравнению с полученными численно. В п. 2.2.2.5. приведено подробное описание модели №3.

Принципиальная последовательность выполнения экспериментальных исследований имеет общую структуру и приведена в виде основных пунктов программы испытаний для каждой из моделей:

- 1) сборка корпуса, установка подпорок, проверка герметичности модели;
- 2) установка штуцеров и измерительного оборудования;
- 3) разметка и крепление тензодатчиков на корпусе модели;
- 4) подключение тензодатчиков к устройству преобразования их сигналов, проверка работоспособности всех датчиков;
- 5) создание постепенно возрастающего равномерного внешнего давления на модель (наиболее технологичный способ моделирования такой ситуации - это создание достаточного по величине вакуума внутри оболочки);
- 6) фиксация напряжений и величины критической нагрузки потери устойчивости. потери устойчивости в момент потери устойчивости стенки.

Для проведения верификации численной модели необходимым условием является наличие данных о значениях действующих напряжений и величине нагрузки в момент потери устойчивости. Результатом обработки данных является получение средних значений основных параметров напряжённого состояния цилиндрической оболочки и величина критической нагрузки потери устойчивости для каждой модели.

#### 2.2.2.2. Общая схема испытательных установок

Для проверки адекватности результатов численных расчётов для конструкций, имеющих форму и параметры ВЦР, была принята модель, габариты которой принимались согласно параметрам резервуара РВС 20000 м<sup>3</sup> в соответствии с типовым проектом [73] в масштабе 1:100. Таким образом, высота стенки составила 200 мм, диаметр 400 мм для каждой из моделей.

Принципиальная схема модели изображена на рисунке 2.2. Корпус состоит из тонколистовой оцинкованной стали толщиной 0.5 мм. Модель состоит из трёх отдельных элементов (стенка, днище, крышка), соединённых по схеме замка. Указанная схема создаёт дополнительную жёсткость стыка, имеющую место в реальной конструкции. 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. Кроме того, элементы подпорок моделируют недеформируемое опорное кольцо сферической кровли и анкерное крепление днища посредством плотного прилегания верхнего и нижнего элементов подпорок к соответствующим частям цилиндрической стенки по всей длине. Соединения вакуумметра и вакуумного насоса с корпусом модели осуществляется через штуцера, герметично соединенные с верхней частью модели.

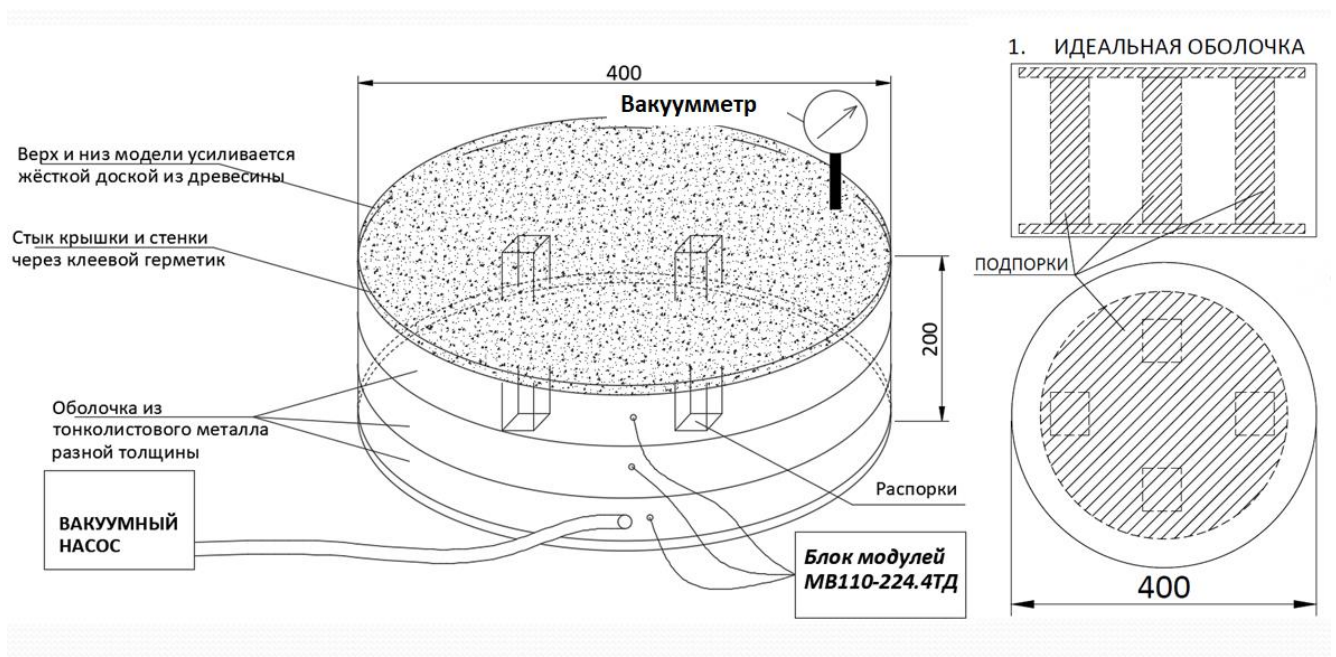


Рисунок 2.2. Принципиальная схема испытательных установок на примере модели №1 «идеальная оболочка».

Особенности, отличия и параметры экспериментальных моделей приведены ниже.

2.2.2.3. Параметры экспериментальной модели 1 - условно идеальная оболочка, не имеющая усиления и дефектов.

Наличие для подобной оболочки множества экспериментальных исследований различных авторов и вариантов аналитических решений является известным фактом. Однако для полноты эксперимента и проверки адекватности самой натурной экспериментальной установки при сравнении с дальнейшими

испытательными случаями в качестве первой модели была принята оболочка такого типа. Габариты и устройство модели, её общая схема, а также соответствующая ей численная модель приведены на рисунках 2.3 а, б, в, соответственно.

Численная модель, выполненная в расчётном комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4, представляет собой оболочку, состоящую из трёх элементов: стенки, крышки и дна, загруженную равномерно распределенным по поверхности сжимающим давлением. Фиксируемая величина давления принимается равной значению, при котором происходит потеря устойчивости цилиндрической стенки экспериментальной модели.

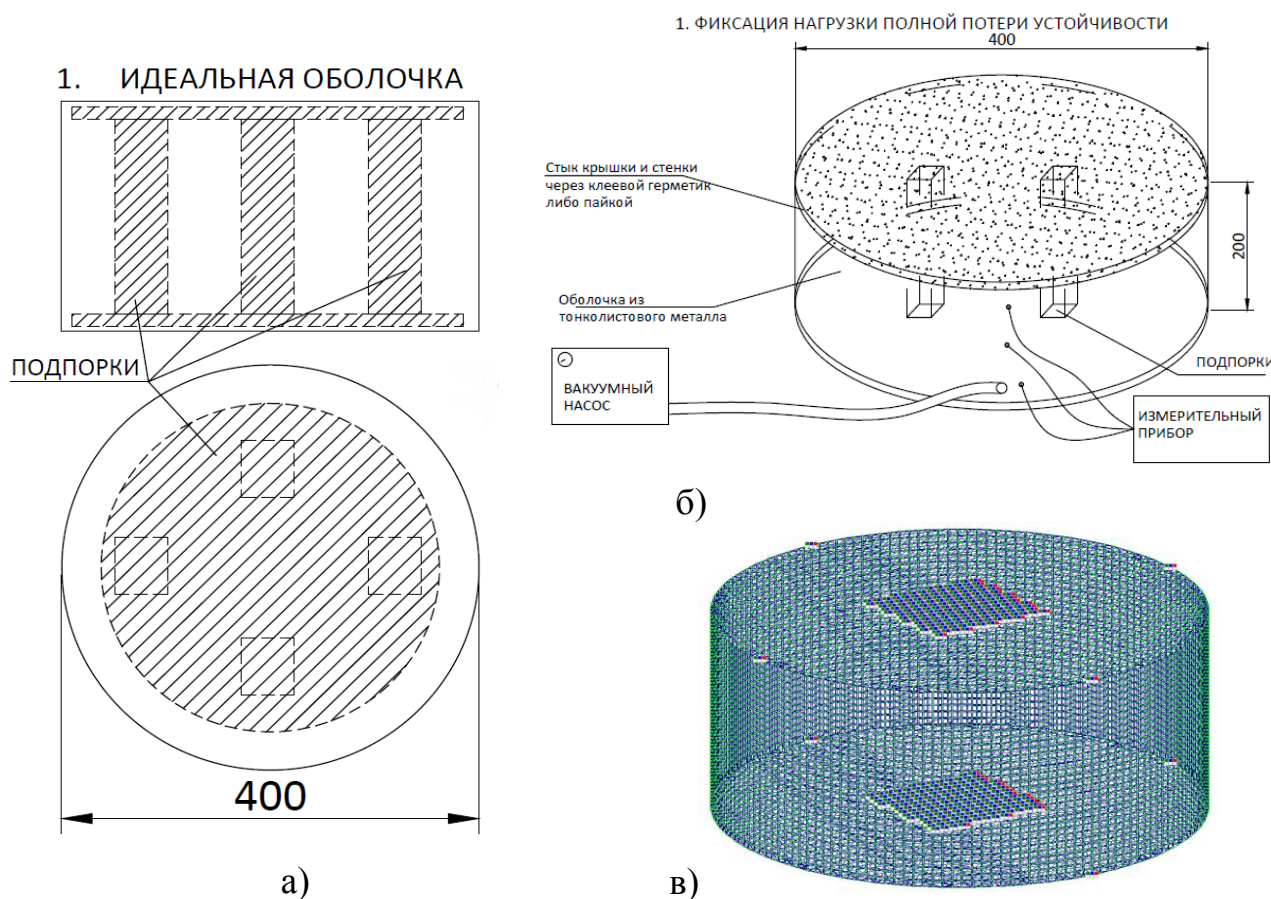


Рисунок 2.3. Размеры и параметры экспериментальной модели 1: а – габариты и расположение подпорок, б – общая схема, в – КЭ модель.

Предварительно на аналогичной численной модели был проведён геометрически нелинейный расчёт, учитывающий постепенное приложение давления, и полученные значения итоговых напряжений сравнивались со случаем линейного решения такой задачи. В результате значения напряжений для



сравниваемых вариантов отличались не более чем на 2%, на основании чего в дальнейшем на модель прикладывалось сразу конечное значение нагрузки. Такое явление можно объяснить отсутствием нерегулярных дефектов геометрии, что не противоречит целям исследования.

В работе рассматривались различные варианты сетки, закрепления, узловых стыков конечно-элементной модели. Здесь приведены параметры, принятые в качестве наилучших для обеспечения сходимости с экспериментальными данными, по результатам исследования работы всех трёх моделей.

Нижняя часть численной модели закреплена в четырёх крайних точках от линейных перемещений. Угловые перемещения дополнительно не ограничиваются, поскольку моделируется фактическое примыкание стенки и днища. Подпорки моделируются закреплением от возможного перемещения по вертикали нескольких центральных узлов крышки и днища.

Оболочка стенки задается конечным прямоугольным элементом №44. Аналогично задаётся крышка и днище, однако в местах стыка со стенкой частично применялись треугольные КЭ №42. Сетка конечных элементов подбиралась исходя из предварительного расчёта сходимости напряжений, возникающих от действия равномерного внешнего давления и полученных по аналитической формуле, и затем уточнялась по результатам эксперимента. В итоге по длине окружности оболочка состоит из 40 элементов, а по высоте из 12 рядов. Общее количество элементов стенки равно 480, фактический размер одного конечного элемента 3.1x1.8 см.

#### 2.2.2.4. Параметры экспериментальной модели 2

Оболочка, усиленная кольцом жёсткости с КЖ, расположенным ровно посередине высоты стенки. В реальных конструкциях кольцо жёсткости, выполняемое из листового металла, имеет вертикальный участок, обеспечивающий устойчивость самого кольца. Обеспечить аналогичную конструкцию в случае масштабной модели технологически сложно, поэтому было принято увеличить жёсткость самого кольца за счёт достаточной ширины. Кольцо



выполняется из тонколистовой стали 0.5 мм аналогично материалу корпуса модели и крепится к стенке с помощью пайки, ширина кольца 30 мм. Большая жёсткость кольца относительно жёсткости стенки также позволила не устанавливать промежуточных подкреплений. В остальном модель 2 аналогична первому случаю.

Расположения кольца обосновывается необходимостью снижения влияния краевых эффектов при измерении напряжений, что достигается удалением расположения тензодатчиков от зоны расположения колец и других изменений геометрии цилиндрической стенки. Ввиду небольшого размера натурной модели расположения кольца по середине высоты стенки вертикального цилиндрического резервуара является оптимальным для обеспечения минимального влияния краевого эффекта, кроме того, в таком случае наблюдается наиболее ярко выраженный эффект от наличия подкрепляющего кольцевого элемента.

Габариты и устройство модели, её общая схема, а также соответствующая ей численная модель приведены на рисунке 2.4 а, б, в соответственно.

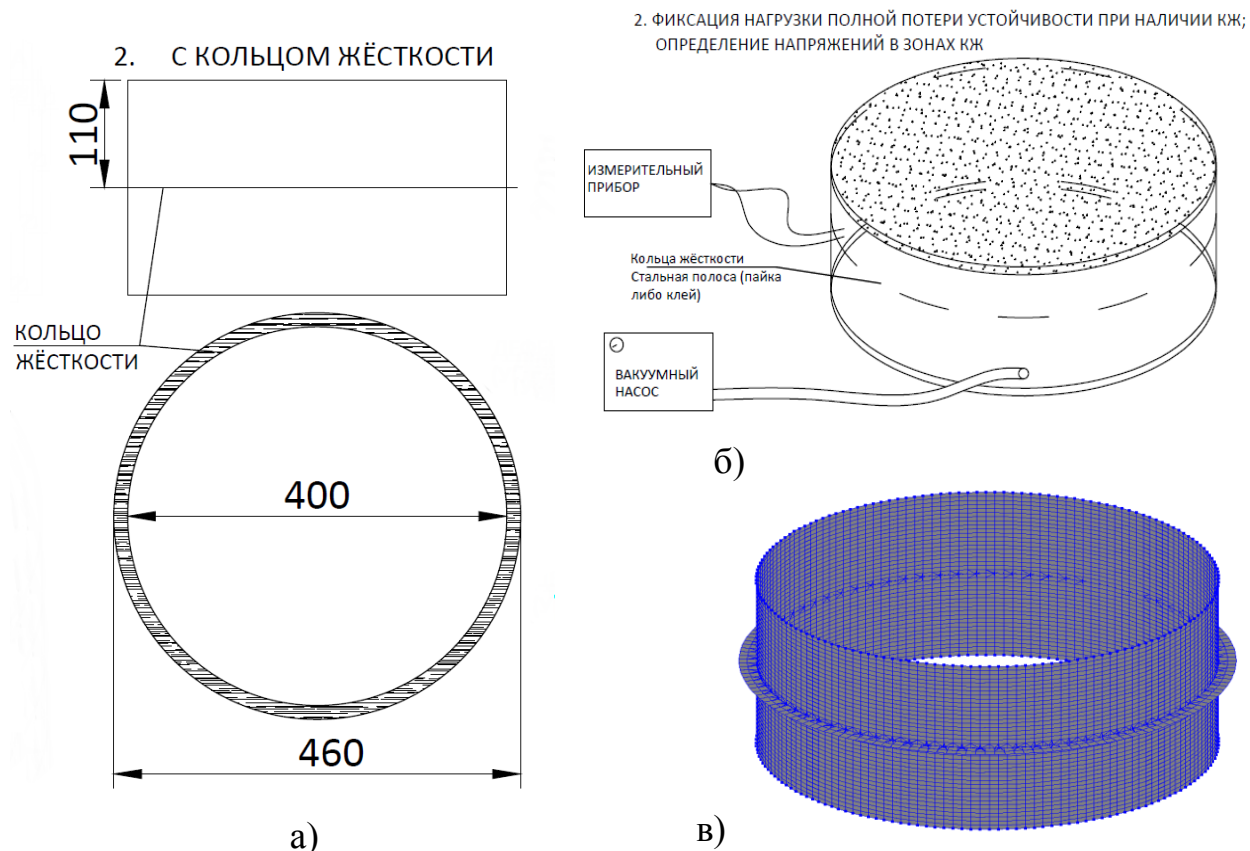


Рисунок 2.4. Размеры и параметры экспериментальной модели 2: а –

габариты и расположение кольца, б – общая схема, в – фрагмент КЭ модели.

На рисунке 2.4в численная модель изображена без верхней и нижней частей для более наглядной визуализации расположения смоделированного кольца жёсткости на численной модели. Узлы крепления кольца считаются жёсткими. В экспериментальной модели такое соединение моделируется сплошным швом пайки с двух сторон.

#### 2.2.2.5. Параметры экспериментальной модели 3

Как уже отмечено ранее, в качестве геометрического несовершенства для модели 3 выбран дефект угловатости вертикального монтажного сварного шва резервуаров, собираемых по методу рулонирования. Общее описание проблемы наличия таких дефектов, обоснование выбора приводится в разделах 1 и 4. Однако ввиду малости (в случае масштабной модели) размер дефекта в испытании будет несколько увеличен, что не противоречит цели эксперимента – проверки достоверности результатов численных расчётов оболочек.

Для целей испытания принят дефект глубиной 5 мм и шириной на поверхности оболочки в 10 мм. Указанный дефект моделировался механическим способом почти на всю высоту стенки, с отступами в 10 мм от верха и низа конструкции для плавного выхода на проектную глубину геометрического несовершенства. Фактически на корпусе модели дефект получился с разбросом размеров по ширине  $\pm 1,5$  мм, по глубине  $\pm 1$  мм. Расположение дефекта и его параметры изображены на рисунке 2.5а, общая схема модели № 3 на рисунке 2.5б.

Численная модель № 3 изображена на рисунке 2.5в в виде фрагмента без крышки и днища для лучшей визуализации наличия дефекта. Для учёта и фиксации концентрации напряжений и краевого эффекта в зоне наличия дефекта проводилось сгущение сетки конечных элементов цилиндрической стенки. Размеры конечных элементов уменьшались пропорционально в два и четыре раза соответственно по мере приближения к наиболее углублённой точке дефекта в виде угловатости. Сгущение сетки КЭ рассматривалось в зоне теоретического

распространения зоны краевого эффекта, в общей сложности ширина зоны составила 6.2 см по длине окружности.

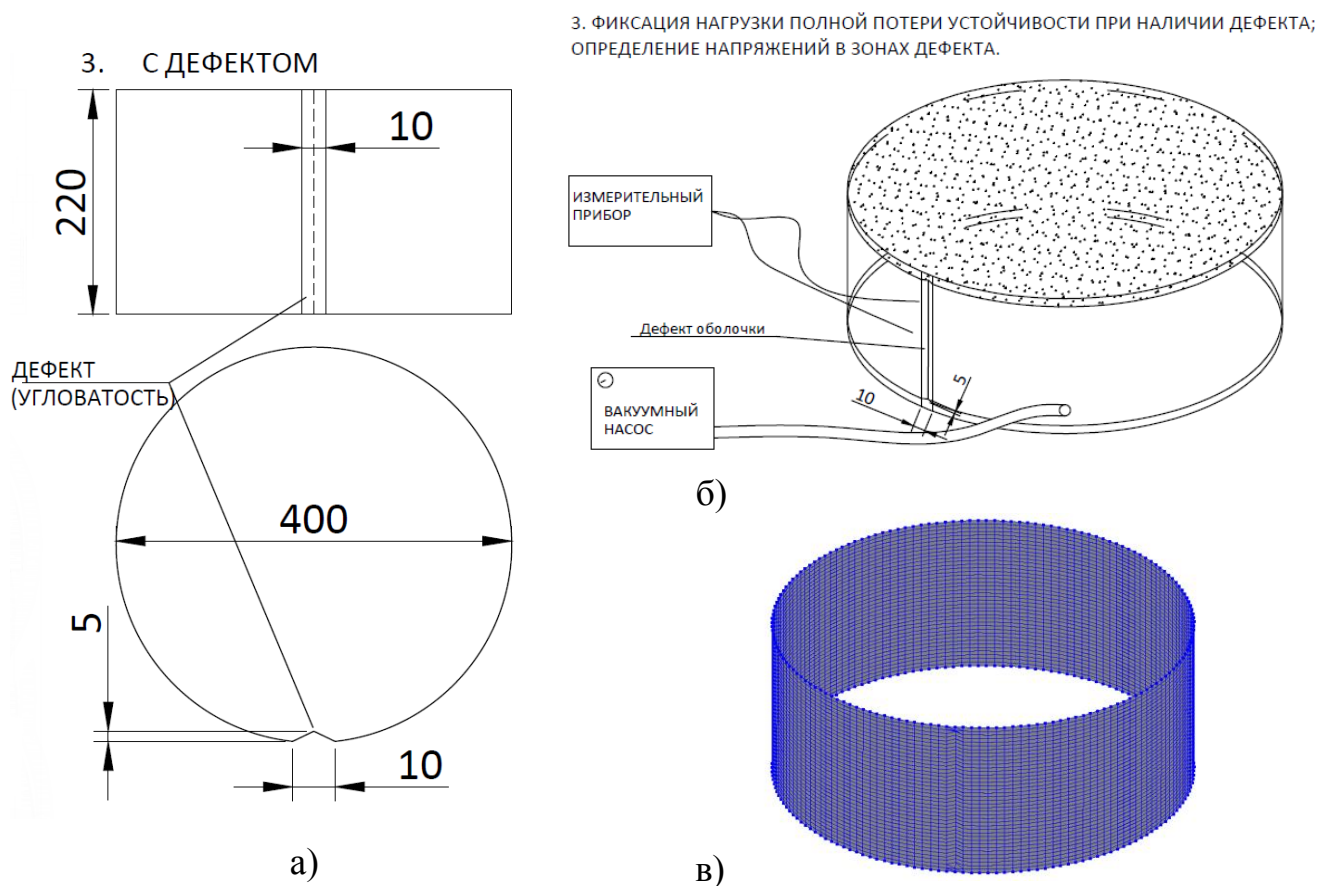


Рисунок 2.5. Размеры и параметры экспериментальной модели 3: а – габариты и расположение дефекта, б – общая схема, в – фрагмент КЭ модели. Условия закрепления и приложения нагрузки аналогичны модели №1.

### 2.2.3. Подбор необходимого оборудования

#### 2.2.3.1. Установка для создания разряжения и его измерение

Для создания разряжения вакуума будет применяться электрический роторно-пластинчатый двухступенчатый вакуумный насос 2НВР-5ДМ – рисунок 2.6. Скорость работы до 5л/сек, при такой скорости откачки воздуха компенсируется потеря в давлении через неплотности швов. Остаточное давление менее 1 кПа. Насос подбирался исходя из предварительного численного расчёта необходимой нагрузки, при которой наступает потеря устойчивости стенки. Соединение насоса с корпусом модели будет производиться через шланг и герметичный штуцер, находящийся в крышке модели.

Для измерения величины вакуума будет применяться вакуумметр ВП-100/Д59 классом точности 2,5. Вакуумметр крепится непосредственно к корпусу модели через конструкцию крепления, обеспечивающего достаточную для испытания герметичность.

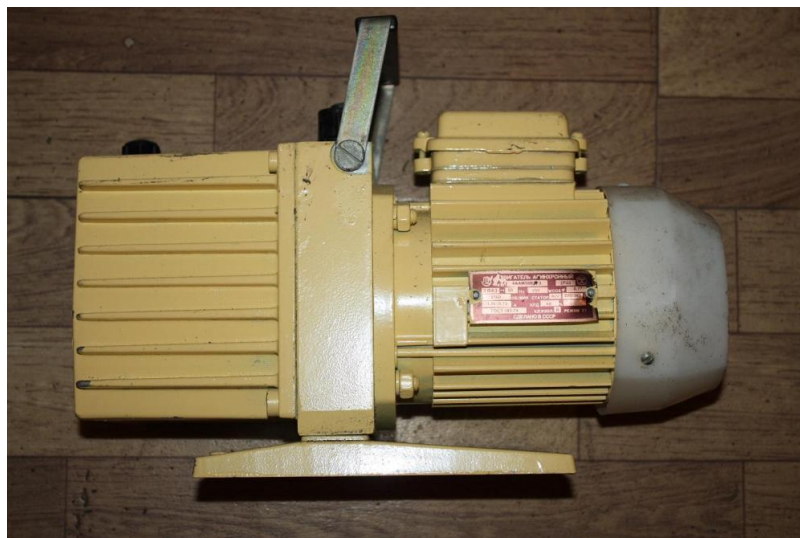


Рисунок 2.6. Вакуумный насос 2HBP-5ДМ.

#### 2.2.3.2. Устройство преобразования сигналов тензодатчиков

Для определения возникающих напряжений будет использоваться тензорезисторный метод. Устройство преобразования сигналов тензодатчиков будут служить 6 модулей ввода сигналов ОВЕН МВ110-224.4ТД – рисунок 2.7.



Рисунок 2.7. Модули ввода сигналов ОВЕН МВ110-224.4ТД.

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

опроса 0.1 сек, погрешность измерений вольтажа менее 1 %. 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 несколько раз в секунду.

#### 2.2.3.3. Тарировка измерительного прибора

Перед испытанием была проведена тарировка прибора ОВЕН МВ110-224.4ТД. Кроме проверки общей работоспособности прибора и линейности получаемых показаний, определялся коэффициент тензочувствительности датчиков. Данная величина определяется для каждой партии датчиков и необходима для получения переводного коэффициента показаний прибора из мВ в МПа.

Тарировка проводилась с учётом требований ГОСТ 21616-91 в двух вариантах:

- при испытании балки на изгиб – рисунок 2.8;
- при испытании балки на растяжение - рисунок 2.9.

Для варианта, приведенного на рисунке 2.8, рассматривалась балка, имеющая участок с чистым изгибом. Для целей тарировки было размещено четыре тензодатчика в зоне чистого изгиба. Дополнительно для контроля снимались показания с механических тензометров Гугенбергера. Балка длиной 1 метр, шарнирно закреплена на концах. Последовательно проводя нагрузку и разгрузку балки, фиксируя показания приборов, были построены графики зависимости теоретических напряжений от показаний ОВЕНа (рис. 2.8в). Нагрузка выполнялась тремя гирями весом по 900 грамм каждая. Для полученных графиков определены зависимости в виде функций  $y(x)$ , где  $y$  – теоретические значения напряжений,  $x$  – значения показаний прибора ОВЕН МВ110-224.4ТД. Среднее значение коэффициентов наклона прямых нагрузки и разгрузки является переводным коэффициентом для измерительного прибора. Расхождение между значениями напряжений, полученных по данным



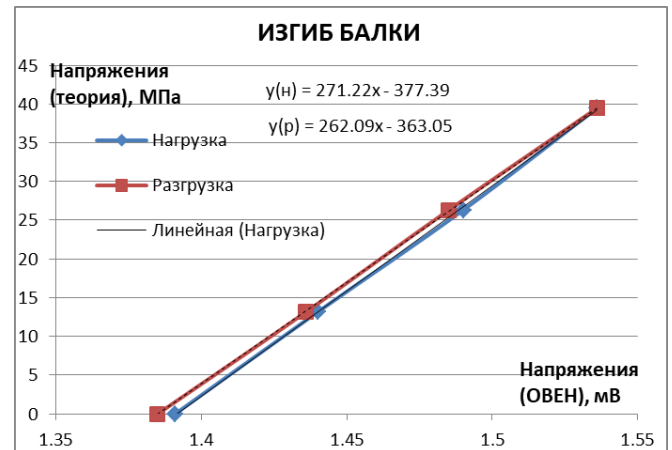
механических тензометров и электронных измерительных модулей, составило не более 5 %.



а)



б)



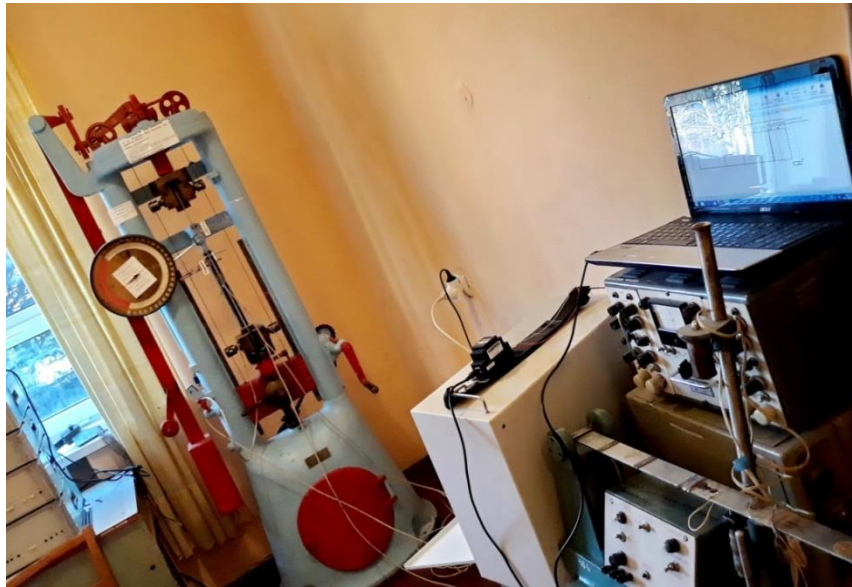
в)

Рисунок 2.8. Тарировка при испытании балки на изгиб: а - общий вид установки для тарировки, б – крепление тензодатчиков, в – график зависимости « $\sigma$ - $\epsilon$ ».

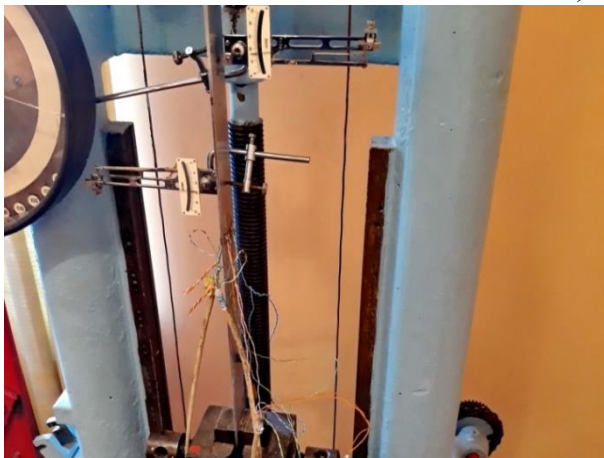
Для большей точности аналогичный опыт был проведён на установке для испытания балок на растяжение – рисунок 2.9а. Повышение точности заключалось в увеличении количества этапов нагрузки и разгрузки. Также применялось четыре тензометра, которые крепились с двух сторон балки – рисунок 2.9б. Рассматривалась стальная балка прямоугольного сечения, закреплённая в торцах таким образом, чтобы при растяжении отсутствовали

возможные эксцентриситеты приложения нагрузки. Итоговый график по тарировке изображён на рисунке 2.9в. Как и для первого варианта тарировки, были построены графики зависимостей  $y(x)$ , где  $y$  – теоретические значения напряжений,  $x$  – значения показаний прибора ОВЕН МВ110-224.4ТД.

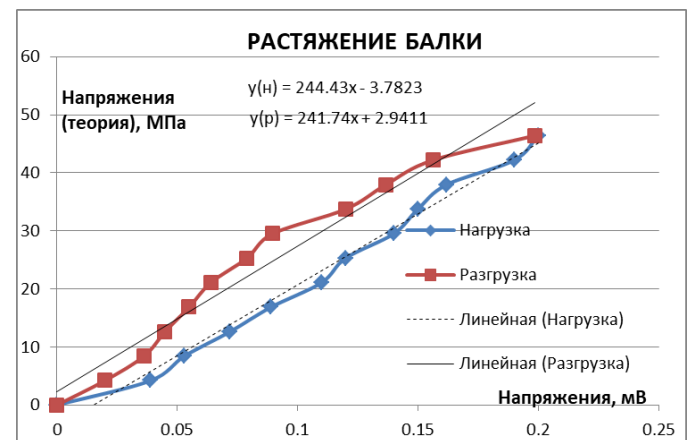
Как видно из зависимостей, полученных по результатам двух испытаний и приведенных на рисунках 2.8 и 2.9, значения переводных коэффициентов варьируются в пределах 241..271. В качестве итогового значения принято среднее значение и определён коэффициент тензочувствительности датчиков. Указанные величины были добавлены в алгоритм пересчёта данных в ПО Master Scada для получения величин фиксируемых напряжений.



а)



б)



в)

Рисунок 2.9. Тарировка при испытании балки на растяжение: а – общий

вид установки для тарировки, б – крепление тензодатчиков, в – график зависимости « $\sigma$ - $v$ ».

#### 2.2.3.4. Тензодатчики и их размещение

В исследовании применялись тензодатчики 2ПКБ-5-100ТБ с базой 5 мм, что обеспечило достаточный для проводимых испытаний диапазон измерений. На всех трёх моделях датчики будут размещаться одинаково. Всего на корпусе располагалось 8 точек (розеток) измерения – рисунок 2.10. Каждая точка состоит из трех датчиков для измерения кольцевых, осевых и действующих под  $45^\circ$  напряжений. Датчики размещались на равноудалённом расстоянии от места крепления КЖ с разных сторон, а также в зоне планируемого дефекта. На рисунке 2.10 изображена развёртка стенки с усиливающим кольцом и дефектом. Для других рассматриваемых конструктивных вариантов цилиндрической стенки тензодатчики располагались аналогично.

Предварительно проводилась разметка и нумерация мест крепления датчиков. Датчики крепились с помощью предназначенного для этих целей клея через фиксирующие колодки, принимающие на себя натяжение от проводов.

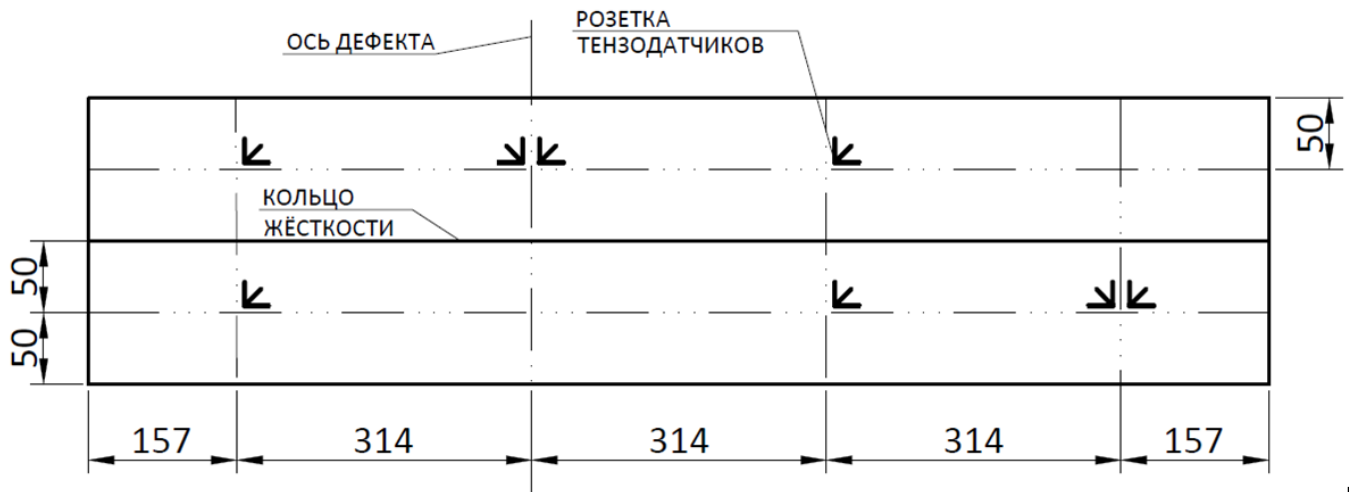
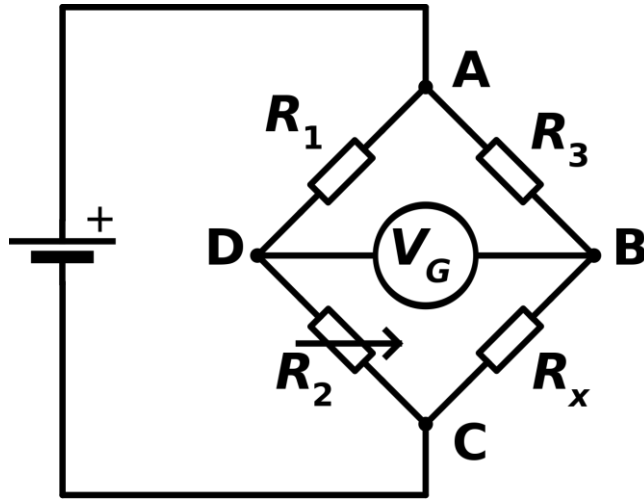


Рисунок 2.10. Развёртка стенки с расположением тензодатчиков.

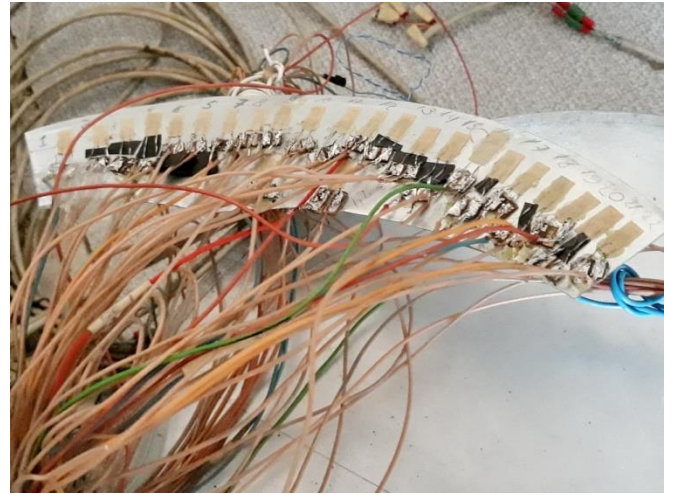
Тензодатчики соединяются с измерительным прибором при помощи электрической схемы под названием мост Уитстона. Принципиальная схема такого моста указана на рисунке 2.11. Указанная схема собиралась для каждого датчика, в качестве компенсационных резисторов использовались аналогичные тензодатчики, приклеенные к металлу, из которого изготовлена модель.



Фиксация момента и значения нагрузки в момент потери устойчивости проводилась при помощи видеокамер, установленных на разных ракурсах для фиксации возможных несимметричных вариантов потери устойчивости. Время записи с видеокамер синхронизировалось с данными показаний тензодатчиков с точностью до одной секунды.



а)



б)

Рисунок 2.11. Мост Уитстона: а - принципиальная схема, б - планка с компенсационными тензорезисторами.

## 2.4. Обработка результатов эксперимента

После проведения итоговой проверки оборудования, тестирования всех цепей на отсутствие коротких замыканий, проверки герметичности самих моделей было проведено испытание последовательно для каждой модели согласно алгоритму, приведенному в пунктах 2.1. и 2.2. настоящей работы.

Все экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ГОУ ВПО «ДонНАСА» при температуре воздуха  $t = +21 \pm 3^\circ\text{C}$ .

Стенки всех рассмотренных моделей были доведены до потери устойчивости, по результатам каждого эксперимента был сформирован массив данных по каждому датчику, и далее проведена процедура процесса обработки результатов, принципиально заключающаяся в следующем:

- 1) датчики были разделены по группам в зависимости от измеряемых

напряжений, а также местоположению, относительно возникающих вмятин (выпучин);

2) данные с датчиков были синхронизированы со временем видеозаписи, и определено с точностью до одной секунды время потери устойчивости;

3) с использованием данных видеозаписи определено значение величины вакуума в момент потери устойчивости;

4) по результатам испытания для каждой группы датчиков были построены графики изменения напряжений по времени наблюдения и определены средние значения напряжений в момент потери устойчивости;

5) проведено сравнение экспериментальных и численных значений максимальных напряжений в момент потери устойчивости, а также приращений критического давления.

Перед анализом результатов экспериментальных исследований по каждой рассматриваемой модели следует отдельно оговорить некоторые особенности обработки результатов. Поскольку скорость возрастания внешней нагрузки не является равномерной, построение графиков зависимости возникающих напряжений от действующей нагрузки является технически сложной задачей. Скорость увеличения нагрузки уменьшается со временем, так как возрастающее разряжение внутри корпуса модели вызывает подсос воздуха даже через мельчайшие неплотности технологических швов. Тем не менее, используя данные видеосъёмки и проводя их синхронизацию с показаниями вакуумметра, возможно определить равные шаги возрастания нагрузки по времени до момента потери устойчивости. Однако, как уже отмечалось в п.2.2, для задачи верификации расчётной модели достаточно данных о напряжённо-деформированном состоянии оболочки в момент, предшествующий потере устойчивости. Следовательно, отсутствует необходимость определения зависимостей и построения графиков «напряжения-нагрузка» для исследуемых моделей. Соответственно, в результатах исследования будут приводиться зависимости фактически изменяющихся напряжений по времени с учётом реальной скорости приложения нагрузки, в связи с чем они получились нелинейными. При этом ярко выраженное изменение

скорости наблюдалось при значениях нагрузки близкой к критической, соответственно и нелинейность графиков проявляется ближе к моменту потери устойчивости.

Ещё одной особенностью получения значений напряжений является последовательное, а не одновременное снятие показаний с тензодатчиков измерительным прибором ОВЕН МВ110-224.4ТД. Так для полного цикла считывания данных, их обработки и фиксации в электронной таблице требуется около двух секунд. На начальном этапе эксперимента, когда скорость возрастания нагрузки высока, эта особенность не позволяет получить точное значение напряжения с конкретного датчика в любой момент времени. Однако с возрастанием вакуума и замедлением скорости его возрастания указанное время обработки результатов становится приемлемым для получения достаточной точности. Так, для случая идеальной оболочки при приближении нагрузки к критическому значению скорость увеличения нагрузки составляла не более 0,3 кПа/сек, для других опытных образцов этот показатель был ещё меньше. Таким образом, имеющийся возможный вариант неточного фиксирования напряжений на начальных этапах испытания не приводит к недостоверным результатам итоговых значений критических напряжений потери устойчивости.

Учитывая приведенные выше особенности, для верификации модели будут определяться напряжения, возникающие в момент непосредственно перед потерей устойчивости стенкой, соответственно и задача приведения графиков к равному шагу приложения нагрузки решаться не будет, поскольку это не затрагивает конечные значения напряжений.

В то же время необходимо определиться, что считать потерей устойчивости и как зафиксировать указанный момент с учетом напряжённо-деформированного состояния конструкции. Сделать вывод о потере устойчивости оболочки можно на основе показаний, полученных с тензодатчиков либо на основе результатов визуального контроля формы оболочки. Поскольку показания измерительного прибора сами являются объектом контроля и верификации, момент потери устойчивости будет фиксироваться при помощи видеокамеры,

которая, кроме общего вида модели, записывает показания величины разряжения, измеряемой вакуумметром. Кроме того, измерительный прибор ОВЕН МВ110-224.4ТД в комплексе с тензодатчиками 2ПКБ-5-100ТБ с базой 5 мм обеспечивают достаточный диапазон измерений лишь при малых величинах деформаций. В случае потери устойчивости цилиндрической оболочки происходят перемещения, приводящие к значительно большим деформациям, превышающим допустимые пределы измерений. Это вызывает значительный скачок напряжений (от 5 до 10 раз), при этом, получив новую форму равновесия, оболочка продолжает воспринимать растущую нагрузку, однако ввиду расположения датчика (верх либо низ волны) существенно меняется значение и даже знак действующих напряжений. Это не даёт возможности составить целостную картину НДС после потери устойчивости ввиду малого количества точек измерения, которое в то же время является максимальным для применяемого прибора. Соответственно, после скачка напряжений показания измерительного прибора не могут быть использованы для оценки состояния модели. Поскольку работа цилиндрической оболочки после потери устойчивости (закритическая стадия) не является предметом данного исследования, указанная особенность принимается к сведению без уточнения методики проведения эксперимента.

Следовательно, определение момента потери устойчивости оболочки целесообразно определять при помощи второго подхода (визуальный контроль) с учётом показаний приборов до появления существенных скачков напряжений. Показания вакуумметра и прибора ОВЕН МВ110-224.4ТД синхронизировались со временем видеозаписи, далее фиксировался момент потери устойчивости оболочки, который происходит в виде «хлопка» за доли секунды. Применяемая видеокамера выполняет 30 кадров записи в секунду, что позволяет установить момент потери устойчивости с точностью до секунды.

Определив точное время потери устойчивости и убедившись в наличии скачка напряжений, в указанный промежуток времени, согласно электронным таблицам обработки эксперимента, определяется величина основных параметров напряжённого состояния в ближайший зафиксированный момент до потери

устойчивости. Поэтому в пунктах 2.4.1. – 2.4.3. приводятся графики возрастания напряжений до момента потери устойчивости по времени.

Ниже рассмотрены результаты испытания и обработка результатов эксперимента по каждой модели.

#### **2.4.1. Результаты испытания модели №1**

Общий вид готовой к испытанию установки в сборе для модели № 1 приведен на рисунке 2.12. Вакуумный насос, сама модель, измерительный прибор ОВЕН МВ-110 находились на разных (не соприкасающихся) поверхностях, чтобы исключить влияние вибраций на показания приборов. В помещении, где проводилось испытание, на время его проведения, обеспечивалось отсутствие сквозняков, перепадов температур и ударных вибраций на исследуемую модель. Для обеспечения минимального натяжения проводов, идущих непосредственно к тензодатчикам, применялся противовес, который поддерживал компенсационную планку.



Рисунок 2.12. Установка в сборе - испытание модели №1.

Следуя процедуре обработки результатов эксперимента, была проведена группировка данных в зависимости от вида измеряемых напряжений. Из каждой полученной группы датчиков определены попадающие в зону образования вмятин, а также отброшены явно выдавшие ошибочные результаты

(отличающиеся как минимум на порядок по сравнению со средними). Далее для выбранных датчиков по каждой группе были построены графики возрастания напряжений во времени.

На рисунке 2.13 изображены графики изменения кольцевых и меридиональных напряжений для выбранных датчиков модели №1 (условно идеальная оболочка). 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.

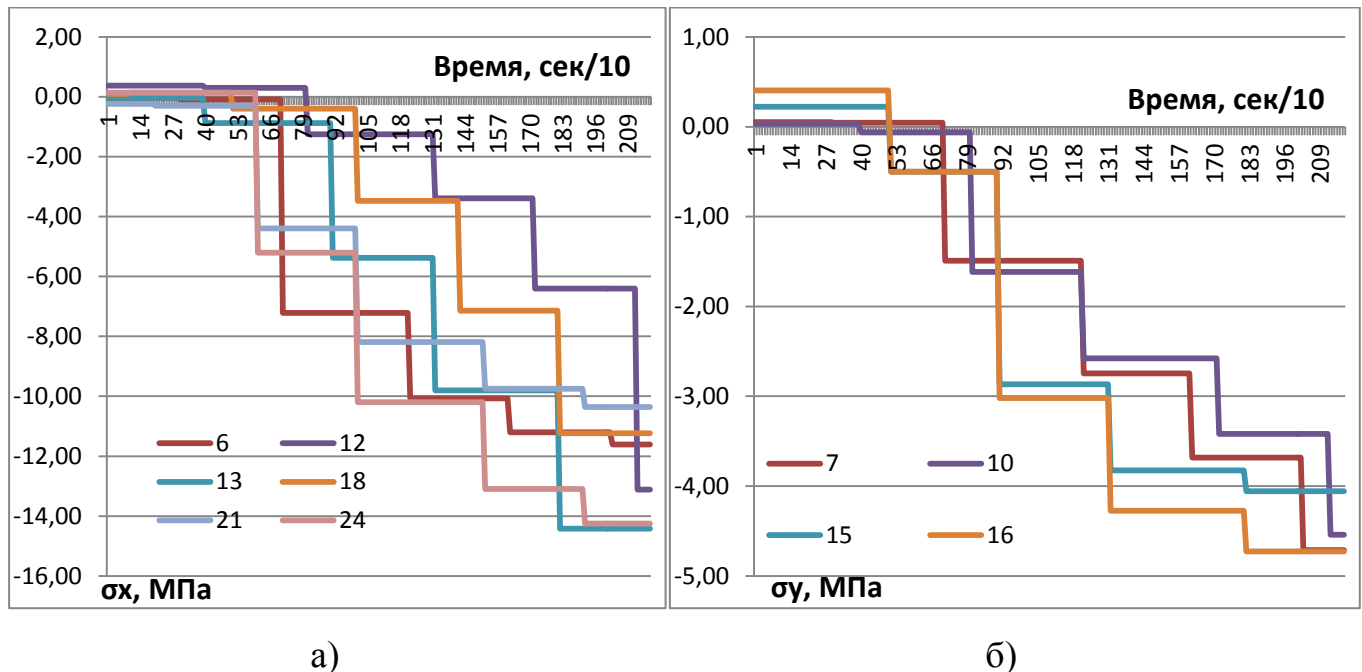


Рисунок 2.13. Экспериментальные значения напряжений в модели №1: а - кольцевые, б – меридиональные.



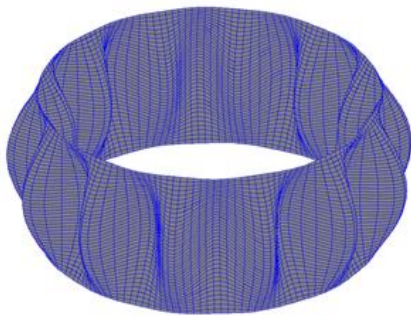
На графиках цифры 6-24 это номера датчиков, для которых построена ломаная линия. Как отмечено ранее, момент потери устойчивости был определён визуально и с помощью видеокамеры зафиксировано время в секундах от момента запуска насоса. После синхронизации времени видеозаписи и показаний прибора на графиках была определена точка на оси абсцисс, где следует закончить построение графиков. Поскольку показания с датчиков фиксируются последовательно, для дополнительного контроля было оценено наличие скачков напряжений в зоне окончания графиков с учётом возможной вариации по оси

абсцисс  $\pm 1$  сек. В результате были определены точные значения кольцевых и меридиональных напряжений в момент, предшествующий потере устойчивости цилиндрической оболочки. Если не обрывать графики, можно увидеть скачок напряжений в 5 – 10 раз, после которого диапазон измерений прибора не позволяет зафиксировать их критические значения.

Основными экспериментальными данными, которые следует извлечь, является НДС оболочки в момент потери устойчивости. Поэтому для удобства анализа результаты проведения эксперимента, а также сравнение основных исследуемых величин приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Сравнение результатов исследования экспериментальных и численных моделей оболочек под действием внешнего давления (модель №1)

Экспериментальная модель (напряжения и форма потери устойчивости)		Напряжения и форма потери устойчивости, полученные в ЛИРА-САПР 2015 r4
До испытания	После испытания	
	 $\sigma_x$ : 13.1 МПа; $\sigma_y$ : 6.9 МПа;	 $\sigma_x$ : 13.35 МПа; $\sigma_y$ : 6.1 МПа;

Показаны три характерных изображения модели оболочки, из них два - это фото экспериментальной модели №1 (до и после испытания) и форма потери устойчивости численной модели. Там же приведены итоговые теоретические и экспериментальные значения кольцевых ( $\sigma_x$ ) и меридиональных ( $\sigma_y$ ) напряжений для нагрузки, являющейся критической. Итоговые значения экспериментальных напряжений определялись как средние предельные значения, полученные соответственно для кольцевых и меридиональных напряжений из графиков на рисунке 2.13.

Для определения численных значений напряжений, приведенных в таблице 2.1, использовалось значение давления в момент, непосредственно



предшествующий потере устойчивости. Указанная величина определена по показаниям измерительного прибора вакуумметра, фиксировалась нагрузка при помощи видеокамеры. Далее полученное значение нагрузки прикладывалось к расчётной модели и, выполняя расчёты для различных вариаций задания нагрузки, краевых условий и шага разбиения сетки конечных элементов, определялись такие параметры модели, при которых сходимость по напряжениям между теорией и экспериментом оказывалась наибольшей. Варьировалось количество элементов по длине окружности, по высоте их количество принималось таким, чтобы отношение между сторонами КЭ не превышало рекомендуемого [15].

Некоторые рассматриваемые характерные варианты численной модели и величины значений кольцевых напряжений ( $\sigma_x$ ) для них приведены в таблице 2.2. Аналогичные расчёты выполнялись также и для меридиональных напряжений

Таблица 2.2.

Определение параметров численной модели, обеспечивающих наилучшую сходимость с результатами экспериментальных исследований

№	Варианты численного моделирования экспериментальной установки в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4	Отличие в % от экспериментальных значений $\sigma_x$ при количестве элементов по длине окружности				
		160	300	400	480	600
1	Шарнирное закрепление по контуру в каждом узле, без моделирования крышки и днища	17,1	15,3	13,6	12,4	12,1
2	Жёсткое закрепление по контуру в каждом узле, без моделирования крышки и днища	9,2	6,2	4,9	4,2	4,1
3	Жесткий стык стенки с крышкой и дном с запретом перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях в каждом узле стыка днища и стенки	10,2	8,4	8	7,7	7,8
4	Жесткий стык стенки с крышкой и дном с запретом перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях в четырёх крайних узлах стыка стенки и днища	4,5	2,8	2	1,6	1,6
5	Жесткий стык стенки с крышкой и дном с запретом перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях в трёх крайних узлах стыка стенки и днища	6	4,7	3,4	2,5	2,5



Как видно из таблицы 2.2, наименьшее расхождение обеспечивает вариант № 4 при количестве элементов не менее 480 по длине окружности. Для обеспечения минимальных затрат времени компьютерного расчёта дальнейшее уменьшение сетки КЭ нецелесообразно, и указанный вариант принят в качестве расчётного и обеспечивающего минимальное расхождение. Выбранный вариант оказался допустимым и при сравнении экспериментально зафиксированных меридиональных напряжений с результатами численного анализа. Базирование выбора параметров конечно-элементной модели на основе результатов для кольцевых напряжений основано на их определяющем воздействии в дальнейших численных исследованиях рационального расположения колец жесткости.

Для выбранного варианта значение критической величины давления в программе ЛИРА-САПР 2015 r4 вычислялось с использованием величины коэффициента запаса устойчивости цилиндрической стенки, который позволяет найти теоретическое значение критического давления, соответствующее моменту потери устойчивости, что будет использовано позже для вычисления приращений критического давления при различных конструктивных вариантах стенки.

Теоретическая и экспериментальная формы потери устойчивости для модели № 1 имеют схожую форму, однако количество волн в случае конечно-элементной модели оказалось несколько больше.

Также важным вопросом является необходимость учёта геометрической нелинейности при постепенном приложении нагрузки. Однако указанная особенность проявляется и требует учёта в первую очередь в случае оболочек, имеющих начальные несовершенства, а в случае модели № 1 эффект от применения геометрически нелинейного расчёта не привёл к уточнению результатов. Следовательно, геометрически нелинейный расчёт рассматривался подробно только для модели №3.

#### **2.4.2. Результаты испытания модели №2**

Для модели №2 (оболочка усиленная кольцом жёсткости) последовательность проведения эксперимента аналогична модели №1. Поскольку для потери устойчивости усиленной стенкой оболочки требуется увеличенное, по

сравнению с первым испытанием, значение величины нагрузки от вакуума, была выполнена дополнительная герметизация швов и технических примыканий. В остальном составляющие испытательного оборудования идентичны модели №1. Общий вид собранной и готовой к испытанию установки изображён на рисунке 2.14. Особенности крепления и параметры кольца приведены в пункте 2.2.2.

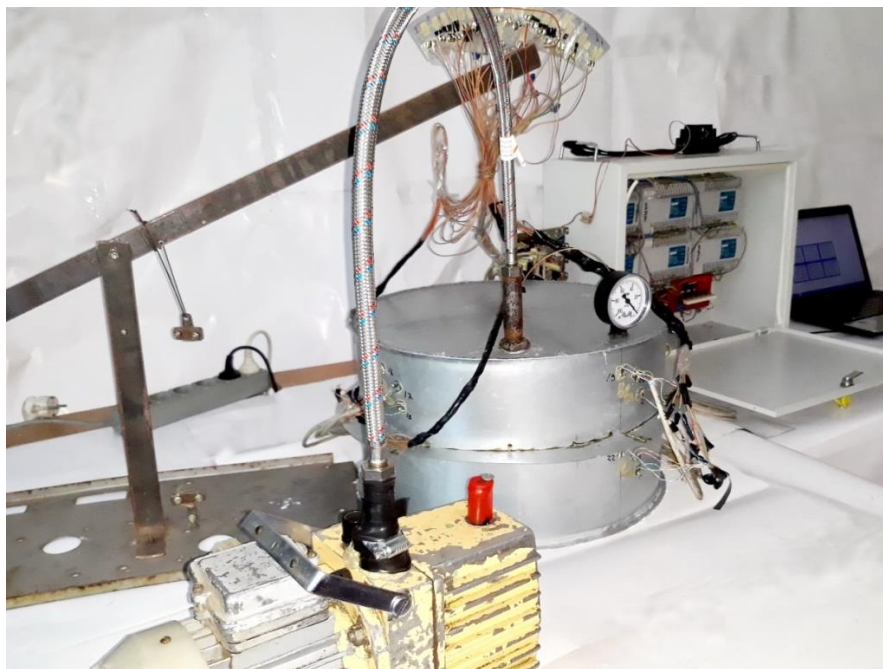


Рисунок 2.14. Установка в сборе - испытание модели № 2.

Графики изменения кольцевых и меридиональных напряжений до момента потери устойчивости стенки модели №2 для характерных датчиков изображены на рисунке 2.15.

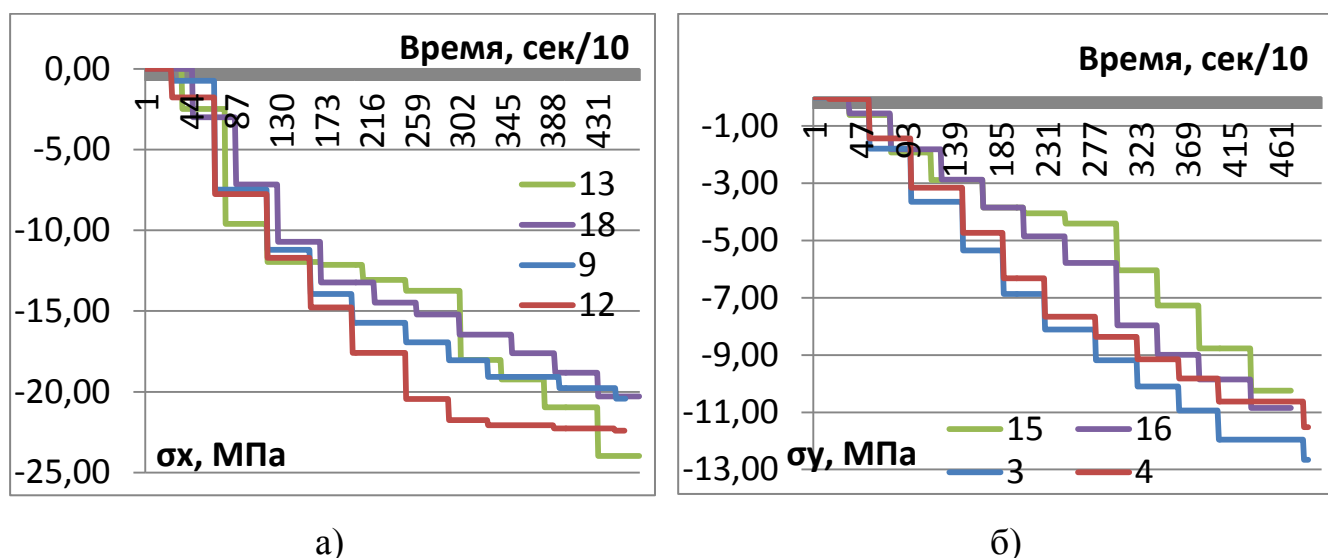




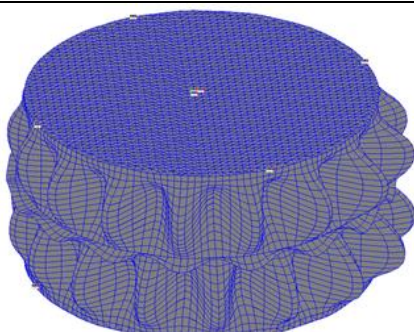
Рисунок 2.15. Экспериментальные напряжения в модели №2: а - кольцевые, б – меридиональные

Характерные группы датчиков были определены аналогично первой модели. Также было зафиксировано время от запуска двигателя до момента потери устойчивости и составило 45.1 секунд.

На графиках и в таб. 2.3 в качестве итоговых рассматриваются значения кольцевых ( $\sigma_x$ ) и меридиональных ( $\sigma_y$ ) напряжений в момент, непосредственно предшествующий потере устойчивости, произошедший до отрыва кольца.

Таблица 2.3.

Сравнение работы экспериментальных и численных моделей оболочек под действием внешнего давления (модель №2)

Экспериментальная модель (напряжения и форма потери устойчивости)		Напряжения и форма потери устойчивости, полученные в ЛИРА-САПР 2015 r4
До испытания	После испытания	
	 $\sigma_x$ : 23.2 МПа; $\sigma_y$ : 11.7 МПа;	 $\sigma_x$ : 24.8 МПа; $\sigma_y$ : 13.5 МПа;

Экспериментальная форма потери устойчивости, как и в первом опыте, оказалась близкой к полученной методом конечных элементов в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4. Также можно отметить, что в некоторых точках произошёл отрыв усиливающего кольца, однако это произошло после наступления момента потери устойчивости. Отрыв сопровождался образованием новых волн потери устойчивости близких по своим параметрам для оболочки без усиления.

Значение теоретических напряжений вычислялось для условий закрепления и сетки КЭ, определённых в первом опыте, однако в испытании № 2 рассматривался вопрос обеспечения сходимости экспериментальных и теоретических напряжений в зависимости от способа моделирования кольца жёсткости. Поскольку задачи исследования напрямую связаны с моделированием множества вариантов расположения колец, были рассмотрены все возможные способы и определено расхождение между экспериментальными и

теоретическими значениями кольцевых напряжений – таблица 2.4. Возможные варианты определены из практических соображений из различных случаев моделирования опорного и промежуточных колец жёсткости ВЦР в исследованиях других авторов [49, 85, 88]. Для численных исследований принималось среднее значение напряжений, зафиксированных в точках крепления тензодатчиков на реальной модели.

Таблица 2.4.

Расхождение величин теоретических и экспериментальных значений кольцевых напряжений при различных вариантах моделирования колец жёсткости.

№	Варианты численного моделирования кольца	Значение $\sigma_x$ , МПа	Отличие от экспериментального, %
1	КЖ задаётся в виде стержня с заданной жёсткостью	21,1	8,2
2	КЖ моделируются запретом горизонтальных перемещений в узлах его предполагаемого стыка со стенкой	20,06	13,53
3	КЖ моделируется КЭ №44 в полную величину.	24,8	7,1

По результатам, приведенным в таблице 2.4, было определено, что моделирование фактической геометрии и жёсткости кольцевого ребра позволяет обеспечить максимально достоверные результаты при сравнении с экспериментальными данными. Таким образом, указанный вариант моделирования усиливающих колец будет применяться для дальнейших численных исследований их рационального расположения.

С учётом полученных уточнений экспериментальная критическая нагрузка была приложена на численную модель оболочки №2, определён КЗУ цилиндрической стенки и соответствующее ему теоретическое критическое давление.

### 2.4.3. Результаты испытания модели №3

Завершающим этапом испытаний является исследование влияния на устойчивость цилиндрической стенки наличия рассматриваемого типа дефекта в виде угловатости монтажного сварного шва. Для проверки адекватности

предварительных численных расчётов оболочки с таким дефектом следует смоделировать его экспериментально и оценить изменения в работе конструкции.

Общий вид готовой к испытанию установки модели № 3 с дефектом изображён на рисунке 2.16. Поскольку моделирование дефекта с параметрами, близкими к реально существующим, является технологически сложной задачей, кроме того, ввиду малого размера самой модели зарегистрировать влияния наличия такого дефекта применяемыми измерительными приборами достаточно сложно. Поэтому, размер дефекта был принят с большими значениями, что, согласно предварительным расчётам, повышает устойчивость стенки. Причиной такого явления служит большая жёсткость углового шва. Однако основной задачей эксперимента является верификация численной модели, поэтому эта особенность не противоречит цели исследования.



Рисунок 2.16. Установка в сборе - испытание модели №2.

Значения кольцевых и меридиональных значений напряжений для модели № 3 приведены на рисунке 2.17. Как и в предыдущих случаях, рассматривались группы датчиков в зависимости от типа измеряемого напряжения и расположения на оболочке после потери устойчивости. При этом следует отметить минимальное отличие в средних значениях между группами датчиков по виду расположения.



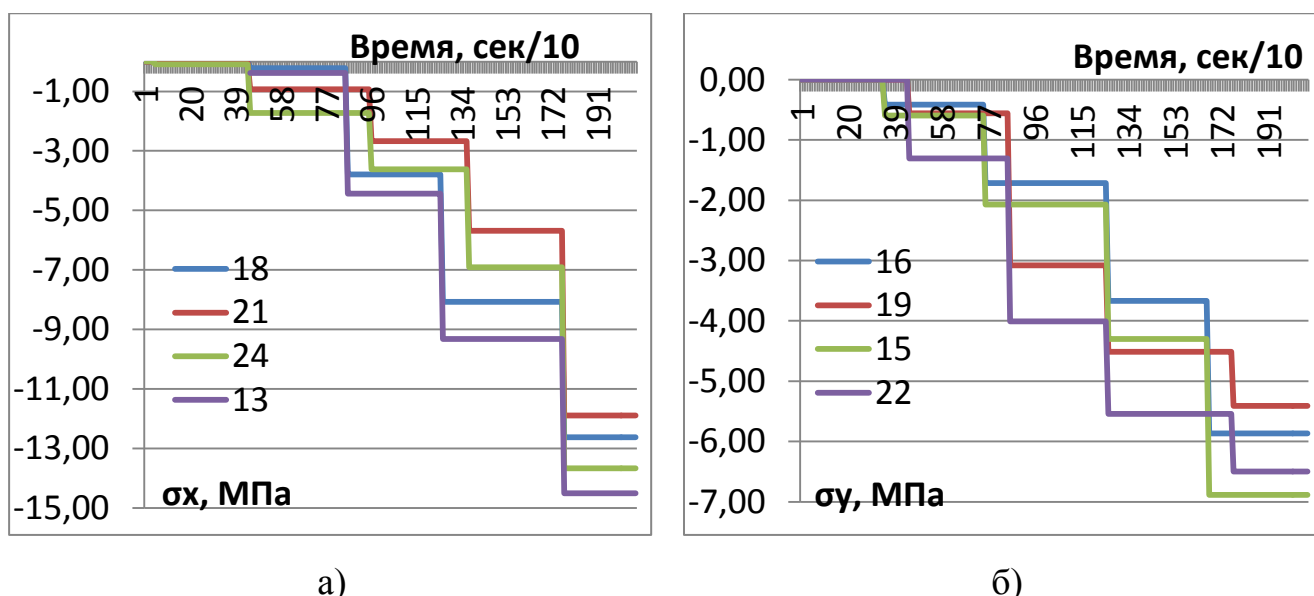


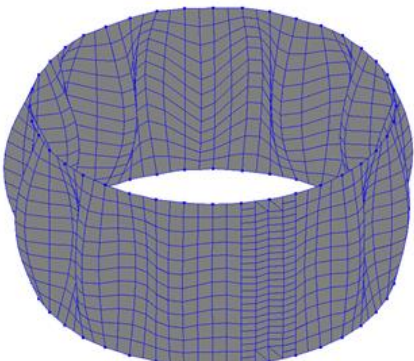


Рисунок 2.17. Экспериментальные напряжения в модели №3: а - кольцевые, б – меридиональные.

Итоговые значения кольцевых ( $\sigma_x$ ) и меридиональных ( $\sigma_y$ ) напряжений оказались несколько выше, чем результаты для испытания модели № 1 (оболочка без дефектов и несовершенств). Фактическая форма потери устойчивости соответствует теоретической – таблица 2.5.

Таблица 2.5.

Сравнение работы экспериментальных и численных моделей оболочек под действием внешнего давления (модель №3)

Экспериментальная модель (напряжения и форма потери устойчивости)		Напряжения и форма потери устойчивости, полученные в ЛИРА-САПР 2015 r4
До испытания	После испытания	
	 $\sigma_x$ : 13.2 МПа; $\sigma_y$ : 6.2 МПа.	 $\sigma_x$ : 13.4 МПа; $\sigma_y$ : 6.3 МПа.

Общее время от запуска насоса до потери устойчивости составило 19.5 секунд, это несколько меньше, чем для модели №1. Этот факт обусловлен применением более эффективных герметизирующих составов для швов, которые в свою очередь обеспечили более быстрое достижение необходимого для потери устойчивости значения вакуума.

Как отмечалось ранее, для рассматриваемого случая оболочки с дефектом имеет смысл провести геометрически нелинейный расчёт для определения степени его влияния на итоговые результаты. Указанный тип расчёта позволяет учитывать постепенные деформации стенки после каждого шага нагружения и, соответственно, учесть возможные локальные эффекты при приложении нагрузки к стенке с обновляемой геометрией. Используя стандартные возможности комплекса ЛИРА-САПР 2015 r4 для нелинейных расчётов, экспериментальная критическая нагрузка задавалась в четырёх вариантах и сравнивались значения максимальных напряжений по сравнению с первым вариантом задания нагрузки – таблица 2.6.

Таблица 2.6.

Сравнение максимальных значений кольцевых напряжений в стенке при различных вариантах приложения нагрузки

№	Количество шагов нагрузки	Кольцевые напряжения $\sigma_x$ , МПа	Отличие, %
1	1 - линейный расчёт	13,4	0
2	5	13,59	1,4
3	10	13,66	1,9
4	20	13,67	2

Полученные данные позволили сделать вывод о возможности уточнения напряженного состояния конструкции, однако отличие не превысило 2%. Такое незначительное расхождение может быть обосновано не случайным характером несовершенства, а его регулярной формой. Угловатость вертикального монтажного сварного шва не является классической формой несовершенства в виде вмятины произвольной формы, а имеет чёткие очертания и габариты почти на всю высоту стенки, вследствие чего, как и в случае с оболочкой без дефектов, геометрически нелинейный расчёт показывает минимальное отличие в

напряжениях по сравнению с линейным. Кроме того, значительно повышается трудоёмкость расчёта, поскольку расчёт на устойчивость следует выполнять с учётом новой геометрической формы оболочки, образующейся после каждого шага приложения нагрузки. Соответственно для дальнейших численных исследований рационального расположения шага колец будет рассматриваться классический вариант приложения всей нагрузки в полном объёме в одном загрузении.

Для полученной численной модели, используя экспериментальное значение критической нагрузки в комплексе ЛИРА-САПР 2015 г4, было определено значение КЗУ цилиндрической стенки и соответствующее теоретическое значение критического внешнего давления.

#### **2.4.4. Анализ характерных закономерностей результатов испытаний**

По результатам испытания проведено сравнение возникающих напряжений и критической силы потери устойчивости. Сравнение возникающих напряжений приводится в таблице 2.7. Анализируются значения кольцевых  $\sigma_x$  и меридиональных  $\sigma_y$  как основных при исследуемом напряжённом состоянии. Напряжения получены из экспериментальных данных, теоретической формулы для расчёта напряжений, результатов расчёта в комплексе ЛИРА-САПР 2015 г4.

Рассматривались три основных группы датчиков для каждого эксперимента, средние значения напряжений по которым внесено в таблицу 2.4. Группы формировались исходя из положения датчика относительно волны потери устойчивости, а также в зависимости от нагрузки, при которой произошла потеря устойчивости. Говоря о различной нагрузке, имеется ввиду, что фактическая потеря устойчивости происходила не одновременно по всей длине оболочки, в частности для модели № 1 часть оболочки потеряла устойчивость при внешнем давлении  $P=28$  кН, а остальная часть при давлении  $P=30$  кН в пределах одного испытания. Аналогичная ситуация наблюдалась для оболочки № 3. Тем не менее, поскольку разбег между значениями критической нагрузки в пределах одного эксперимента минимальный и не превышает 5%, допустимо считать среднее



значение нагрузки потери устойчивости как критическое значение для всей оболочки.

Далее, определив для каждой группы среднее значение нагрузки потери устойчивости и подставив полученное значение в известные формулы для определения осевых и кольцевых напряжений в безмоментной оболочке, были вычислены теоретические значения напряжений, которые должны возникать. Для точного решения данная формула подходит только для первой модели, поскольку в остальных имеются дефекты и усиления, приводящие к отличному от безмоментного состояния. Однако для целей принципиальной проверки результатов расчёта точности такого решения вполне достаточно. Также полученная критическая нагрузка  $P$  каждой из моделей была приложена к конечно-элементной модели и определены максимальные напряжения в комплексе ЛИРА-САПР 2015 г4. В таблице 2.7 отличие значений напряжений оценивались в процентах от экспериментальных величин.

Таблица 2.7

## Итоговые результаты испытаний (сравнение по напряжениям)

Метод определения величин		№ 1 (идеальная оболочка)			№ 2 (с кольцом)			№ 3 (с дефектом)		
		$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$P$ , кН	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$P$ , кН	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$P$ , кН
Эксперимент	Группа 1	12.2	6.8	29	22.3	11.4	54	11.84	5.417	31.5
	Группа 2	13.1	6.4	29	22.8	11.1	54	12.96	6.2	31.5
	Группа 3	14.1	7.4	30	24.4	12.73	54	14.7	7.05	33
	Средние:	13.1	6.9	29.3	23.2	11.7	54.0	13.2	6.2	32.0
Безмоментная теория		11.7	5.9	29.3	21.6	10.8	54	12.8	6.4	32.0
Отличие, %		10.7	14.6		6.8	8.0		2.8	2.9	
МКЭ (ЛИРА- САПР)		13.35	6.1	29.3	24.8	12,9	54	13.4	6.3	32.0
Отличие, %		1.6	11.2		7.1	9.8		1.8	1.2	

Определение значения внешнего давления, при котором происходит потеря устойчивости, выполнялось для каждой модели по каждой группе

датчиков. Как видно из таблицы 2.7, расхождение между теоретическими и экспериментальными напряжениями не превысило 11,2%. Также определено для модели №1 среднее значение критического давления  $P=29.3$  кН, для модели №2  $P=54$  кН, для модели №3  $P=32$  кН. Указанные нагрузки были заданы на соответствующие конечно-элементные модели оболочек, выполненные в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 с учётом условий, обеспечивающих наилучшую сходимость по напряжениям. Далее в указанном программном комплексе был выполнен расчёт на устойчивость и определен коэффициент запаса устойчивости (в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 КЗУ определяется как отношение допустимого внешнего давления (критического давления) к заданному расчетному). Таким образом из описанного соотношения были определены теоретические значения критического внешнего давления для каждой конечно-элементной модели.

Отношения критических нагрузок для рассматриваемых конструктивных вариантов к критической нагрузке для идеальной оболочки приведены в таблице 2.8. Указанные отношения приведены для усреднённых экспериментальных, а также численно полученных значений критических нагрузок потери устойчивости.

Таблица 2.8

Сравнение КЗУ через значения критической силы потери устойчивости

Источник данных	Приращение $P_{кр}$ в сравнении с конструктивным вариантом №1		
	№ 1 (идеальная оболочка)	№ 2 (с кольцом)	№ 3 (с дефектом)
Эксперимент	1	1,87	1,08
МКЭ (ЛИРА-САПР)	1	1,82	1,12
Отличие от МКЭ, %	0	2,7	3,7

Из полученных данных в таблице 2.8 определено, что отличие между теоретическими и экспериментальными значениями приращений критической нагрузки потери устойчивости для модели, усиленной кольцом жёсткости, по отношению к  $P_{кр}$  для оболочки без усиления составляет 2,7%. Аналогичный показатель для модели с дефектом по отношению к  $P_{кр}$  для оболочки идеальной

геометрии составил 3,7%. Таким образом, пропорциональность изменения численно определённых значений критической нагрузки потери устойчивости минимально отличается от экспериментальных значений, что позволяет сделать вывод об адекватности учета кольцевого усиления и рассматриваемого дефекта в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 при действии равномерного внешнего давления.

## **2.5. Создание конечно-элементной модели на основе результатов экспериментальной верификации**

Для аналитических расчётов НДС и устойчивости стенки ВЦР учёт реального распределения ветрового потока возможно выполнить только методом его приведения к эквивалентному упрощённому. Однако расчёт напряжений и КЗУ методом конечных элементов имеет одинаковый принцип и алгоритм вне зависимости от формы внешнего давления. Следовательно, в случае определения параметров конечно-элементной модели, при которых обеспечивается достаточная сходимость результатов расчёта с экспериментальными значениями, адекватными можно считать данные, которые будут получаться как в случае равномерного внешнего давления, так и фактического распределения ветрового потока. Соответственно, полученную модель возможно использовать для поиска оптимального расположения колец жесткости исходя из обеспечения максимального КЗУ.

Применение комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4 обусловлено возможностью вычисления коэффициента запаса устойчивости в отдельном элементе модели [10]. Это важно, поскольку полностью смоделированная кровля, промежуточные и опорные кольца могут позволить выявить дополнительные сведения о работе конструкции. При этом КЗУ вычисляется только для интересующего нас элемента.

Для выполнения численных исследований в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 будут моделироваться различные резервуары объёмом от 20 до 30 тысяч м<sup>3</sup> с высотой стенки от 12 до 18 метров. При этом все модели будут основываться на результатах п. 2.4. и иметь общую структуру и принципы моделирования,

отличаясь лишь поперечным сечением составляющих конструкций и размерами. Выдержки из пункта 2.4 касательно обоснования требуемых параметров конечно-элементной модели приведены ниже.

В пункте 2.4.1. по результатам исследования конечно-элементной и экспериментальной модели №1 определено минимально необходимое количество конечных элементов по длине окружности. Для рассматриваемого типа конструкций размер КЭ в направлении по длине окружности должен быть не более  $1/480$  от её длины. Также приведено сравнение различных вариантов моделирования стыка стенки и торцевых элементов резервуара, способов закрепления и допустимых перемещений. Было определено, что жесткий стык стенки с крышкой и днищем с запретом перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях в четырёх крайних узлах днища является наиболее подходящим вариантом. С учётом указанного числа КЭ расхождение с экспериментальными значениями напряжений не превысило 11,2 %.

В пункте 2.4.2. для случая оболочки, усиленной кольцом жёсткости, было проведено сравнение экспериментальных и численных значений возникающих напряжений в зависимости от способа моделирования кольцевого ребра жёсткости. В результате определено, что максимальная сходимость величин напряжений обеспечивается при объёмном моделировании кольца жесткости. В таком случае максимальное расхождение исследуемых величин не превысило 7,1%.

В пункте 2.4.3. для случая оболочки, имеющей геометрическое несовершенство, определялся подбор типа конечного элемента. Выбор проводился на основе сравнения итоговых значений напряжений при геометрически линейном и нелинейном расчётах. Рассматривалось различное количество шагов нагрузки. В результате определено, что в случае наличия рассматриваемого дефекта, глубина которого является постоянной по высоте стенки, отличие между экспериментальными и теоретическими (полученными из геометрически нелинейного расчёта) величинами итоговых значений напряжений не превышает 2%. Следовательно, в качестве основного типа конечного элемента

стенки резервуара будет приниматься КЭ №44 используемый для линейного расчёта.

Все указанные особенности работы оболочки под внешним давлением, полученные в пунктах 2.4.1. – 2.4.3, позволили обеспечить минимальное расхождения между приращениями критической нагрузки потери устойчивости, определённой теоретически и экспериментально по отношению к критической нагрузке для идеальной оболочки. Учитывался также опыт создания КЭ моделей ВЦР другими авторами [68, 98, 111, 113]. Далее они были учтены при создании основной численной расчётной модели для дальнейших исследований. Основные параметры принятой расчётной модели приведены в пункте 2.5.1.

#### **2.5.1. Структурные составляющие принятой конечно-элементной модели**

Структурные составляющие одного из вариантов принятой конечно-элементной модели приведены в таблице 2.9. Поперечные сечения, габариты, сетка ребристо-кольцевого купола и другие элементы отличаются в зависимости от рассматриваемого объёма резервуара.

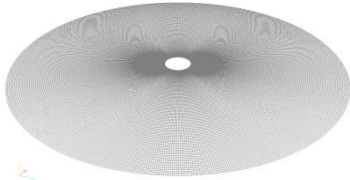
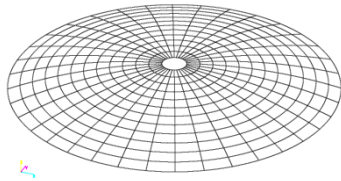
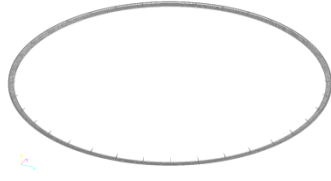
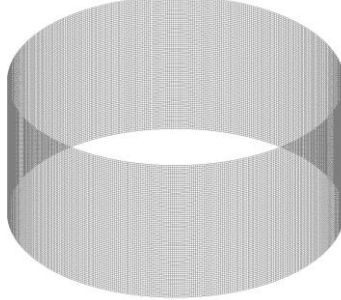
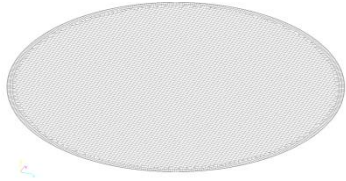
Поскольку по результатам экспериментальной верификации была определена необходимость моделирования несущих элементов в объёмной постановке, то опорное и промежуточные кольца задавались пластинчатыми элементами №44 в полном размере с учётом вертикальных участков и промежуточных подкрепляющих рёбер – КЭ №42. Общий вид поперечного сечения кольца жёсткости приведён на рисунке 3.1 раздела 3.

Для получения полноценной работы конструкции ребристо-кольцевой купол покрытия моделировался в виде стержневых элементов, поверх которых выполнялась сетка конечных элементов – покрытие. В местах стыка несущих рёбер сферического купола с опорным кольцом выполнялось объединение перемещений для моделирования реальной работы конструкции. Отверстие на верхней части модели выполнено для исключения ошибок расчёта, поскольку КЭ элементы в указанной области имеют недопустимое соотношение сторон.

Все рассматриваемые резервуары имеют габариты согласно типовым проектам, соответственно сечения опорных колец, конструкций покрытия и других моделируемых элементов также принимались типовыми. Толщины цилиндрической стенки и колец жёсткости для отдельных расчётов пересматривались либо рассчитывались согласно требованиям СП 16.13330.2011 [65]. Для стенки применялся КЭ №44, количество элементов по длине окружности исходя из данных, полученных при экспериментальной верификации, составляло не менее 480. По высоте количество элементов определялось требованием соблюдения отношения между сторонами КЭ.

Таблица 2.9.

## Структурные составляющие принятой конечно-элементной модели

Элемент модели	Графическое изображение
Покрытие: пластины КЭ №44	
Рибристо-кольцевой купол: стержни (сечение согласно ТП) КЭ №10	
Опорное и промежуточные кольца: пластины КЭ №42, 44	
Стенка переменной толщины: пластины КЭ №44	
Днище: пластины КЭ №42, 44. Закреплено от перемещений в четырёх точках. Считается жёстким.	

Учёт податливости основания может внести существенные коррективы в НДС оболочки особенно в зоне стыка днища и стенки [45]. Однако наибольшее влияние этот эффект имеет от действия гидростатической нагрузки при расчётах на прочность. В то же время, при проверке устойчивости стенки расчётным является сочетание нагрузок ветра и вакуума. Также в реальной конструкции при наличии вакуума осевое давление на стенку от днища не оказывается. Следовательно, для данного исследования все узлы днища могут считаться закрепленными от вертикальных перемещений, а также, согласно результатам экспериментальной верификации модели, четыре крайних узла днища необходимо закрепить от горизонтальных перемещений. Кроме КЭ №44 при моделировании днища применялся КЭ №42 в местах примыкания днища к стенке.

#### **2.5.2. Моделирование рассматриваемого дефекта**

Как уже отмечалось ранее, рассматривается дефект в виде угловатости вертикального монтажного сварного шва, фото и изображения смоделированного дефекта приведены в разделе 4. В обзоре литературы приведены данные о распространённости и актуальности учёта таких дефектов в реальных конструкциях. В данном пункте отмечены лишь некоторые особенности его моделирования с учётом имеющегося опыта КЭ исследования цилиндрических оболочек с локальными дефектами формы [95, 111]. В указанных работах используется сгущение сетки в зоне расположения дефекта без изменения отношения между сторонами конечных элементов.

Вмятина в виде угловатости моделируется смещением узлов, при этом сама сетка конечных элементов сгущается в два раза по сравнению с остальной стенкой. Применяется аналогичный КЭ №44, как и для стенки. Принципы задания нагрузки на участки стенки с изменённой геометрией также не отличаются. Направление ветрового давления направляется по нормали к плоскости КЭ дефекта. Возможная перемена глубины дефекта по высоте стенки не учитывалась, за исключением выхода на нулевую глубину на расстоянии 150 мм от верха и низа стенки, что соответствует реальным объектам.

### 2.5.3. Моделирование расчётного сочетания нагрузок

Рассмотрено сочетание нагрузок для расчёта на устойчивость. В случае других расчётов действующие нагрузки будут оговариваться отдельно.

Поскольку постановка колец жёсткости повышает кольцевые критические напряжения, для ограничения круга решаемых задач в качестве нагрузок приняты только те, которые вызывают определяющее воздействие на величину кольцевых напряжений. Такими нагрузками будет сочетание ветра и вакуума. Коэффициенты сочетания нагрузок и надежности учитываться не будут, поскольку это не является предметом исследования в данной работе.

Расчётная величина вакуума для такого типа конструкций равна 0,25 кПа [73-76]. При больших значениях должны срабатывать аварийные клапаны сброса. Поэтому в данном исследовании эта величина будет фиксированной.

Одним из ключевых моментов данной работы является учёт реальной эпюры ветрового давления при поиске оптимального положения колец жёсткости, что позволит уточнить существующую методику, основанную на формуле Папковича-Мизеса. При этом анализ нормативных документов [66, 93] по сбору нагрузок показал, что форма распределения ветрового потока по длине окружности (рисунок 2.18а) остаётся постоянной при скоростях ветра до 50 м/с. Изменяется лишь величина самой нагрузки пропорционально для каждой точки. Проведенные предварительно численные расчёты стенки при действии различной ветровой нагрузки показали, что её устойчивость изменяется пропорционально изменению скорости ветра для случая одинаковой формы распределения. Поэтому в качестве основного значения ветрового давления принята нагрузка, равная 500 Па.

Поскольку ветровая нагрузка имеет сложную в плане и по высоте форму распределения для её ручного задания на оболочку, состоящую из более чем 30 тысяч элементов, потребуются существенные временные затраты. Учитывая большое количество различных моделей, ветровая нагрузка задавалась через текстовый файл. Результат такого сбора для характерного поперечного сечения цилиндрической оболочки приведён на рисунке 2.18б. Общие принципы задания



нагрузки через текстовый файл для программы SCAD Soft приведены в работе [81]. Пример сбора ветровой нагрузки в комплексе ЛИРА-САПР 2015 г4 для одного из рассматриваемых типоразмеров резервуаров приведён в приложении А.

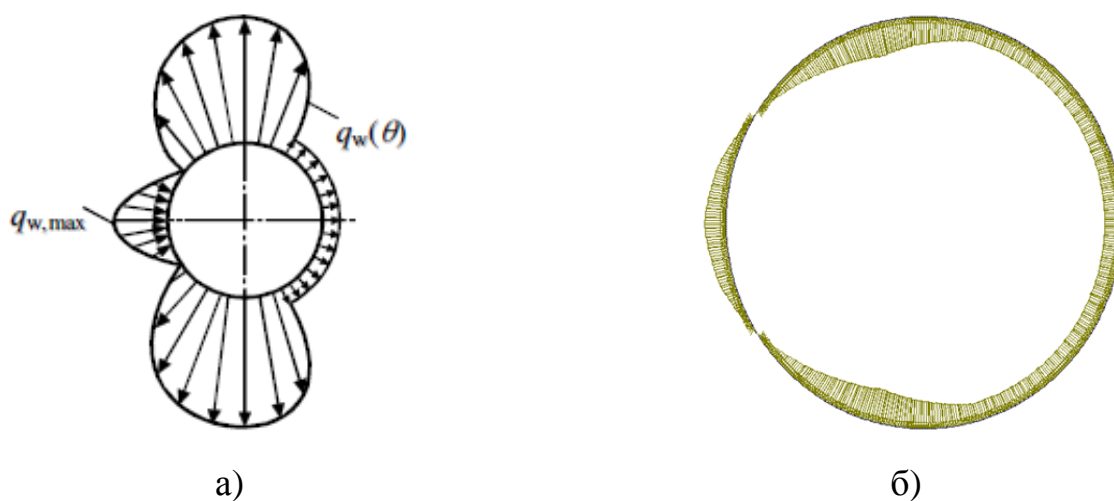


Рисунок 2.18. Эпюра ветрового давления на стенку резервуара: а - нормативное распределение ветрового потока; б - смоделированная ветровая нагрузка в комплексе ЛИРА-САПР 2015 г4.

Также важно отметить, что некоторые авторы затрагивают вопрос отличающегося распределения ветрового потока на стенку и кровлю вертикальных цилиндрических резервуаров, находящихся в группе [30, 46, 50, 120]. При этом нахождение в группе приводит как к локальному увеличению, так и к уменьшению фактической нагрузки от ветра для конкретно расположенного резервуара. В большинстве нормативных документов указанный эффект учитывается коэффициентами безопасности. Поскольку результатом данного исследования не является уточнение коэффициентов безопасности, возможное отличающееся распределение ветрового потока от нормативного не учитывается.

После получения верифицированной модели можно перейти к следующим задачам исследования.

## 2.6. Выводы по второй главе

Разработанная методика и проведенные экспериментальные исследования устойчивости оболочек моделей стенок вертикальных цилиндрических резервуаров в трёх конструктивных вариантах позволили установить следующее:

1. Адекватность экспериментально зафиксированных компонентов напряженного состояния всех испытанных типов моделей оболочек результатам расчёта на устойчивость в комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 позволяет подтвердить корректность сформированных конечно-элементных моделей и возможность их использования при проведении дальнейших численных исследований. По результатам теоретических и экспериментальных исследований расхождение основных составляющих напряжённого состояния при соответствующей нагрузке не превысило 7,1 % для кольцевых и 11,2% для меридиональных напряжений.

2. Значения параметров и характеристик численных моделей резервуара, обеспечивающих хорошую сходимость с экспериментальными данными при расчёте на устойчивость оболочечных конструкций.

3. На основе проведённой экспериментальной верификации разработана конечно-элементная модель резервуара, учитывающая в том числе реальное распределение ветрового потока.

### РАЗДЕЛ 3

## РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ КОЛЕЦ ЖЁСТКОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ

### 3.1. Локальные напряжения, возникающие в зоне размещения колец жесткости

Как известно из результатов теоретических и экспериментальных исследований многих авторов, в частности [12, 19, 21, 22, 33, 45], определено, что для цилиндрической оболочки наличие любого конструктивного элемента отличного от формы стенки с идеальной геометрией приводит к появлению концентратора напряжений, а главное, приводит к её моментному состоянию. Такими конструктивными элементами может быть вырез, подводящий патрубок или кольцо жёсткости. Проведя анализ указанных работ, было определено, что рассматривались краевые эффекты, возникающие в зонах повышенного гидростатического давления либо оболочки с габаритами, не отвечающими параметрам рассматриваемых резервуаров.

Следовательно, кольца жёсткости, значительно повышающие устойчивость стенки, могут быть причиной возникновения чрезмерных напряжений при заполненном состоянии резервуара от действия гидростатического давления. Поэтому, предшествуя анализу устойчивости стенок с кольцами жёсткости, было определено влияние кольцевого усиления на работу стенки при расчётной полной загрузке резервуара. Для такого расчёта будет рассматриваться резервуар объёмом 20000 м<sup>3</sup> с высотой стенки 18 метров.

#### 3.1.1. Установление закономерностей величины и распределения на основе численного эксперимента в зависимости от жесткости кольца

На основе численной модели, полученной в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 и описанной в п. 2.5.1, было проведено исследование влияния жёсткости кольца на возникающие напряжения в оболочке.

Для получения НДС, имеющего место в реальной конструкции, в качестве расчётного принимается рекомендуемое многими авторами [5, 38] РСН для расчёта на прочность, включающее: собственный вес – «СВ», гидростатическое давление (нефть 0,9 т/м<sup>3</sup>) – «ГД», избыточное давления (0,25 кПа) – «ИД», снеговая нагрузка (1,5 кПа) – «СН». Значение снеговой нагрузки является характеристическим и прикладывалось на покрытие ВЦР согласно схемам, предложенным в СП 20.13330.2011 [65]. Влияние снеговой нагрузки в сочетании с гидростатической не является существенным, поэтому детали сбора снеговой нагрузки здесь опущены. С учётом коэффициентов сочетания нагрузок расчётное сочетание нагрузок будет иметь вид – [формула 3.1]:

$$PCN = CB*1 + GD*0,95 + ID*0,9 + SN*0,9. \quad (3.1)$$

Размеры и форма поперечного сечения одного из вариантов кольца жесткости и его модель, выполненная в расчётном комплексе, изображены на рисунке 3.1.

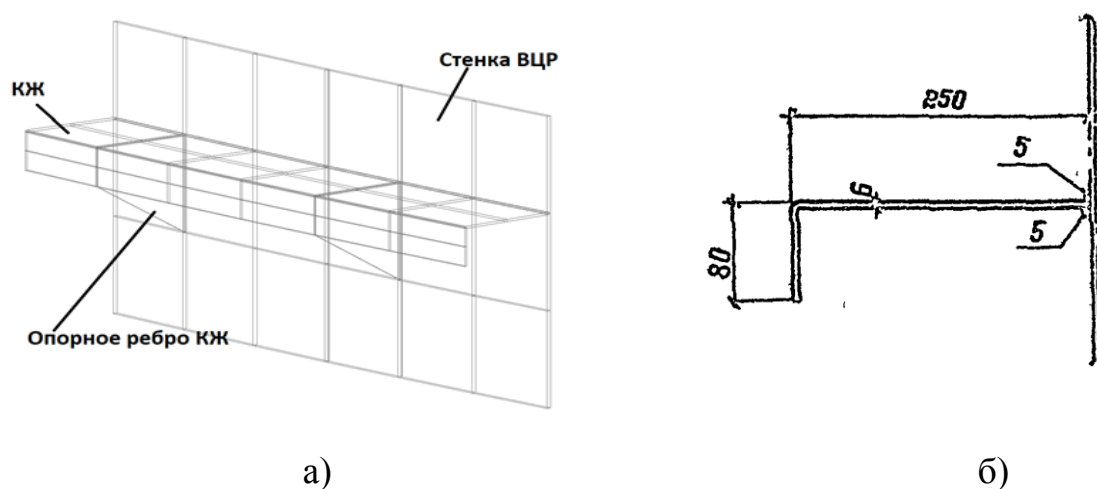


Рисунок 3.1. Конструкция промежуточного КЖ: а – численная модель, б – поперечное сечение одного из вариантов.

Все рассматриваемые жёсткости колец и их параметры приведены в таблице 3.1. В указанной таблице: А – площадь поперечного сечения КЖ, t – толщина КЖ, J – осевой момент инерции КЖ относительно оси, проходящей через внешнюю поверхность оболочки. Четвертым рассмотренным вариантом будет вертикальный цилиндрический резервуар без колец жёсткости.

Таблица 3.1.

Параметры колец жёсткости

№ типа жёсткости	$A, \text{см}^2$	Ширина полки, мм	Высота стенки, мм	$t, \text{мм}$	$J, \text{см}^4$	Прим.
1	21	250	100	6	1484	Уменьшенная жёсткость в исследовательских целях
2	54	400	140	10	9693	Требуемая жёсткость согласно СП
3	74	600	140	10	28217	Увеличенная жёсткость в исследовательских целях

Таким образом, были получены три объёмных модели резервуара с различными параметрами КЖ, общий вид одной из таких моделей представлен на рисунке 3.2.

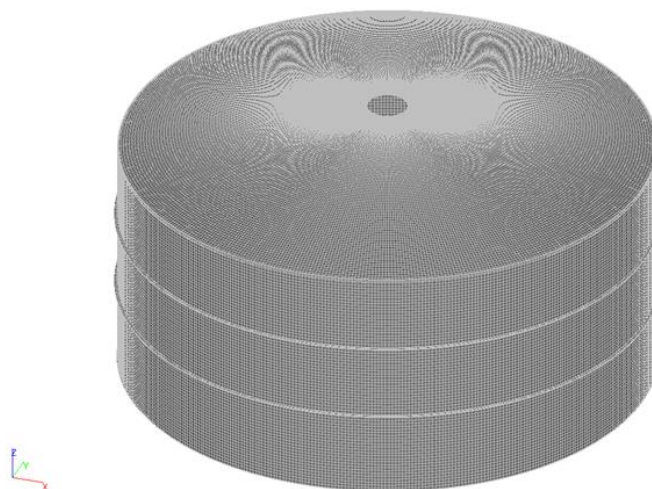


Рисунок 3.2. Модель ВЦР, созданная в ЛИРА-САПР 2015 г4.

Ниже рассмотрено НДС стенки в местах установки КЖ, расположенных на уровнях +6,500 и +12,250 в зависимости от их жесткости (см. таблицу 3.1). Для общей картины приведено графическое изображение распределения кольцевых (рис. 3.3) и меридиональных (рис. 3.4) напряжений в стенке резервуара для КЖ на уровне +12,250 с размерами согласно типовому проекту.

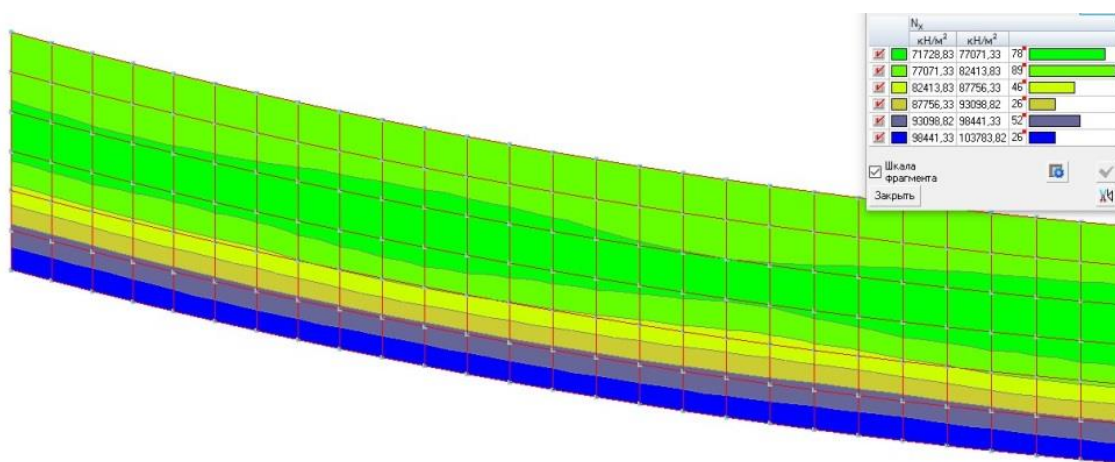


Рисунок 3.3. Общий вид распределения кольцевых напряжений в зоне расположения колец жёсткости.

На рисунке 3.3 видно, что непосредственно в зоне расположения КЖ кольцевые напряжения снижаются. При этом резкие скачки и всплески кольцевых напряжений отсутствуют.

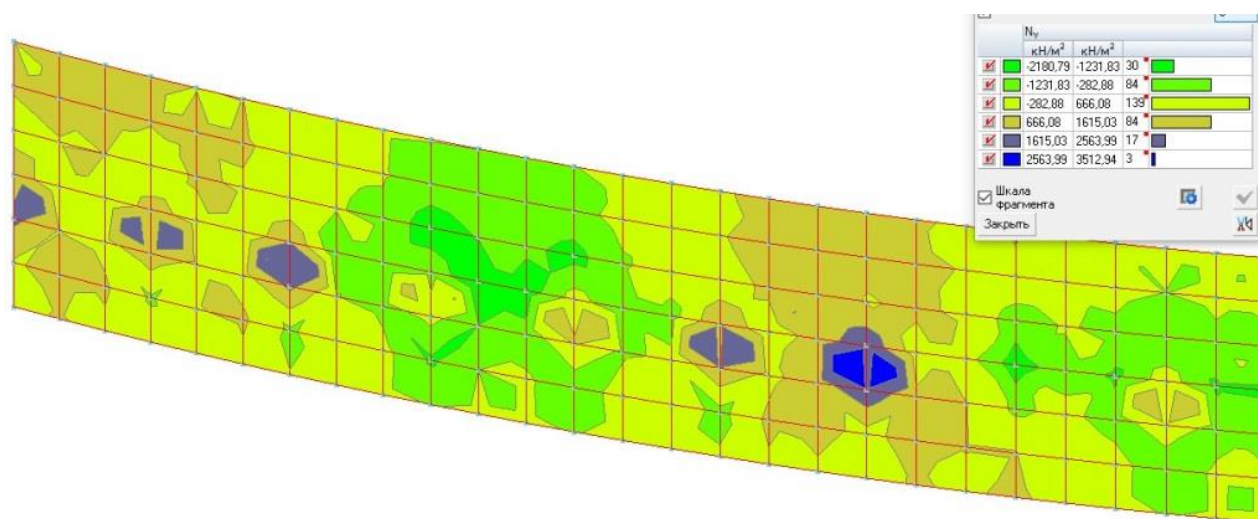


Рисунок 3.4 Общий вид распределения меридиональных напряжений в зоне расположения колец жёсткости.

Анализируя картину возникающих меридиональных напряжений, приведенных на рисунке 3.4, можно отметить, что кольца жесткости приводят к концентраторам напряжений. Указанная особенность ярко выражена в местах подпорных ребер. При этом в самих подкрепляющих КЖ ребрах возникают сжимающие напряжения.

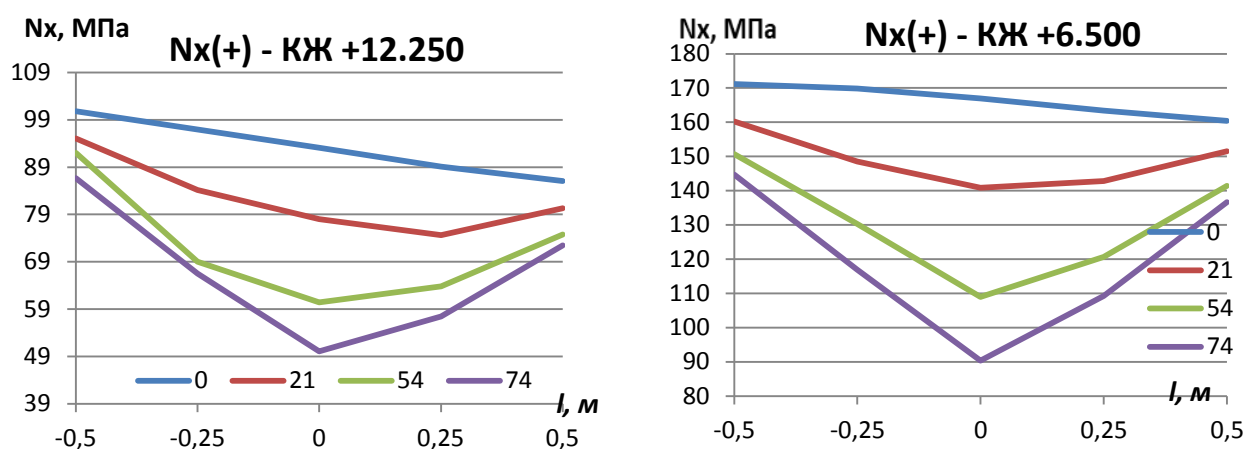
Далее был проведен анализ напряжений, возникающих в зонах верхнего и нижнего КЖ, для всех типов жесткости в таких точках:

- в точке сопряжений КЖ со стенкой;
- на расстоянии 0,25 м от точки сопряжения (выше и ниже);
- на расстоянии 0,5 м от точки сопряжения (выше и ниже).

На рисунках 3.5-3.7 данные расстояния обозначены « $l$ ». На оси абсцисс точка «0» обозначает место расположения кольца жёсткости.

Значения напряжений принимались пиковые для каждого расчетного уровня по всей длине окружности. Были сформированы таблицы со значениями напряжений, и по полученным результатам построены графики напряжений, возникающих в зонах расположения КЖ.

Обозначение ломаных линий определяется площадью поперечного сечения рассматриваемого кольца жёсткости, согласно таблице 3.1. На графиках приведены значения напряжений, возникающих в стенке резервуара без КЖ (линия «0»). Распределение кольцевых напряжений ( $N_x$ ) для верхнего КЖ представлено на рисунке 3.5а, для нижнего - на рисунке 3.5б.



а) для верхнего КЖ

б) для нижнего КЖ

Рисунок 3.5. Кольцевые напряжения в зонах КЖ. На графиках 0-74 – площадь поперечного сечения КЖ.

Поскольку, как видно из рисунка 3.5, меридиональные напряжения принимают положительные и отрицательные значения, для каждого случая был сформирован отдельный график. Распределение меридиональных отрицательных



напряжений ( $N_y$ ) для верхнего КЖ представлено на рисунке 3.6а, для нижнего на рисунке 3.6б.

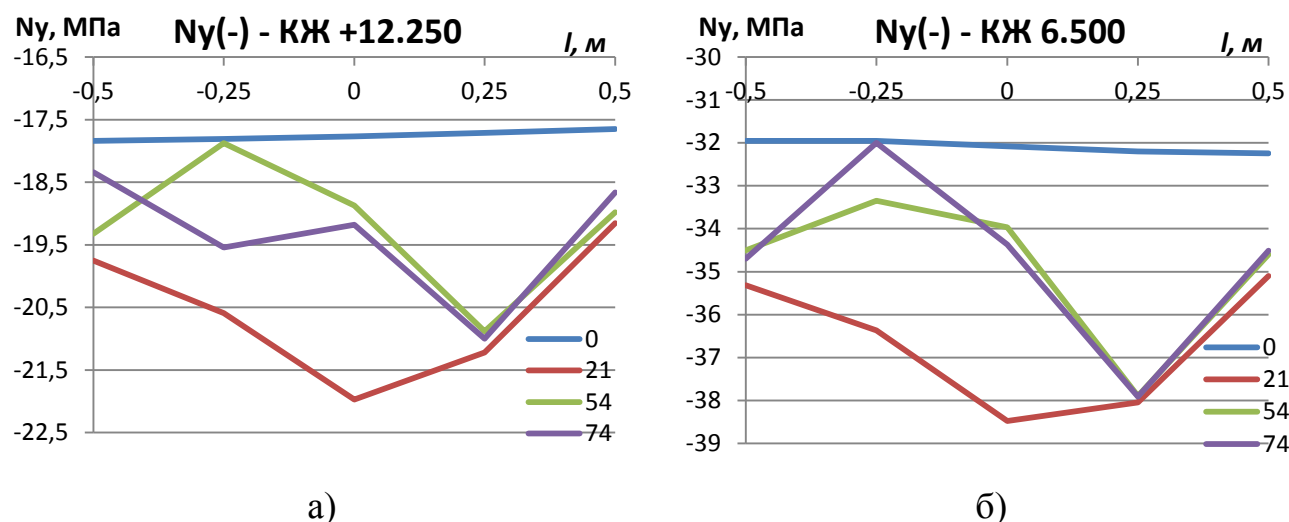


Рисунок 3.6. Меридиональные отрицательные напряжения. На графиках 0-74 – площадь поперечного сечения КЖ: а - для верхнего КЖ, б - для нижнего КЖ.

Распределение меридиональных положительных напряжений ( $N_y$ ) для верхнего КЖ представлено на рисунке 3.7а, для нижнего - на рисунке 3.7б.

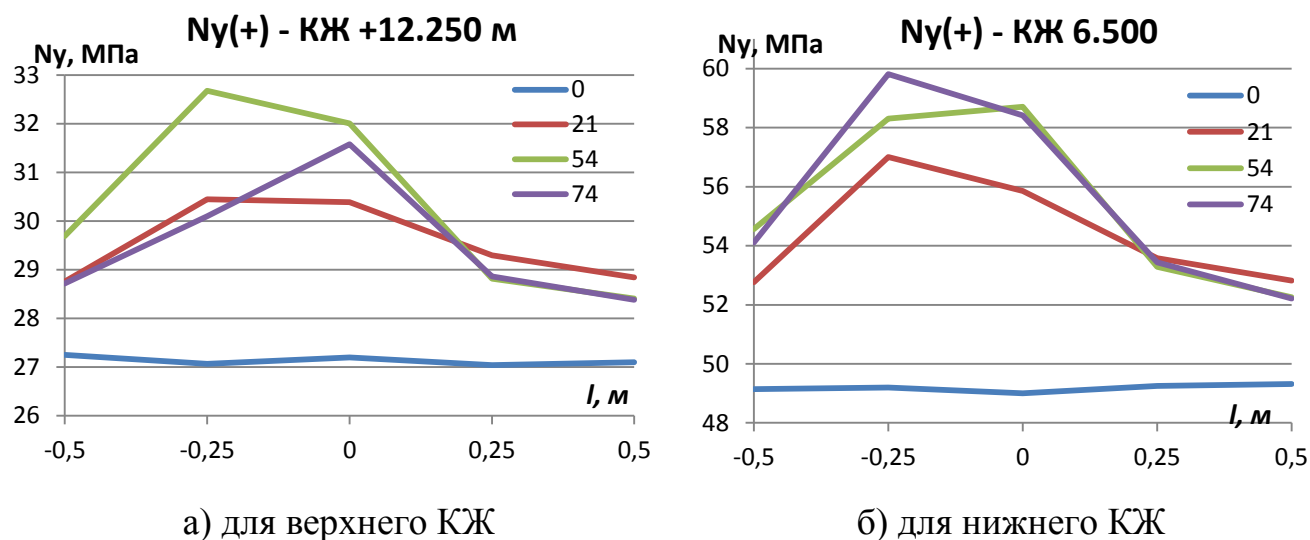


Рисунок 3.7. Меридиональные положительные напряжения. На графиках 0-74 – площадь поперечного сечения КЖ.

Установлены следующие зависимости:

- кольцевые напряжения уменьшаются в местах установки КЖ. С увеличением жёсткости КЖ кольцевые напряжения снижаются;
- меридиональные напряжения возрастают в зонах влияния колец жесткости;



- отрицательные меридиональные напряжения возрастают при меньших жесткостях колец;
- положительные меридиональные напряжения возрастают при больших жесткостях колец;
- значения меридиональных напряжений остаются существенно ниже кольцевых и на эквивалентное напряжение влияние оказывают незначительное.

### **3.1.2. Анализ прочности зоны кольца при действии гидростатической нагрузки**

Согласно СП [65] расчет на прочность листовых конструкций (оболочек вращения), которые находятся в безмоментном напряженном состоянии, следует выполнять по формуле [3.2]:

$$\frac{1}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – нормальные напряжения по взаимно перпендикулярным плоскостям;  $\tau_{xy}$  – касательные напряжения;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы стенки резервуара;  $R_y$  – расчётное сопротивление стали.

Для случая моментного состояния следует учитывать краевой эффект, при этом конкретного выражения для его учёта в [65] не приводится, поэтому воспользуемся традиционным выражением для учёта краевых эффектов в оболочках, приведенным в книгах Е.И. Беленя, М.К. Сафаряна, А.А. Лапшина и многих других [5, 38, 62] – формула (3.3):

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} + \frac{N}{F} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.3)$$

где  $M$  и  $N$  – изгибающий момент и продольное усилие относительно одной оси;  $W$  – момент сопротивления КЖ относительно оси, проходящей по внешней поверхности оболочки,  $F$  – площадь поперечного сечения рассматриваемого участка оболочки  $\gamma_c = 1$  – коэффициент условий работы стенки резервуара;  $R_y = 240$  МПа – расчётное сопротивление стали.

Поскольку рассматривается возникновение момента от наличия кольцевого ребра жесткости, в качестве усилия  $N$  принимаются меридиональные усилия от действия гидростатической нагрузки. Результаты расчёта приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Напряжения, возникающие в зоне крепления колец жёсткости

№ типа жёсткости	$F, \text{см}^2$	$W, \text{см}^3$	КЖ на высоте +12.500			КЖ на высоте +6.500		
			$M, \text{кНм/м}$	$N, \text{кН}$	$\sigma, \text{МПа}$	$M, \text{кНм/м}$	$N, \text{кН}$	$\sigma, \text{МПа}$
1	21	33267.2	1.211	30.5	3.84	1.73	56.4	3.77
2	54	109200	1.29	32	4.012	1.89	59	3.93
3	74	203800	2	31.5	3.95	2.5	60.8	4.05
4	0	0	0	27.2	3.4	0	49.23	3.28

### 3.1.3. Вывод о влиянии возникающих напряжений в зоне колец жёсткости при расчётах на прочность

Исходя из установленных зависимостей, можно сделать вывод - возникающая концентрация напряжений в зонах влияния КЖ для данной конструкции не приводит к появлению пластических деформаций. Соответственно, вероятность возникновения усталостных трещин в зоне расположения КЖ, даже для ВЦР с высокой обрачиваемостью, незначительная, за исключением случаев возможных существенных остаточных сварочных напряжений и других факторов, которые могут отразиться на свойствах материала сопротивляться образованию усталостных трещин.

При постановке колец жёсткости они оказывают влияние на значение кольцевых и меридиональных напряжений лишь в зонах их расположения. На расстоянии более 0,5 метра от места крепления кольца уровень напряжений возвращается к прежнему. При этом кольцевые напряжения снижаются, меридиональные увеличиваются, однако само значение последних в 6-7 раз меньше первых.

Локальные эффекты в виде перехода к моментному состоянию оболочки,

выявленные в стенке резервуара при объёмном моделировании колец жёсткости, в комплексе с меньшим значением действующих кольцевых напряжений не приводят к значимому общему снижению прочности пояса.

### **3.2. Устойчивость стенки при расположении колец жёсткости по существующим методикам и типовым проектам**

Для решения основных задач исследования необходимо в первую очередь определить, при использовании каких нормативных документов расположение колец жёсткости приводит к максимальному запасу устойчивости стенки. Кроме того, предлагается проанализировать расположение колец по типовому проекту.

#### **3.2.1. Определение параметра $\lambda$**

Для фиксации оптимального месторасположения КЖ была предложена величина, учитывающая переменную толщину стенки участков, на которые делят стенку резервуара кольца жёсткости. Такой величиной в данном исследовании будет отношение высоты к средней толщине участка. В данной работе указанная величина будет называться «гибкость» и обозначаться греческой буквой « $\lambda$ » и определяться по формуле (формула 3.4).

$$\lambda = \frac{H^2}{\sum_{i=1}^n t_i h_i} \quad (3.4)$$

где  $H$  – высота рассматриваемого участка между КЖ (либо от кольца до кровли (днища));  $t_i$  – толщина  $i$ -го пояса, входящего в участок  $H$ ;  $h_i$  – высота  $i$ -го пояса, ограниченная участком  $H$ ;

Основана формула на подобию выражения для определения условной гибкости для стенки центрально и внецентренно сжатых и сжато-изгибаемых элементов, приведенного в [65], поскольку прямого выражения для определения гибкости стенки переменной толщины в рассмотренных нормативных документах не приводится. При этом в формуле 3.4 не учитывается модуль упругости и расчётное сопротивление стали, так как введённый параметр  $\lambda$  будет применяться

не для прямого расчёта устойчивости, а для определения зависимостей между КЗУ стенки и положением различного количества колец жёсткости на стенке переменной толщины. Следовательно, рассматриваются только величины, позволяющие учесть среднюю толщину участка.

### **3.2.2. Устойчивость стенки при расположении колец жесткости по нормативным методикам и типовому проекту. Выбор наиболее рационального варианта**

В исследовании рассматриваются резервуары больших объёмов, а именно от 10 до 30 тысяч м<sup>3</sup>. Для предварительного анализа устойчивости стенки при нормативном размещении колец будет исследована работа резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> с учётом действия фактического распределения ветрового потока. Подробное описание расчётного сочетания нагрузок для расчёта на устойчивость приведено в п.2.5.3. Обоснование нормативных документов, рассматриваемых при анализе, определено в разделе 1, их перечень приведён в таблице 3.3.

Исходя из требований, часть из которых приведена в пункте 1.3 настоящей работы, для каждого рассматриваемого нормативного документа вычислено требуемое количество и высота установки колец жёсткости. При этом для Еврокода [92] предварительно был выполнен расчёт осевой нагрузки, учёт которой необходим в расчёте. Как отмечено в обзоре нормативных методик проектирования, некоторые документы не указывают на принцип выбора необходимого количества кольцевых рёбер жёсткости. Поскольку большая часть рассмотренных нормативных документов требует установки двух КЖ, то был подобран типовой проект ВЦР с двумя КЖ (с параметрами согласно типовому проекту ТП 704-1-171.84 [75]), и в качестве размещения по нормативным методикам, не требующим определённого их количества, также принято два кольца жёсткости.

Затем в комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 было исследовано поведение пяти моделей резервуаров с учётом параметров, полученных в результате экспериментальной верификации и приведенных в пункте 2.5. Далее для каждой

КЭ-модели с использованием имеющихся возможностей расчётного комплекса рассчитан коэффициент запаса устойчивости для цилиндрической стенки, учитывающий полное моделирование всех основных составляющих конструкции резервуара. Устойчивость стенки определяется через коэффициент запаса устойчивости, поскольку такой вариант наиболее представительный для сравнения различных конструктивных случаев. Величина КЗУ в применяемом расчётном комплексе определяется как отношение критических напряжений потери устойчивости к действующим. По формуле 3.4 рассчитана гибкость ( $\lambda$ ) каждого участка между кольцами жёсткости и определено отношение между ними. Высота размещения КЖ от уровня земли, гибкость между участками, а также, вычисленный для каждого варианта КЗУ приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3.

КЗУ стенки при нормативном размещении колец

Нормативный документ	Высота расположения колец, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки	Примечание
ТП 704-1-171.84	$H_1=6.8$ ; $H_2=10.85$	$\lambda_1/\lambda_2=1.86$ ; $\lambda_2/\lambda_3=0.69$	5.21	
СП16.13330.2017	$H_1=6.15$ ; $H_2=12.15$	$\lambda_1/\lambda_2=1.14$ ; $\lambda_2/\lambda_3=1.04$	5.89	Нет указаний по размещению и количеству
СТО СА 03-002-2009	$H_1=7.8$ ; $H_2=13.3$	$\lambda_1/\lambda_2=0.91$ ; $\lambda_2/\lambda_3=0.83$	5.98	
EN 1993-4-2	$H_1=5.9$ ; $H_2=12.6$	$\lambda_1/\lambda_2=0.87$ ; $\lambda_2/\lambda_3=1.34$	5.39	
API 650	$H_1=7.8$ ; $H_2=13.3$	$\lambda_1/\lambda_2=0.91$ ; $\lambda_2/\lambda_3=0.83$	5.98	

Анализируя таблицу 3.3, определено, что методики API [84] и СТО [60] приводят к одинаковому расположению колец. Кроме того, именно такое расположение обеспечивает максимальную устойчивость стенки для случая рассматриваемых нагрузок. Следовательно, дальнейшее сравнение

альтернативных вариантов будет выполняться для указанных нормативных документов. Дополнительно следует заметить, что в таблице 3.3, а также в дальнейшем исследовании рассматривается только первая, наиболее вероятная, форма потери устойчивости стенки ВЦР.

### **3.3. Устойчивость стенки при альтернативных вариантах размещения кольцевых рёбер жёсткости**

Методом численного моделирования были проведены исследования с целью определения местоположения кольца, при котором значение КЗУ стенки превысило бы значение, полученное для стенки с нормируемым расположением КЖ (при соответствующем количестве колец).

Исследование проводилось для резервуаров с отношением высоты стенки к радиусу цилиндрической оболочки  $r/H$  от 0,79 до 1,27, что соответствует объёмам хранимого продукта от 10000 до 30000 м<sup>3</sup>.

Подробное описание поиска оптимального расположения кольца жёсткости приведено для резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> с высотой стенки 18 метров. Результаты расчётов по резервуарам других габаритов приведены в приложении, габариты резервуаров приняты по соответствующим типовым проектам [73- 76].

#### **3.3.1. Обеспечение максимальной устойчивости стенки резервуара при размещении одного кольца жёсткости**

На основе экспериментально верифицированной модели было выполнено моделирование резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> с различными вариантами расположения колец жёсткости. Далее, предварительно выполнив аналитический расчёт поперечного сечения кольца, его численная модель, выполненная в расчётном комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4, была сохранена отдельным файлом и путем сборки со стенкой последовательно располагалась выше середины по высоте стенки резервуара с шагом 1.5 м.

Для каждого смоделированного случая расположения кольца определялся

КЗУ стенки. Первая форма потери устойчивости стенки резервуара для резервуара с одним из вариантов размещения одного кольца жёсткости приведена на рисунке 3.8.

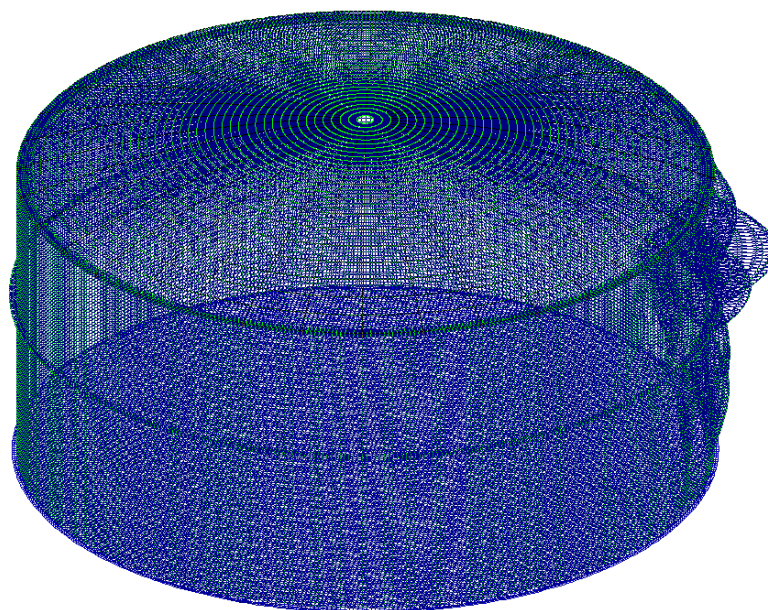


Рисунок 3.8. Первая форма потери устойчивости резервуара объёмом  $20000 \text{ м}^3$  с одним КЖ.

Анализируя форму потери устойчивости, отмечено образование волнообразных изменений геометрии в верхней части стенки резервуара с наветренной стороны. Характер и продольное по высоте расположение волн потери устойчивости соответствует случаю преобладающего действия кольцевых напряжений.

Таким же образом для первого этапа численных исследований было рассмотрено семь моделей с одним кольцом жёсткости, фрагменты пяти из рассмотренных расчётных схем приведены на рисунке 3.9 а-д. Поиск места рационального расположения кольца на участке выше середины высоты стенки обусловлен предварительными численными расчётами, в результате которых определено, что стенка оказывается более устойчивой, чем в других вариантах размещения. Также необходимость поиска положения КЖ в указанной зоне подтверждается случаями усиления кольцевыми рёбрами жёсткости для существующих конструкций резервуаров.

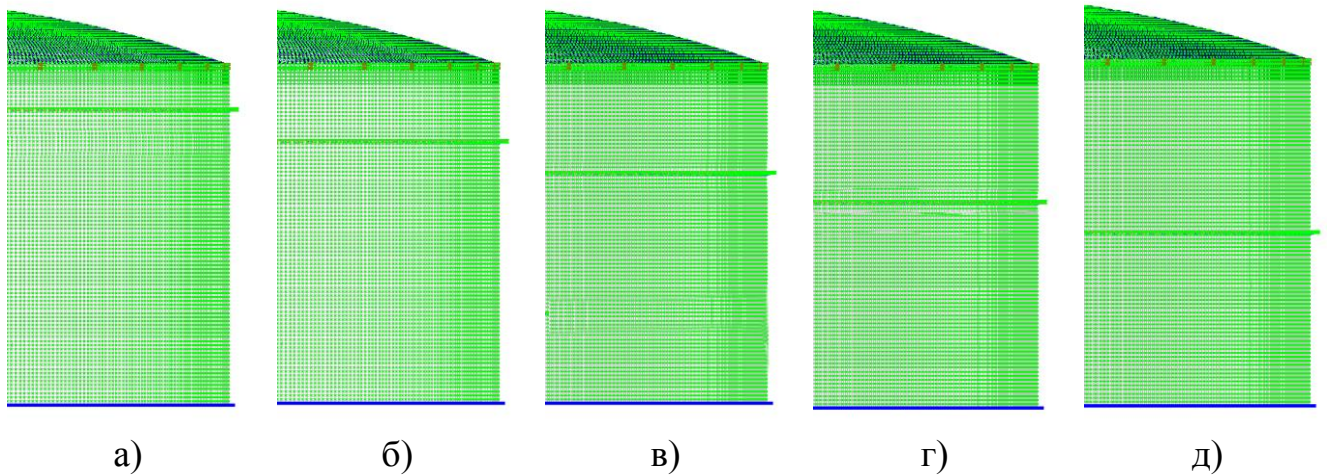


Рисунок 3.9. Фрагменты моделей резервуаров с различным размещением одного кольца жёсткости на отметках: а - 16.65 м, б – 15.15 м, в – 13.65 м, г – 10.65 м, д – 9.15 м

Результаты вычисления КЗУ стенки резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> для предварительно рассматриваемых вариантов местоположения одного кольца жёсткости приведены в таблице 3.4. Высота размещения КЖ указана от уровня земли, столбец №2 определялся как отношение гибкости верхнего участка к нижнему.

Таблица 3.4.

КЗУ стенки при различном положении одного КЖ

Высота расположения кольца, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
9.15	1.15	2,01
10.65	0.81	2,17
12.15	0.56	2,02
13.65	0.37	1,94
15.15	0.23	1,87
16.65	0.096	1.66
17.65	0.023	0,97

Из таблицы 3.4 определён интервал (с 9 до 12 м), в котором необходимо искать наиболее выгодное положение кольца, для обеспечения максимального КЗУ. Далее, согласно принятому алгоритму исследования, последовательно уменьшая диапазон поиска, было уточнено положение, при котором КЗУ стенки



резервуара оказывается максимальным. По итогам моделирования ещё пяти случаев размещения колец был определён уровень расположения кольца, при котором устойчивость стенки оказалась максимальной. Высота данной точки 10.95 метров, КЗУ составил 2.25. Гибкость верхнего участка составила 6.62, нижнего – 8.89.

Таким образом, для рассматриваемого резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> оптимальное отношение между гибкостями участков  $\lambda$  для случая одного кольца составило 0.74. Для резервуаров других объёмов по результатам выполнения аналогичных исследований определены положения одного кольца жёсткости, при котором устойчивость стенки оказывается максимальной. Более подробные данные по рассматриваемым вариантам размещения колец на стенках ВЦР других объёмов приведены в приложении Б. Для резервуаров других габаритов получены следующие отношения между гибкостями участков при размещении 1КЖ:

- для ВЦР 10000 м<sup>3</sup> 12м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,68$ ;
- для ВЦР 10000 м<sup>3</sup> 18м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,77$ ;
- для ВЦР 20000 м<sup>3</sup> 12м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,79$ ;
- для ВЦР 20000 м<sup>3</sup> 18м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,74$ .

По результатам поиска оптимального расположения одного кольца жёсткости определено положение, при котором устойчивость оказывается выше, чем при наиболее выгодном нормативном размещении. Указанное положение кольца, выраженное через безразмерный параметр  $\lambda$ , оказалось в пределах 0,68..0,74. Соответственно, разброс составил не более 14% , что позволяет в качестве рекомендуемого положения одного кольца жёсткости принять величину, определённую как среднее значение отношений  $\lambda_1 / \lambda_2$ , полученных для резервуаров различных габаритов. Полученное таким образом отношение между гибкостями участков для случая расположения одного кольца жёсткости оказывается равным:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,74$ .

### 3.3.2. Обеспечение максимальной устойчивости стенки резервуара при размещении двух колец жёсткости

Далее были проведены аналогичные численные исследования по определению расположения двух колец жёсткости, обеспечивающих максимальную устойчивость стенки резервуара. Общий вид модели и первая форма потери устойчивости с одним из рассмотренных вариантов размещения двух колец жёсткости приведен на рисунке 3.10. Анализируя указанное изображение, отмечено, что эффект потери устойчивости проявляется, как и в первом случае с наветренной стороны в верхней части стенки резервуара. При этом уменьшается амплитуда волн одновременно с возрастанием их частоты.

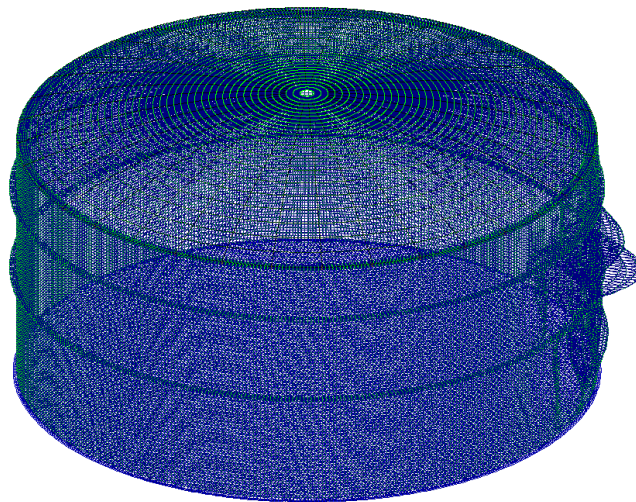


Рисунок 3.10. Первая форма потери устойчивости резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> с двумя КЖ.

Поскольку при наличии двух колец существует достаточно большое количество комбинаций их размещения, то в первую очередь рассматривались следующие случаи: с равным шагом, смещённые вверх, с равной условной гибкостью между участками, с использованием полученного оптимального соотношения между гибкостями участков для размещения одного кольца жёсткости.

Фрагменты расчётных схем для предварительного анализа, выполненных в расчётном комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4, с указанными вариантами расположения двух колец жёсткости изображены на рисунке 3.11 а-г.

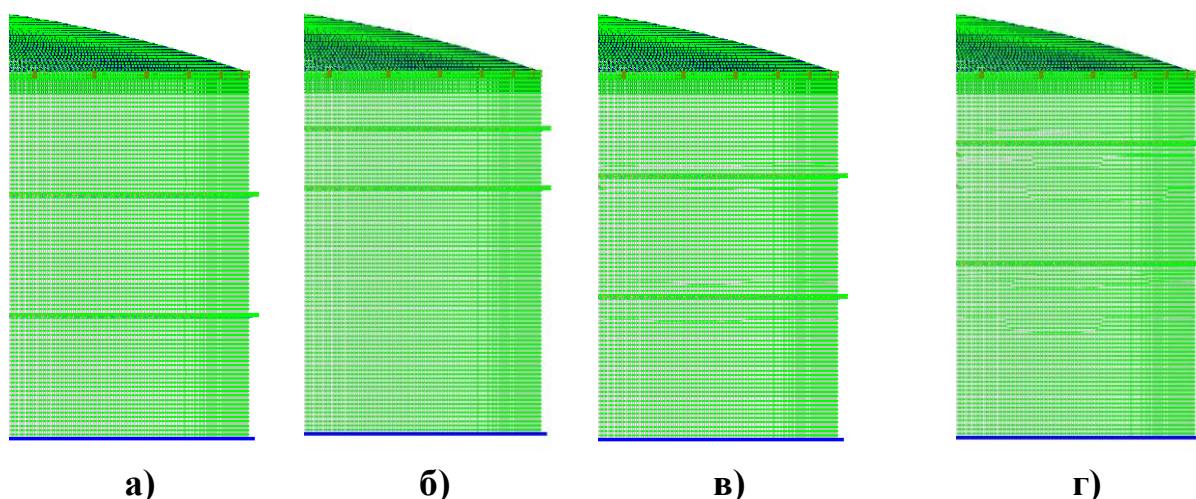


Рисунок 3.11. Фрагменты моделей резервуаров с различным размещением двух колец жёсткости: а - с равным шагом, б - смещённые вверх, в - с равной гибкостью, г - с оптимальной гибкостью для случая размещения одного КЖ.

Для каждого варианта размещения, указанного на рисунке 3.11, МКЭ был выполнен расчёт устойчивости цилиндрической стенки. Результаты расчётов КЗУ, отношения между гибкостями участков, а также высоты размещения колец жёсткости приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5.

КЗУ стенки при различном положении двух КЖ

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
С равной гибкостью ( $\lambda$ ) между участками	$H_1=6.6; H_2=12.5$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=1$	2,93
Гибкость верхнего участка 0.74 от нижележащего (оптимальное отношение для резервуара с 1 КЖ)	$H_1=8.65; H_2=14.2$	$\lambda_1/\lambda_2=0.74; \lambda_2/\lambda_3=0.74$	2,75

Из приведенных в таблице 3.5 вариантов размещения колец максимальное значение коэффициента запаса устойчивости обеспечивается при равной гибкости

между участками. Указанный вариант был принят в качестве основы для более детального поиска, который заключался в последовательном варьировании положения сначала верхнего, а затем нижнего кольца. Таким образом было выполнено ещё 8 моделей ВЦР и выполнен расчёт КЗУ стенки для каждого из вариантов.

В результате определена величина максимального КЗУ при наличии двух колец жесткости для ВЦР объёмом 20000 м<sup>3</sup> (высота стенки 18 м) и зафиксировано их положение. Как и в случае с одним кольцом, положение фиксировалось в виде отношения между гибкостями участков. В этом случае высота расположения нижнего и верхнего колец составила соответственно 8 м и 13.6 м. Коэффициент запаса устойчивости в этом случае составил 3.35.

Для резервуаров других объёмов по результатам выполнения аналогичных исследований определено положение двух колец жёсткости, при котором устойчивость стенки оказывается максимальной. Наиболее характерные варианты по рассматриваемым случаям размещения колец на стенках ВЦР других объёмов приведены в приложении Б. Расположение КЖ для ВЦР других габаритов, при котором КЗУ стенки оказывается максимальным, выраженное через отношение между гибкостями, равно:

- для ВЦР 10000 м<sup>3</sup> 12м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,81$  и  $\lambda_2 / \lambda_3 = 0.81$ ;
- для ВЦР 10000 м<sup>3</sup> 18м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,88$  и  $\lambda_2 / \lambda_3 = 0.79$ ;
- для ВЦР 20000 м<sup>3</sup> 12м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,83$  и  $\lambda_2 / \lambda_3 = 0.8$ ;
- для ВЦР 20000 м<sup>3</sup> 18м:  $\lambda_1 / \lambda_2 = 0,86$  и  $\lambda_2 / \lambda_3 = 0.82$ ;

По результатам поиска оптимального расположения двух колец жёсткости определено их положение, при котором устойчивость оказывается выше, чем при наиболее выгодном нормативном размещении. Разброс значений отношений между гибкостями первого и второго участка составил не более 6%, второго и третьего - не более 4%, что позволяет определить общее значение для резервуаров рассмотренных габаритов. Такой величиной принято среднее значение отношений между полученными значениями гибкостей участков. В итоге, для рассмотренных резервуаров расположение одного кольца жёсткости, при котором устойчивость

стенки оказывается максимальной, с учётом округления соответствует отношению между гибкостями первого и второго участка  $\lambda_1/\lambda_2=0.85$ , а второго и третьего  $\lambda_2/\lambda_3=0.8$ .

### 3.3.3. Обеспечение максимальной устойчивости стенки резервуара при размещении трёх колец жёсткости

При моделировании случая размещения трёх колец жёсткости рассматривались только наиболее выгодные варианты, обеспечивающие максимальный КЗУ стенки, полученные для случая наличия двух КЖ. Такими вариантами являлись:

- 1) расположения колец с равным шагом по высоте стенки;
- 2) расположения колец с равной гибкостью между участками;
- 3) расположение колец, исходя из соотношения гибкостей  $\lambda_1/\lambda_2=0.85$  и  $\lambda_i/\lambda_{i+1}=0.8$ , где  $\lambda_i$  – гибкость  $i$ -участка (кроме первого), а  $\lambda_{i+1}$  – гибкость нижележащего участка относительно  $i$ -го.

Общий вид модели и первая форма потери устойчивости для варианта № 3 приведены на рисунке 3.12.

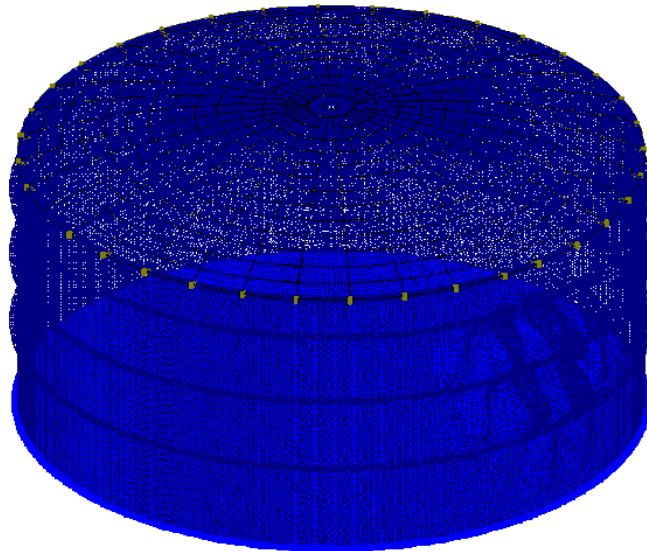


Рисунок 3.12. Первая форма потери устойчивости резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> с тремя КЖ.

Анализируя приведенную иллюстрацию, отмечено значительное рассредоточение волн потери устойчивости по длине и высоте стенки резервуара,

по сравнению со случаями, приведенными на рисунках 3.8 и 3.10. Потеря устойчивости наблюдается также с наветренной стороны.

Для каждого рассмотренного варианта размещения был выполнен расчёт устойчивости цилиндрической стенки. Результаты расчётов КЗУ, отношения между гибкостями участков, а также высоты размещения колец жёсткости приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6.

КЗУ стенки при различном положении трёх КЖ

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=4.65; H_2=9.15; H_3=12.15$	$\lambda_1/\lambda_2=0.64; \lambda_2/\lambda_3=0.97; \lambda_3/\lambda_4=1.14$	4,12
С равной гибкостью ( $\lambda$ ) между участками	$H_1=5.8; H_2=10.7; H_3=15.3$	$\lambda_1/\lambda_2=0.99; \lambda_2/\lambda_3=1.01; \lambda_3/\lambda_4=0.99$	4,24
По оптимальному отношению из п. 3.3.2.	$H_1=7.05; H_2=11.5; H_3=15.25$	$\lambda_1/\lambda_2=0.8; \lambda_2/\lambda_3=0.85; \lambda_3/\lambda_4=0.85$	4,3

Из таблицы 3.6 определено, что для резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> с высотой стенки 18 метров максимальная устойчивость стенки достигается при размещении колец с соблюдением отношения между гибкостями участков, полученных в п.3.3.2. Дальнейшие вариации расположения трех колец, опираясь на расположение по второму случаю, не позволили определить большее значение КЗУ. Для рассматриваемых резервуаров других объёмов и типов указанный вариант размещения также приводит к максимальному значению коэффициента запаса устойчивости (приложение Б).

### 3.4. Определение рационального количества колец жёсткости

Из рассмотренных вариантов в пункте 3.3. были определены две принципиальные зависимости между гибкостями участков, при которых КЗУ стенки оказывается максимальным (они представлены в виде выражений 3.5 и 3.6):

$$1) \text{ для случая размещения одного КЖ - } \lambda_1/\lambda_2=0.74; \quad (3.5)$$

2) для случая размещения двух и более КЖ -  $\lambda_1/\lambda_2=0.85$  и  $\lambda_i/\lambda_{i+1}=0.8$ . (3.6)

В качестве обозначения принято:  $\lambda_1$  – гибкость верхнего (первого) участка,  $\lambda_i$  – гибкость  $i$ -участка (кроме первого), а  $\lambda_{i+1}$  – гибкость нижележащего (относительно  $i$ -го) участка.

Из случаев нормируемого (п. 3.2.) размещения колец жёсткости наилучшим, для обеспечения максимальной устойчивости стенки оказался вариант, предлагаемый в нормах API 650 [84] и СТО СА 03-002-2009 [60]. Следовательно, имеет смысл провести итоговую проверку значений КЗУ, получаемых на численной экспериментально верифицированной модели при различном количестве колец жёсткости для наилучшего нормируемого и альтернативного варианта размещения колец.

Для каждого из выбранных вариантов размещения были созданы модели резервуаров с количеством колец от нуля до пяти. В программном комплексе ЛИРА-САПР 2015 R4 были определены КЗУ стенки и проведено сравнение возникающих КЗУ в зависимости от количества колец для каждого из двух выбранных вариантов размещения, и таким образом, на примере резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> было предварительно определено рекомендуемое расположение колец жёсткости, выраженное через соотношение гибкостей рассматриваемых участков. Результаты приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7.

Сравнение КЗУ стенки при нормируемом и альтернативном вариантах размещения колец жёсткости

Вариант размещения	КЗУ стенки, при количестве колец, шт.					
	1	2	3	4	5	6
API 650 / СТО СА 03-002-2009	2,13	3,09	4,04	5,70	6,78	7,6
По п. 3.2.3	2,25	3,35	4,30	6,02	7,12	7,98
Разница (от СТО), %	5,36	6,3	6,1	5,2	4,8	4,8

Расположение колец из принципа отношения гибкостей, сформулированного в п. 3.3.2, позволяет повышать КЗУ на 4-6% по сравнению с



наиболее выгодным нормативным размещением. Таким образом, на примере резервуара объёмом  $20000 \text{ м}^3$  получено наиболее выгодное отношение между гибкостями участков, для обеспечения устойчивости от действия ветровой нагрузки и вакуума. Для резервуаров других рассматриваемых объёмов и размеров аналогичные расчёты также показывают увеличение КЗУ стенки, даже в несколько большем диапазоне 4-7%. Следовательно, все дальнейшие исследования будут проводиться с учётом того, что кольца расположены из принципа отношения гибкостей, сформулированного в виде выражений 3.5 и 3.6.

Тем не менее полученные отношения между гибкостями участка, обеспечивающие максимальный КЗУ стенки от действия поперечных нагрузок, не дают понимания о рекомендуемом количестве колец для каждого из рассматриваемых типоразмеров резервуаров. Следующей решаемой задачей исследования является определение рационального количества колец жёсткости на цилиндрической стенке резервуара исходя из условий обеспечения максимального коэффициента запаса устойчивости и минимальной металлоёмкости стенки.

#### **3.4.1. Рациональное количество колец жёсткости исходя из условия обеспечения максимального коэффициента запаса устойчивости**

Очевидно, что с увеличением количества колец устойчивость стенки будет только возрастать. Однако важно знать интенсивность такого возрастания. Это наглядно может представить область, в которой постановка колец приводит к максимальному возрастанию КЗУ. В связи с этим для определения интенсивности анализировались зависимости, представленные в виде графиков функции КЗУ стенки от количества КЖ для каждого из исследуемых объёмов резервуаров. Указанные зависимости получены по результатам расчёта КЗУ с использованием экспериментально верифицированных параметров конечно-элементной модели ВЦР. Рассматриваться будут случаи наличия от 0 до 6 КЖ, при этом их количество на графике выражено опосредствованно, через гибкость  $\lambda$ , с учётом расположения по выражениям 3.5 и 3.6, обеспечивающим максимальное значение



КЗУ при действии ветровой нагрузки. Всего была исследована 21 модель ВЦР с различным количеством колец и для каждого случая рассчитан КЗУ.

Поскольку определяющей в дальнейшем исследовании рациональности размещения колец является гибкость первого участка ( $\lambda_1$ ), то для проанализированных типоразмеров резервуаров объёмом 10000 м<sup>3</sup>, 20000 м<sup>3</sup>, 30000 м<sup>3</sup> отмеченные зависимости будут представлены в виде «КЗУ -  $\lambda_1$ », соответственно на рис. 3.13, 3.14, 3.15.

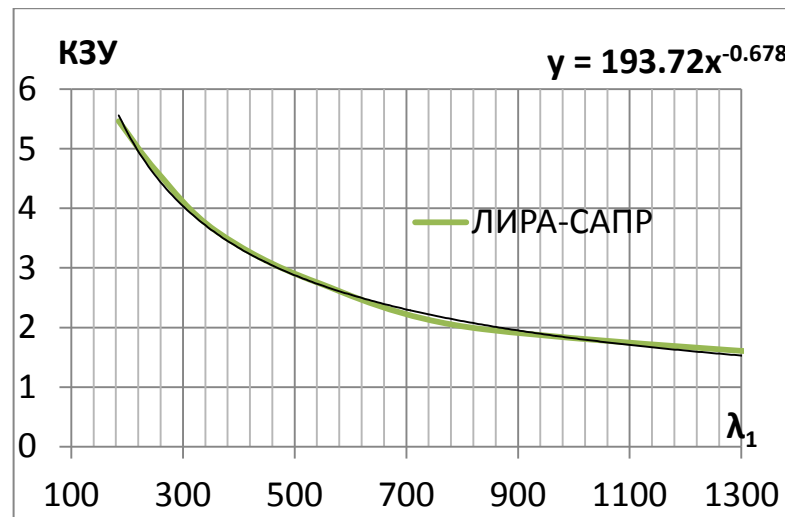


Рисунок 3.13. Зависимость КЗУ от  $\lambda_1$  для резервуара объёмом 10000 м<sup>3</sup>.

Для ВЦР объёмом 20 и 30 тыс. м<sup>3</sup> для большей наглядности, интенсивности возрастания КЗУ графики представлены для случаев наличия от 1 до 6 КЖ.

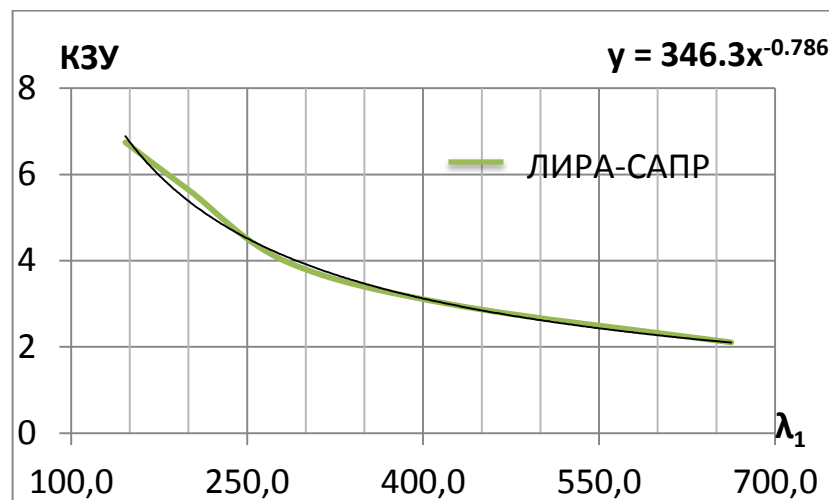


Рисунок 3.14. Зависимость КЗУ от  $\lambda_1$  для резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup>.

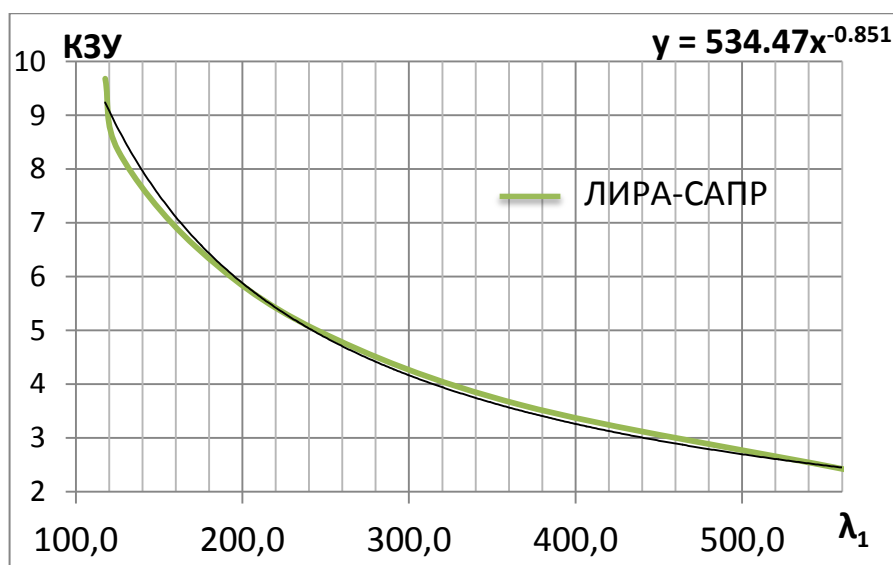


Рисунок 3.15. Зависимость КЗУ от  $\lambda_1$  для резервуара объёмом 30000 м³.

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 3.13..3.15 для различных объёмов резервуаров, отмечено сходство функций, формульное описание которых представлено выражениями 3.7..3.9. В указанных функциях  $y = \text{КЗУ}$ ,  $x = \lambda_1$ . Уравнения зависимости КЗУ от гибкости верхнего участка были получены с использованием встроенной функции аппроксимации в программном комплексе Microsoft office Excel:

- для резервуара с отношением радиуса оболочки к высоте  $r/H = 0,79$ ,  $y = 193.72x^{-0.678}$  (3.7)

- для резервуара  $r/H = 1,11$ ,  $y = 346.3x^{-0.786}$  (3.8)

- для резервуара  $r/H = 1,27$ ,  $y = 534.47x^{-0.851}$  (3.9)

Из полученных выражений 3.7..3.9 видна чёткая зависимость роста КЗУ от объёма резервуара. Полученные функциональные зависимости позволяют сделать вывод о применимости полученных данных для резервуаров промежуточных объёмов в диапазоне 10000 – 30000 м³. Поскольку постановка любого количества кольцевых рёбер жёсткости приводит к повышению устойчивости стенки (в случае постоянной нагрузки к повышению КЗУ) основной задачей построения указанных зависимостей является определение интенсивности такого возрастания в зависимости от количества колец жёсткости. Соответственно, основная информативность полученных графиков состоит в возможности определения диапазона гибкостей, при которых КЗУ стенки резервуара возрастает. Для

рассмотренных габаритов получены следующие значения:

- для резервуара объёмом  $10000 \text{ м}^3$  (рис. 3.13), при гибкости первого участка  $\lambda_1 < 570$  КЗУ стенки резко возрастают;
- для резервуара объёмом  $20000 \text{ м}^3$  (рис. 3.14) КЗУ резко возрастают при  $\lambda_1 < 330$ ;
- для резервуара объёмом  $30000 \text{ м}^3$  (рис. 3.15) КЗУ резко возрастают при  $\lambda_1 < 270$ .

Как уже отмечено ранее, сама эффективность методики постановки колец жёсткости для повышения устойчивости стенок ВЦР при действии внешнего давления, направленного нормально к поверхности, не вызывает сомнения. Соответственно, принятая граница значения гибкости из принципа резкого увеличения интенсивности возрастания, полученного численными методами КЗУ стенки по сравнению с оболочкой без усиления, является рекомендованной.

#### **3.4.2. Рациональное количество колец жёсткости исходя из условия обеспечения минимальной металлоёмкости стенки**

Задача определения рационального количества колец жёсткости будет решаться расчётом веса металлоконструкций резервуара в зависимости от установки различного количества колец с использованием полученных выражений 3.5 и 3.6, определяющих требуемое отношение между гибкостями. Изменение толщины стенки вследствие установки колец жёсткости определяется исходя из требований прочности и устойчивости.

Предварительно был произведён расчёт на прочность согласно методике, приведенной в СП 16.13330.2011. В качестве хранимого нефтепродукта принималась сырая нефть с плотностью  $900 \text{ кг/м}^3$ . Также важно отметить, что согласно конструктивным требованиям [60] существует минимально допустимая толщина стенки. Аналогичные требования по минимальной толщине стенки приведены в API [84] и Еврокоде [92], что учитывалось при конструировании стенки.

Обеспечение устойчивости решалось на основе подхода, нормируемого в СП 16.13330.2011 [65] и СТО СА 03-002-2009 [60], поскольку нагрузки также были собраны по нормам Российской Федерации. Обеспечение устойчивости

проверяется согласно неравенству 1.9, приведенному в разделе 1, и здесь будет продублировано:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{CR1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{CR2}} \leq \gamma_C = 1 \quad . \quad (1.9)$$

Величины возникающих напряжений от ветра и вакуума определены на основе конечно-элементного расчета с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2015 R4. Значения критических напряжений определяются аналитически, по формулам, приведенным в СП 16.13330.2011.

Как уже было отмечено в разделе 1, постановка колец жёсткости влияет на кольцевые критические напряжения  $\sigma_{CR,2}$ , определяемые по формуле 1.10. Составляющие формул 1.9 и 1.10 приведены в разделе 1. Наличие колец учитывается заменой высоты стенки  $l$  в формуле 1.10 на высоту участка между кольцами жесткости:

$$\sigma_{CR,2} = 0.55E \frac{r}{l} \left( \frac{t}{r} \right)^{1.5} \quad . \quad (1.10)$$

Для выбранной методики размещения определено изменение общего веса металлоконструкций резервуара в зависимости от количества колец жёсткости. Учитывалось снижение требуемой толщины стенки за счёт постановки различного количества колец жёсткости. Исследование проводилось на примере всех рассматриваемых типоразмеров резервуаров. Сравнение приведено в виде зависимостей на рис. 3.16 - 3.18. Данные определялись для резервуаров различных объёмов с высотой стенки 18 м. На каждом из графиков представлены две зависимости: одна показывает изменение веса только стенки, вторая – изменение веса стенки с учётом наличия колец жёсткости на ней. Рассматривались случаи наличия от нуля до шести кольцевых рёбер жёсткости. При этом размещение колец жёсткости выполнялось из принципов обеспечения максимальной устойчивости стенки при действии, в том числе фактического распределения ветрового потока. Указанные принципы, выраженные через параметр  $\lambda$ , сформулированы в виде выражений 3.5 и 3.6. Значения параметра  $\lambda$  принимались согласно рекомендованным в пункте 3.4.1. данной работы.

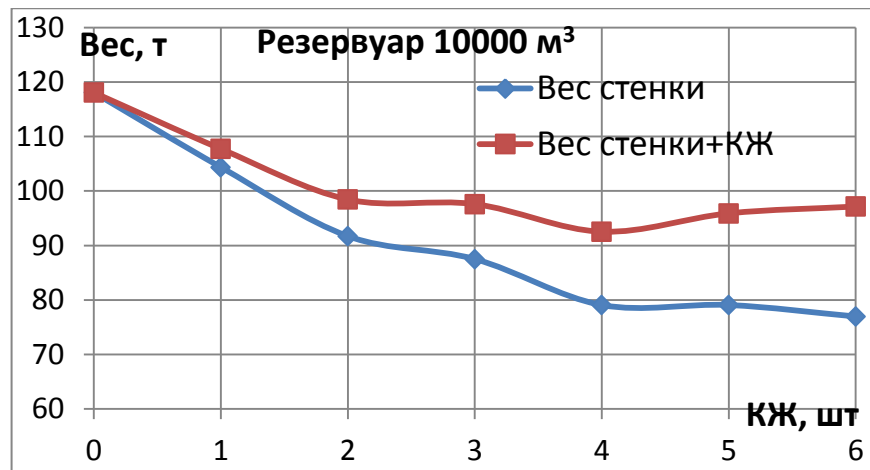


Рисунок 3.16. Изменения веса резервуара объемом 10000 м³ в зависимости от количества колец жесткости.

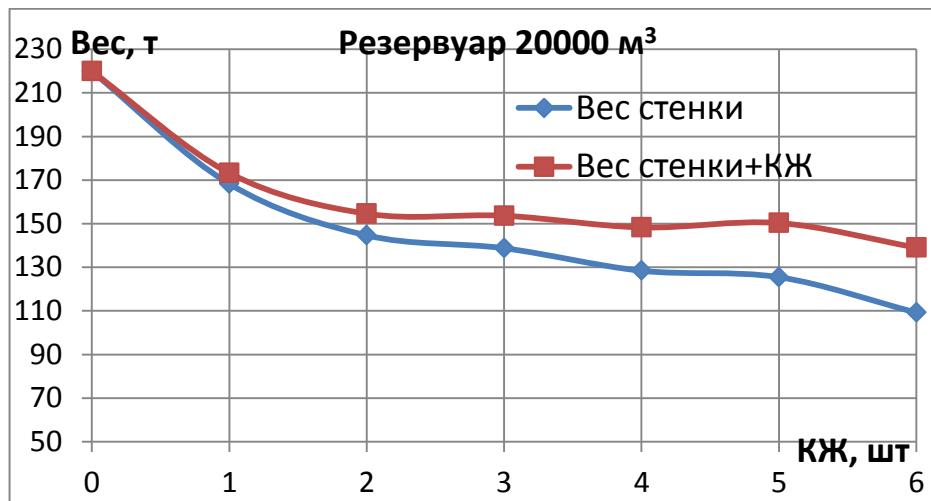


Рисунок 3.17. Изменения веса резервуара объемом 20000 м³ в зависимости от количества колец жесткости.

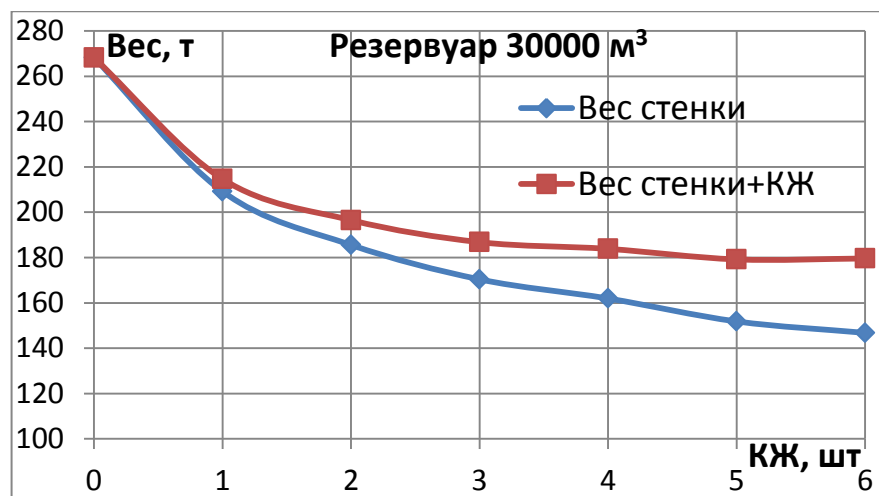


Рисунок 3.18. Изменение веса резервуара объемом 30000 м³ в зависимости от количества колец жесткости.

Анализируя представленные зависимости, можно отметить:

- для резервуара объёмом  $10000 \text{ м}^3$  снижение общего веса конструкций отмечается при установке до двух колец, при постановке трех колец и более рационального эффекта не наблюдается;
- для резервуара объёмом  $20000 \text{ м}^3$  общий вес конструкций снижается при установке до трех колец включительно, постановка следующих колец также не приводит к существенной экономии стали;
- для резервуара объёмом  $30000 \text{ м}^3$  общий вес конструкций снижается при установке до трех колец включительно. При установке последующих колец, как и для рассмотренных выше случаев, получаем аналогичный эффект.

Полученные зависимости можно объяснить отличиями напряжённно-деформированного состояния стенки резервуара с кольцами жёсткости и без. Подробное рассмотрение случаев распределения напряжений в зоне расположения КЖ для случая гидростатической нагрузки приведено в пункте 3.1, в случае ветровой нагрузки длина затухания краевого эффекта остаётся без изменения. Соответственно, расчётные значения кольцевых напряжений в пределах каждого пояса остаются практически неизменными, при этом осевые напряжения при рассматриваемом сочетании нагрузок оказывают минимальное влияние на НДС и устойчивость стенки резервуара. Отсюда логично следует, что повышение устойчивости стенки при установке колец жесткости достигается за счёт изменения величин критических значений кольцевых и меридиональных напряжений.

### **3.5. Выводы по третьей главе**

В результате проведённых численных исследований для оболочки без дефектов и несовершенств геометрии получены следующие результаты:

1. Определено, что постановка колец жёсткости и вызванный ею эффект локальных напряжений приводит к повышению значений осевых напряжений на 12-18%, и снижению кольцевых напряжений на 30-85% в зависимости от

жёсткости кольца, что в итоге не приводит к снижению несущей способности стенки при расчётах на прочность.

2. Установлен факт, что постановка колец жёсткости влияет на действующие значения кольцевых и меридиональных напряжений только в зоне своего расположения. Данная особенность подтверждается при учёте как ветровой, так и гидростатической нагрузки.

3. Через введённое понятие гибкости ( $\lambda$ ) определено соотношение  $\lambda$  между участками, которое следует обеспечивать при расположении кольцевых рёбер жёсткости:

- 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  $\lambda_i / \lambda_{i+1} = 0.8$ .

При таком расположении КЗУ стенки оказывается максимальным по сравнению с другими вариантами размещения колец.

4. Исходя из требований обеспечения максимального КЗУ и экономической целесообразности получены графики, позволяющие определить численные значения параметра  $\lambda_1$ , которые необходимо обеспечить для рационального расположения колец. Графики получены для ВЦР с отношением радиуса к высоте стенки ( $r/H$ ) от 0.79 до 1.27 с высотой до 18 м при скоростях ветра - до 50 м/с. Рациональная расстановка колец жесткости обеспечивает повышение КЗУ на 4-6% при сравнении с расстановкой, рекомендуемой нормативными документами Евросоюза, США, РФ, Украины.

5. На основе расчётов, выполненных согласно требованиям СТО СА 03-002-2009, установлено, что для резервуаров с параметром  $\lambda > 1000$  и отношением радиуса к высоте стенки  $r/H = 0.79$  постановка колец позволяет снизить вес конструкции стенки до 17 %, для резервуара  $r/H = 1.11$  – до 28%, для резервуара  $r/H = 1.27$  – до 29%. С учётом графиков интенсивности возрастания КЗУ от параметра  $\lambda$  полученные данные позволяют определить рациональное количество и шаг колец жёсткости для наиболее распространённых типоразмеров резервуаров.

**РАЗДЕЛ 4****РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ КОЛЕЦ ЖЁСТКОСТИ ПО  
РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОБОЛОЧКИ С  
ДЕФЕКТАМИ ФОРМЫ**

Согласно поставленным задачам исследования необходимо рассмотреть возможность уточнения методики размещения колец жёсткости в случае наличия типового характерного дефекта. В разделе 3, используя модель резервуара с цилиндрической стенкой без геометрических дефектов, были получены выражения, определяющие принцип расстановки колец жёсткости, обеспечивающий максимальную устойчивость стенки по сравнению с другими вариантами расстановки при соответствующем количестве колец. Также из условий обеспечения максимального КЗУ и минимальной металлоёмкости стенки через введённый параметр  $\lambda$  получены данные, позволяющие определить рациональное количество колец для ВЦР, рассматриваемых в данном исследовании объемов. Следовательно, целесообразно проверить применимость полученных соотношений для случая наличия типового дефекта.

В разделе 1 проведён обзор различных дефектов и несовершенств, возникающих в процессе монтажа и эксплуатации резервуаров. Там же отмечено, что одним из наиболее часто встречающихся дефектов сварных резервуаров является дефект угловатости горизонтальных и вертикальных монтажных швов. Указанные дефекты вызваны остаточными напряжениями при сварке, тем не менее образующееся в результате изменение формы оболочки позволяет отнести указанный дефект к геометрическим. Имеющиеся обширные данные по исследованию таких дефектов, а также их типовая форма и размеры позволяют определить конкретный диапазон исследования и расчётные случаи для эксплуатируемых резервуаров рассматриваемых объемов. Следовательно, основной задачей данного раздела будет исследование рационального размещения колец жёсткости для оболочки с дефектом угловатости монтажного сварного шва от действия расчётного сочетания нагрузок (пункт 2.5.3.).



#### 4.1. Установление закономерностей изменения КЗУ стенки на основе численного эксперимента в зависимости от ориентации и габаритов дефекта

Для выполнения задач данного раздела необходимо определить степень влияния ориентации дефекта на устойчивость в комплексе с возможными пределами варьирования параметров дефекта. При этом определяющим фактором для дальнейшего анализа будет ориентация дефекта.

##### 4.1.1. Устойчивость стенки резервуара в зависимости от ориентации дефекта

Варьируемыми параметрами дефектов будут глубина  $h$  и ширина  $B$  на поверхности оболочки. Для вертикального монтажного сварного шва параметры  $B$  и  $h$  изображены на рисунке 4.1.

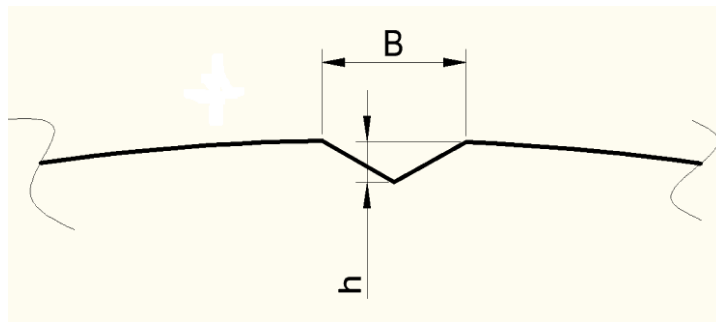


Рисунок 4.1. Варьируемые параметры дефекта вертикального монтажного сварного шва.

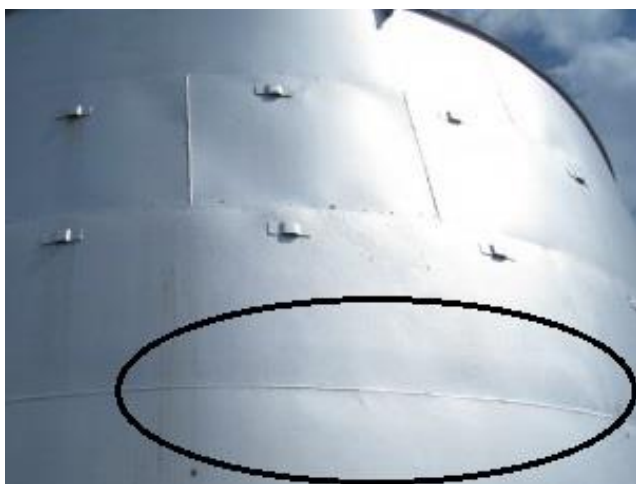
Из статистических данных, приведенных в работах [32, 36], были определены максимальные значения параметров  $B$  и  $h$  для горизонтально и вертикально расположенных дефектов такого типа, встречающихся в резервуарах объемами от 10 до 30 тысяч  $\text{м}^3$ . В итоге определены пределы варьирования в виде отношения:

- $B/h=60\dots130$ , при  $h$  – не более 50 мм и  $B$  - не более 800 мм;
- $B/h=10\dots60$ , при  $h$  – не более 50 мм и  $B$  - не более 1000 мм.

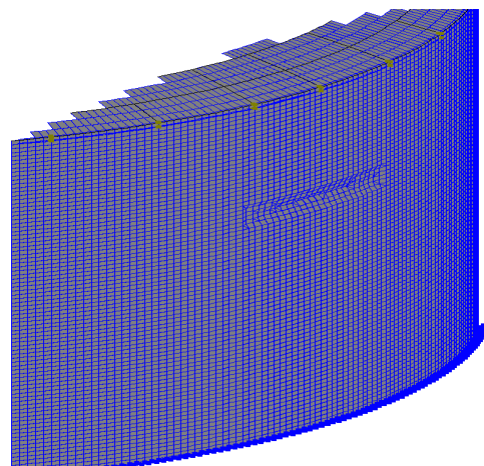
При этом длина горизонтальных дефектов не превышает 4% от длины окружности цилиндрической стенки. Вертикальный дефект имеет высоту почти равную высоте стенки.

Используя комплекс ЛИРА-САПР 2015 r4, на примере конструкции резервуара объёмом 20000 м<sup>3</sup> было проведено моделирование таких дефектов и оценена устойчивость цилиндрической стенки при действии фактического распределения ветрового потока и вакуума.

Изображение реальных дефектов, а также их реализацию в расчётном комплексе (фрагмент модели) можно увидеть на рисунке 45 а, б – для угловатости горизонтального монтажного и на рисунке 45 в, г – для угловатости вертикального монтажного сварного шва.



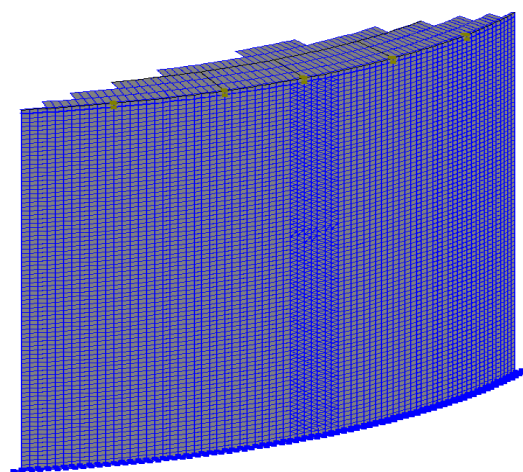
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.2. Угловатость монтажного сварного шва: а – горизонтального (фото), б – горизонтального (ЛИРА-САПР 2015 r4), в – вертикального (фото), г – вертикального (ЛИРА-САПР 2015 r4)

В результате определено, что при действии фактического распределения ветрового потока и наличии вакуума для рассмотренных типов резервуаров

наблюдается снижение устойчивости стенки только при наличии дефекта в виде вертикального монтажного сварного шва в определённых пределах, указанных в пункте 4.1.2. В свою очередь, при действии кольцевых сжимающих нагрузок горизонтальный дефект сварного шва в рассматриваемых пределах не снижает, а в некоторых случаях и незначительно повышает устойчивость стенки резервуара. Причиной полученных результатов для горизонтального сварного шва является то, что форма образующегося дефекта является своего рода кольцевым ребром жёсткости ограниченной длины, соответственно повышающая кольцевые критические напряжения.

#### **4.1.2. Выбор наиболее невыгодных параметров дефекта для устойчивости стенки**

Для выбранного типа дефекта с вертикальной ориентацией были определены параметры, приводящие к максимальному снижению устойчивости для резервуаров без кольцевых рёбер жесткости. Для этого в расчётном комплексе ЛИРА-САПР 2015 r4 моделировались различные габариты дефекта угловатости вертикального монтажного сварного шва в заданных пределах варьирования, и для каждого случая проводилось вычисление КЗУ стенки. Всего было рассмотрено более 10 различных вариантов сочетаний параметров дефектов для резервуаров с различным отношением радиуса к высоте стенки и отношением ширины к глубине дефекта. Результаты вычислений для наиболее характерных параметров дефектов и приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Устойчивость стенки резервуара без КЖ в зависимости от габаритов дефекта

В/н	КЗУ стенки, при отношении радиуса к высоте стенки:		
	0,79	1,11	1,27
Без дефекта	1,141	1,157	1,345
10	1,125	1,175	1,323
20	1,1	1,15	1,295
60	1,065	1,124	1,263

Полученные в результате данные позволяют определить наиболее невыгодные параметры рассматриваемого дефекта для их дальнейшего учёта при определении рационального шага кольцевых рёбер жесткости. Так, для рассматриваемых размеров ВЦР с характерным дефектом в случае отсутствия кольцевого усиления определено:

- 1) снижение КЗУ наблюдается при отношениях  $B/h=20-60$ , при  $h=10-30$  мм и  $B$  не более 800 мм;
- 2) при больших значениях  $h$  угловое несовершенство начинает работать как ребро жесткости, что приводит к повышению устойчивости оболочки;
- 3) учитывать следует дефект с параметром  $B/h=20-60$ .

## **4.2. Определение рационального количества колец жёсткости в случае наличия дефекта**

После получения данных о влиянии выбранных параметров дефекта на устойчивость цилиндрической оболочки без усиления была выполнена проверка соответствия полученных принципов размещения колец жёсткости (для идеальной оболочки) в случае наличия геометрического несовершенства, а также определено рекомендуемое значение параметра  $\lambda$ , позволяющее уточнить требуемое количество колец.

### **4.2.1. Расположение колец жёсткости, обеспечивающее максимальный КЗУ в случае наличия рассматриваемого дефекта**

Для проверки применимости выражений 3.5 и 3.6, обеспечивающих максимальную устойчивость цилиндрической стенки от действия фактического распределения ветрового потока и вакуума, были сформированы и рассмотрены численные модели резервуаров с характерным дефектом. Было исследовано 15 конечно-элементных моделей резервуаров объёмом 20000 м<sup>3</sup> с учётом требований, полученных по результатам экспериментальной верификации (пункт 2.5). В каждой модели рассматривалось наличие характерного дефекта, при этом КЖ размещались по нормативным методикам и исходя из принципов

оптимального размещения. Для каждого расчётного случая определялись значения КЗУ стенки. Результаты расчётов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2.

КЗУ стенки при различном размещении колец для ВЦР 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 из данных, приведённых в таблице 4.2, определено, что расположение усиливающих рёбер, исходя из соотношений между гибкостями (выражения 3.5 и 3.6), полученными для участков стенки оболочки без дефектов, являются наиболее выгодными и в случае наличия угловатости монтажного сварного шва. Следовательно, необходимое количество колец будет определено из указанного принципа размещения.

#### **4.2.2. Рациональное количество колец жёсткости при наличии рассматриваемого дефекта**

В то же время сравнение результатов в таблице 4.1 для оболочки без КЖ показало снижение КЗУ стенки с дефектом по сравнению с идеальной стенкой. Для нивелирования этого эффекта в данном пункте была пересмотрена требуемая гибкость участков при неизменном принципе размещения.

Для этого, используя полученные варианты наиболее невыгодных параметров дефекта, был проведен анализ изменения КЗУ стенки в зависимости от гибкости первого участка  $\lambda_1$  при использовании выражений для оптимального размещения колец стенки резервуара с идеальной геометрией. Рассматривались резервуары различных объёмов с наличием от 1 до 6 КЖ, и дефекты в двух вариантах, наиболее невыгодно влияющих на устойчивость от действия

кольцевых сжимающих нагрузок. Для каждого случая была рассмотрена численная модель в комплексе ЛИРА-САПР 2015 г4 и проведен расчёт на устойчивость. Результаты расчётов представлены в виде графиков на рисунке 4.3 а-в. На графиках 0 – график зависимости КЗУ от  $\lambda_1$  для оболочки без дефекта, 10 (при  $V/h=60$ ) и 25 (при  $V/h=20$ ) – глубины углового несовершенства в мм,

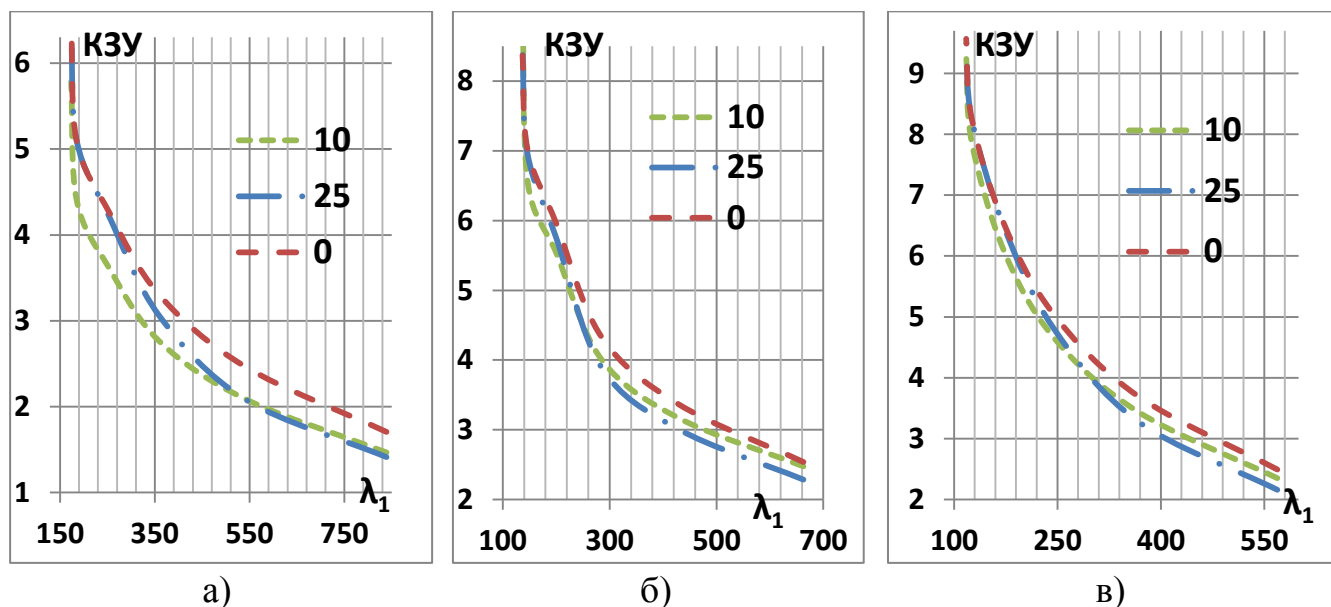


Рисунок 4.3. Изменение КЗУ стенки в зависимости от гибкости первого участка  $\lambda_1$  для резервуаров с дефектом и без объёмом: а – 10 тыс. м<sup>3</sup>; б – 20 тыс. м<sup>3</sup>; в – 30 тыс. м<sup>3</sup>.

Таким образом, как для случая отсутствия колец жёсткости (таблица 4.2), так и при их наличии (рисунок 4.3 а-в) КЗУ стенки оказывается ниже в случае имеющегося дефекта с подобранными в пункте 4.1.2. параметрами, чем для оболочки с идеальной геометрией. При этом принципиальная форма зависимостей возрастания интенсивности КЗУ схожа для трёх рассмотренных вариантов резервуаров соответствующего объёма. Это делает возможным определение уточнённого значения параметра  $\lambda_1$  для каждого из рассмотренных объёмов ВЦР, при котором КЗУ резко возрастает. Однако имеет смысл расширить указанную задачу и определить значения гибкостей первого участка для ВЦР с дефектом, позволяющих получить значение КЗУ, равное вычисленному для оболочки без рассматриваемого геометрического дефекта. Следовательно, в качестве итогового результата определены поправочные коэффициенты к требуемому диапазону гибкостей первого участка.

#### 4.2.3. Определение системы корректирующих коэффициентов для учёта наличия дефекта стенки

В развитие установленных закономерностей выполнена верификация зависимости КЗУ от  $\lambda_1$  для рассматриваемого дефекта и проведено уточнение правой границы рекомендуемой гибкости первого участка. Под правой границей подразумевается гибкость  $\lambda_1$ , полученная исходя из требований максимальной устойчивости при размещении КЖ и использовании выражений 3.5 и 3.6 для резервуаров всех рассматриваемых объёмов.

Для этого был сформирован массив данных, включающих в себя в том числе требуемую гибкость первого участка, при обеспечении которой наличие дефекта нивелируется, то есть обеспечиваются одинаковые значения КЗУ. Из графиков на рисунках 3.13-3.15 определялись соответствующие КЗУ для каждого значения рекомендуемой гибкости  $\lambda_1$  приведенные в пункте 3.4.1. Затем для указанных значений КЗУ из графиков на рисунке 4.3 а-в, а также данных, приведенных в приложении Б, определялись соответствующие гибкости  $\lambda_1$  для случаев двух рассмотренных вариантов габаритов дефекта. Таким образом, были получены требуемые гибкости первого участка для ВЦР различных объёмов с дефектом, обеспечивающие эквивалентную устойчивость при действии ветра и вакуума. Полученные данные приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3.

Данные для расчёта корректировочных коэффициентов

№	Отношение радиуса к высоте оболочки $r/H$	Требуемое значение $\lambda_1$ , обеспечивающее эквивалентную устойчивость оболочки с дефектом с параметрами:	
		$B/h=20$	$B/h=60$
1	0.79	540	560
2	0.85	495	515
3	1	350	370
4	1.11	290	310
5	1.27	250	275

Из данных, приведенных в таблице 4.3, были построены два графика. На рисунке 4.4а зависимость между  $r/H$  (радиус к высоте оболочки) и  $\lambda_1$  (нивелирующая наличие дефектов с параметрами, указанными в п. 4.1.2.). На рисунке 4.4б изображены зависимости, характеризующие изменение требуемой гибкости  $\lambda_1$  в зависимости от параметров дефекта ( $B/h$ ) для трёх типоразмеров резервуаров.

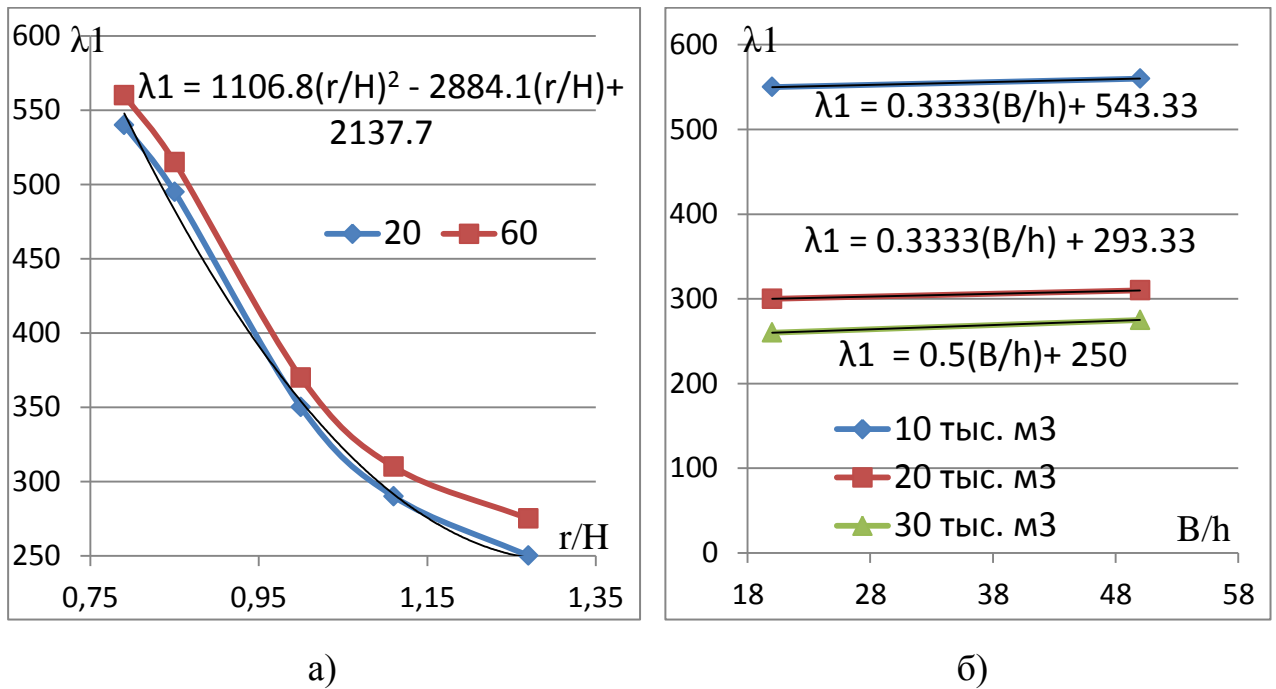


Рисунок 4.4. Требуемая гибкость в случае наличия дефекта в зависимости от параметров: а -  $r/H$  (радиус к высоте оболочки), 20 и 60 – параметры дефекта  $V/h$ ; б -  $B/h$  (ширина к глубине дефекта), 10..30 тыс. м<sup>3</sup> – объём ВЦР, для которого построена прямая.

Используя стандартные возможности аппроксимации функций в программном комплексе MS Office Excel, из графика на рисунке 4.4а было получено выражение для определения требуемой гибкости в зависимости от параметра  $r/H$ , при  $V/h=20$  (функция приведена на графике). При этом второй график, приведенный для  $V/h=60$ , почти полностью повторяет форму соседнего, отмечая некоторую разбежность, что позволяет добавить корректировочное значение в виде линейной функции для поиска промежуточных значений  $\lambda_1$  с учётом дефекта. Для получения такой функции расчёта значения  $\lambda_1$  с учётом варьируемого параметра дефекта  $V/h$  были построены графики, приведенные на



рисунке 4.4б. Они позволяют определить коэффициенты  $k$  (угол наклона каждой прямой), показывающие интенсивность возрастания требуемой гибкости в зависимости от параметра  $B/h$ . Данным коэффициентам присвоен индекс «деф».

### 4.3. Выводы по четвёртой главе

1. Определены тип и предельные значения параметров характерного типового дефекта в виде угловатости сварного соединения, оказывающего наиболее невыгодное воздействие на устойчивость цилиндрической стенки рассматриваемых резервуаров. Таким дефектом является угловатость вертикального монтажного сварного шва резервуаров, монтируемых по методу рулонирования, с отношением ширины к глубине дефекта  $B/h=20\dots60$ , при  $h=10-30$  мм и  $B$  не более 800 мм.

2. Подтверждена принципиальная применимость зависимостей по расстановке колец жёсткости, полученных для оболочки с идеальной геометрией на предмет получения максимальных значений КЗУ по сравнению с нормируемым размещением.

3. Посредством уточнения значений пределов рекомендуемого диапазона гибкостей определено рациональное количество колец жёсткости в случае наличия дефекта, обеспечивающее уровень КЗУ оболочки без геометрических несовершенств. Уточнение реализуется за счёт замены конкретных значений правой границы рекомендуемых гибкостей величиной -  $\lambda_{1(деф)}$ . Уточнённое значение гибкости определяется с учётом корректировочного коэффициента  $k_{деф}$ , который при отношении радиуса к высоте оболочки  $r/H=0,79..1,11$  равен 0,333, при  $r/H=1,27$  равен 0,5.

4. Определён диапазон рекомендуемых гибкостей для эксплуатируемых резервуаров, усиливаемых кольцами жесткости в случае наличия дефекта угловатости вертикального монтажного сварного шва.

## РАЗДЕЛ 5

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УТОЧНЕНИЮ МЕТОДИКИ РАЗМЕЩЕНИЯ  
КОЛЕЦ ЖЁСТКОСТИ****5.1. Рекомендации по уточнению требуемого шага колец для вновь проектируемых резервуаров**

Исходя из данных, полученных в пунктах 3.5.1. и 3.5.2., можно сделать вывод о рациональном количестве и необходимой гибкости участков, выраженных через параметр  $\lambda_1$ , при расположении колец жёсткости на стенке резервуара. Как отмечено ранее, все зависимости получены при учёте реальной эпюры ветрового давления в сочетании с нагрузкой от вакуума. Все выводы получены с учётом расположения колец на основе принципа, сформулированного в пункте 2.2.3, при котором КЗУ цилиндрической стенки ВЦР оказывается максимальным по сравнению с нормативными вариантами размещения. В качестве сравнительной единицы рассматривается гибкость первого участка  $\lambda_1$ .

Исходя из условия обеспечения максимальной устойчивости (пункт 3.5.1.) определено:

- для резервуаров 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.

Исходя из условия минимального расхода стали (п. 3.5.2), определено:

- для резервуаров с  $r/H = 0.79$  оптимальное количество КЖ не более 2-х, что соответствует гибкости первого участка более 540;
- для резервуара с  $r/H = 1.11$  оптимальное количество КЖ также не более 3-х, что соответствует гибкости первого участка более 280;
- для резервуара с  $r/H = 1.27$  оптимальное количество КЖ не более 3-х, что соответствует гибкости первого участка более 245.

Поскольку распределение ветрового потока, согласно СП [66] и Еврокоду [93], имеет одинаковую форму для рассматриваемых габаритов ВЦР, при

скоростях ветра до 50 м/с допустимо ввести в полученную зависимость учёт величины ветрового давления. Полученные рекомендованные значения гибкостей определены для расчётной скорости ветра 500 Па, что соответствует 29 м/с. На примере нескольких моделей резервуаров было определено, что увеличение скорости ветровой нагрузки пропорционально снижает КЗУ. Следовательно, выражение для определения необходимой гибкости первого участка для рассмотренных типоразмеров резервуаров допустимо записать в форме, учитывающей скорость ветрового потока [формула 5.1]:

$$\lambda = \frac{29}{V_p} \cdot \lambda_1, \quad (5.1)$$

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

Величина  $\lambda_1$  для каждого из рассматриваемых резервуаров будет равна:

- 1) для резервуаров с отношением радиуса к высоте стенки с  $r/H = 0.79$ , гибкость  $\lambda_1 = h/t_{э\text{кв}} = 540..570$ ;
- 2) для резервуаров с  $r/H = 1,11$ , гибкость  $\lambda_1 = 280..330$ ;
- 3) для резервуаров с  $r/H = 1,27$ , гибкость  $\lambda_1 = 245..270$ .

Таким образом, определены выражения и параметры величины  $\lambda_1$ , позволяющие выполнить оптимальную расстановку КЖ для резервуара с идеальной геометрией. Верхняя граница диапазона параметра  $\lambda_1$  ограничена требованием обеспечения максимального КЗУ (п. 3.5.1.), а нижняя – экономической целесообразностью (п. 3.5.2.).

## **5.2. Рекомендации по уточнению требуемого шага колец для эксплуатируемых резервуаров в случае наличия дефекта угловатости вертикального монтажного сварного шва**

Уточнение левой границы рекомендуемого диапазона гибкостей первого участка в случае наличия дефекта, не проводилось. Причиной тому служит отсутствие в аналитических формулах СП [65] и СТО [60] указаний по учёту таких дефектов при расчётах на прочность и устойчивость. Следовательно,

зависимости для требуемой металлоёмкости стенки в зависимости от различного количества колец остаются неизменными.

Используя полученные формулы в пункте 4.2.3, определена аналитическая зависимость 5.2 для определения правой границы рекомендуемой гибкости в зависимости от габаритов резервуара и параметров дефекта:

$$\lambda_{1(\text{деф})} = 1106.8 \left( \frac{r}{H} \right)^2 - 2884.1 \left( \frac{r}{H} \right) + 2137.7 + k_{\text{деф}} \left( \frac{B}{h} - 20 \right), \quad (5.2)$$

где:  $k_{\text{деф}}$  - при  $r/H=0,79..1,11$  равно 0,333; при  $r/H=1,27$  равно 0,5;

$B$  и  $h$  – параметры дефекта.

Следовательно, исходя из полученных данных, диапазон рекомендуемых гибкостей  $\lambda_1$  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  $\lambda_1 = \lambda_{1(деф)}$ ;
- 2) для резервуаров с  $r/H=1,11$ , гибкость  $\lambda_1 = 280.. \lambda_{1(деф)}$ ;
- 3) для резервуаров с  $r/H=1,27$ , гибкость  $\lambda_1 = 245.. \lambda_{1(деф)}$ .

### **5.3. Определение коэффициентов к нормативным выражениям для определения кольцевых критических напряжений потери устойчивости**

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. Важно отметить, что уточнения в методику расчёта ВЦР затрагивают только формулы для определения кольцевых критических напряжений цилиндрических оболочек рассматриваемых габаритов от действия фактического распределения ветрового

потока и вакуума. При этом существующие коэффициенты безопасности, учитывающие другие формы, типы дефектов, ошибки монтажа и другие факторы, не корректируются.

Для получения поправочных коэффициентов к значению критических кольцевых напряжений 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, которые не описываются в явном виде, 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.

### 5.3.1. Поправочные коэффициенты в случае отсутствия дефекта

Поправочные коэффициенты определялись сравнением приращений коэффициентов запаса устойчивости для ВЦР с наиболее невыгодными параметрами рассматриваемого дефекта и без него для двух нормативных документов. Результаты расчётов приведены в таблицах 5.1 и 5.2, где  $K(1)$  – коэффициент приращения КЗУ при расчёте по аналитической зависимости нормативных документов;  $K(2)$  – коэффициент приращения КЗУ, определяемый расчётом при помощи комплекса ЛИРА-САПР 2015 r4.

Таблица 5.1.

Отношение  $K(2) / K(1)$  (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 5.2.

Отношение  $K(2) / K(1)$  (без дефекта) для 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

Значения КЗУ, полученные для расчёта коэффициентов приращений  $K(1)$  и  $K(2)$ , приводятся в приложении В.

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).

### 5.3.2. Поправочные коэффициенты в случае наличия дефекта

Аналогичные расчёты были проведены для резервуаров, имеющих дефект в виде угловатости вертикального монтажного сварного шва с наиболее невыгодными параметрами, определёнными в разделе 4. Результаты вычислений поправочного коэффициента приведены в таблицах 5.3 и 5.4, в которых  $K(1)$  – коэффициент приращения КЗУ при расчёте по аналитической зависимости нормативных документов;  $K(2)$  – коэффициент приращения КЗУ, определяемый расчётом при помощи комплекса ЛИРА-САПР 2015 r4.

Таблица 5.3.

Отношение  $K(2) / K(1)$  (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 5.4.

Отношение  $K(2) / K(1)$  (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

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).

#### **5.4. Уточнённая методика размещения колец жёсткости**

Основываясь на полученных в результате исследования данных и зависимостях, предложены уточнения в методику обеспечения устойчивости цилиндрических стенок резервуаров от действия поперечных сжимающих нагрузок в части расположения кольцевых рёбер жесткости.

Ниже приводится алгоритм расстановки колец жёсткости при расчёте стенки резервуара на устойчивость с учётом рекомендуемых поправочных коэффициентов к аналитическим выражениям для расчёта кольцевых критических напряжений потери устойчивости, используемым в нормативных документах.

Принципиальная последовательность размещения КЖ следующая:

1. Определяется гибкость всей стенки по формуле 5.3:

$$\lambda_0 = H^2 \div \sum_{i=1}^n t_i h_i \quad (5.3)$$

В формуле 5.2:  $H$  – 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. Данные величины были определены в разделах 3, 4 и для удобства вынесены в приложение Г.

3. Для резервуара рассматриваемых габаритов определяется подходящий диапазон гибкостей первого участка; определяется ориентировочное требуемое количество колец по формуле:  $n = \lambda_0 / \lambda_1$  (5.4)

4. Далее 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:

$$n^* = \log_b \left( 1 - \frac{\left( \frac{\lambda_0 k}{\lambda_{1y} a} - 1 - \frac{1}{a} \right) (1 - b)}{b} \right) , \quad (5.5)$$

где  $\lambda_{1y}$  – уточнённая гибкость 1-го участка стенки;  $\lambda_0$  – гибкость всей стенки;

$a, b, k$  – см. приложение Г.

Формула (5.4) получена из выражения для определения суммы геометрической прогрессии, из которой выражена степень  $n^*$ , поскольку полученные зависимости между гибкостями участков для расстановки двух и более колец являются, по сути, геометрической прогрессией. Поправочный коэффициент  $k$  необходим для корректировки значения суммы геометрической прогрессии, так как сумма гибкостей всех участков не равна общей гибкости стенки  $\lambda_0$ .

5. Вычисляется требуемая гибкость каждого участка из отношений (3.5) и (3.6), определённых в разделе 3:

$$\lambda_2 = \lambda_1 / 0.74 \quad \text{если } n=1 . \quad (3.5)$$

$$\lambda_1 / \lambda_2 = 0.85 \quad (8) \text{ и } \lambda_i / \lambda_{i+1} = 0.8 \quad \text{если } n > 1 . \quad (3.6)$$

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. Основной особенностью алгоритма является минимизация невязки по методу ограниченной оптимизации линейным приближением. Упрощённая блок-схема приведена в приложении Д. Код



реализован на программном языке Python и приведен в приложении Е. Можно отметить, что программный код предназначен для случая расстановки трёх и более колец жёсткости, в других случаях его применение нецелесообразно.

7. В случае расчёта по нормативным документам СП16.13330.2011 [65] и СТО СА 03-002-2009 [60] при использовании методики размещения колец жёсткости, приведенной в данной работе, допустимо умножить полученные по формулам (1.10) и (1.11) на величины поправочных коэффициентов, соответственно определённых в пунктах 5.1.1. и 5.1.2.

### **5.5. Выводы по пятой главе**

1. На основе зависимостей, полученных в результате проведенных исследований, предложены значения повышающих коэффициентов для аналитического вычисления значений кольцевых критических напряжений по нормам СТО СА 03-002-2009 и СП16.13330.2017 в случае использования методики размещения колец, приведенной в данной работе. Повышающие коэффициенты определены для случаев оболочки с идеальной геометрией и при наличии дефекта в виде угловатости вертикального монтажного сварного шва.

2. 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 максимальное значение коэффициента запаса устойчивости при одновременном снижении металлоемкости стенки.

3. Разработана программа для автоматизированного размещения кольцевых рёбер жёсткости на стенках ВЦР для ЭВМ на программном языке Python.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 ребер жесткости.

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 жесткости от действия ветра и вакуума, в трёх конструктивных вариантах 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 объемами 10-30 тыс. м<sup>3</sup> со стенкой переменной толщины с идеальной геометрией установлены зависимости, позволяющие выполнить рациональную расстановку колец жесткости, а именно:

- 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  $\lambda_i / \lambda_{i+1} = 0,8$ ,

при одновременном увеличении КЗУ по сравнению с рекомендациями действующих нормативных документов на 4-6%. Для этой цели рекомендована зависимость  $\lambda = (29 \div V_p) \cdot \lambda_1$ , где: для резервуаров с отношением радиуса к высоте стенки с  $r/H = 0,79$ , гибкость  $\lambda_1 = 540..570$ ; для резервуаров с  $r/H = 1,11$ , гибкость  $\lambda_1 = 280..330$ ; для резервуаров с  $r/H = 1,27$ , гибкость  $\lambda_1 = 245..270$ .

5. Установлены граничные параметры дефекта угловатости вертикального сварного шва, при которых наблюдается максимальное снижение устойчивости стенки сжимающей поперечной нагрузкой (ветер и вакуум). Для зависимостей, полученных для оболочки с идеальной геометрией, разработана система корректировочных 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 переменной толщины, учитывающая в отличие от ранее разработанных фактическую неравномерность распределения ветровой нагрузки по поверхности стенки резервуара и обеспечивающая максимальные значения коэффициента запаса устойчивости при одновременном снижении металлоемкости стенки. Методика реализована в виде программы автоматизированного размещения кольцевых ребер жесткости на стенках ВЦР для ЭВМ на программном языке Python.

7. На основе проведенных исследований полученных зависимостей предложен повышающий 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.

8. Результаты данной работы учтены при вариантном проектировании технических решений по усилению конструкций силосов, имеющих дефекты и повреждения, с помощью тонкостенных металлических оболочек, выполненных ООО «Донецкий Промстройинипроект» в рамках договора №20-1/15/45-15/8-ООЗС, а также внедрены в учебный процесс в ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» при подготовке специалистов по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство», магистерская программа «Теория и проектирование зданий и сооружений», в лекционном материале дисциплины «Расчет и проектирование зданий и сооружений»

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Агеева А.М. Остаточный ресурс стальных резервуаров химии и нефтехимии, отработавших нормативные сроки эксплуатации [Текст] / Агеева А.М., Колесов А.И. // Вестник МГСУ. – 2011. – №1. – С. 388-391
2. Алфутов Н.А. Устойчивость цилиндрической оболочки, подкрепленной поперечным силовым набором и нагруженной внешним равномерным давлением [Текст] / Н.А. Алфутов // Инж. сб. АН СССР. – 1956. - Т.23, № 23. - С. 36-46.
3. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем [Текст] / Н.А. Алфутов. – М.: Машиностроение, 1978. – 311 с.
4. Аммосов Г.С. Особенности коррозионного истощения ресурса резервуаров и оценка интенсивности возрастания напряженного состояния в сварных швах [Текст] / Г.С. Аммосов, Д.С. Иванов, А.П. Аммосов // Наука и образование. - 2017. - № 1. - С. 75-80.
5. Беленя Е.И. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов [Текст] / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников и др.; Под общ. ред. Е. И. Беленя. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986 – 560 с., ил.
6. Березин В.Л., Шутов В.Е. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов [Текст] / Березин В.Л., Шутов В.Е. –М.: Недра, 1973. — 200 с.
7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
8. Бубнов И. Г. Строительная механика корабля. Часть II. [Текст] / И.Г. Бубнов - СПб.: Типография Морского министерства, 1914. – 309 с.
9. Василькин А.А. Влияние геометрических несовершенств монтажных стыков стенки на малоцикловую прочность вертикальных стальных резервуаров [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.23.01: защищена 22.01.07: утв. 15.07.07 / Василькин Андрей Александрович. – М., 2007. – 185 с.:ил.
10. Водопьянов Р.Ю. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2015. Руководство пользователя. Обучающие примеры [Текст]: учебное пособие / Р.Ю. Водопьянов, В.П. Титок, А.Е. Артамонова. - М.: Б.и., 2015. - 459 с.

11. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков – М.: Недра, 1984. — 151 с.
12. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А.С. Вольмир. -2-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука, 1967. – 984 с.
13. Власов В.З. Избранные труды. Общая теория оболочек. Том 1[Текст] / В.З. Власов. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 528 с.
14. Власов В.З. Строительная механика оболочек [Текст] / В.З. Власов. - М. -Л.: Глав. ред. строительной литературы, 1936. - 263 с.
15. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер – М.: Издательство СКАД СОФТ, 2007. - 609 с.
16. Гайсин Э.Ш. Современное состояние проблем обеспечения надежности резервуаров для нефти и нефтепродуктов / Э.Ш. Гайсин, М.Ш. Гайсин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. - 2016. - №2. - С. 31-40.
17. Гвоздев А.А. Еще о безмоментной теории оболочек [Текст] / А.А. Гвоздев // Строительная промышленность: Журнал Центр. Союзстроя НКТП СССР. - 1933, - № 2. - С. 43-44.
18. Герасименко А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния РВС-5000 с трещиноподобным дефектом в первом поясе [Текст] / А.А. Герасименко // В сборнике докладов: Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Том I / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. - С. 503-504.
19. Григолюк Э. И. Устойчивость оболочек / Григолюк Э. И., Кабанов В. В. – М.: Наука, 1978.– 359 с.
20. Григолюк. Э. И. Устойчивость упруго-пластических неоднородных оболочек [Текст] / Э.И. Григолюк // Доклады АН СССР. – 1958. – Т.119, № 4. – С. 663–666.

21. Губанов В.В. Экспериментальное исследование местных напряжений в цилиндрических оболочках / В.В. Губанов, В.Н. Васылев, А.В. Голиков // Вестник ДонНАСА: сб. научн. трудов. – Макеевка: ДонНАСА. - 2011. – № 4(90). – С. 172–179.
22. Губанов, В. В. Влияние локальной вогнутости на работу несущей оболочки высотных сооружений [Текст] / В. В. Губанов, А. В. Голиков, А. Н. Кульчицкий // Металлические конструкции. - 2011. - Т.17, № 3. С. 177–183.
23. Дергачев А.В. Анализ работоспособности стальных резервуаров по результатам неразрушающего контроля сварных соединений [Текст] / А.В. Дергачёв // Технологии техносферной безопасности. - 2012. – №3. – С. 56-58.
24. ДБН В.2.6-163:2010. Державні будівельні норми України. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / Мінрегіонбуд України. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. - 202 с
25. ДСТУ Б В.2.6-183:2011. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. [Электронный ресурс] : – Режим доступа : [http://old.minregion.gov.ua/attachments/content/5080/\\_6.pdf](http://old.minregion.gov.ua/attachments/content/5080/_6.pdf)
26. Евтихин В.Ф. Повышение надежности стенок вертикальных стальных резервуаров [Текст] / В.Ф.Евтихин, В.П. Маркелов // Транспорт и хранение нефти и углеводородного сырья НТИС. – 1976. - №5. - С. 5-8.
27. Егоров Е. А. Устойчивость вертикальных стальных резервуаров с кольцевыми ребрами жесткости [Текст] / Е. А. Егоров, К.И. Дмитренко // Строительство, материаловедение, машиностроение. - 2013. - №69. - С. 182-186.
28. Егоров Е. А. Исследование вопросов устойчивости стальных вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] / Е.А. Егоров, Ю.В. Федоряка // Металлические конструкции. - 2006. - №1(9). - С. 89-97.
29. Землянский А.А. Техническая диагностика и оценка эксплуатационной надежности резервуаров большого объема/ А.А. Землянский // Вестник СГТУ. - 2005. - № 4 (9). - С. 111-112.

30. 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 // Науковедение. - 2017. - №6(9). - С. 10-23.
31. Ивченко Ю. В. Особенности поведения вертикальных цилиндрических резервуаров при ветровой нагрузке [Текст] / Ю.В. Ивченко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. - 2012. - № 11. - С. 27–30.
32. Колосков А. Д. Исследование напряженно-деформированного состояния стенок вертикальных цилиндрических резервуаров из рулонных заготовок в зоне монтажных стыков: автореф. диссертации на соиск. ученой степени канд. техн. наук: 05.23.01 / Колосоков Александр Дмитриевич : МИСИ - М.,1987.
33. Крысько А.А. Методика численного исследования напряжённо - деформированного состояния стальных вертикальных цилиндрических резервуаров с учётом несовершенств геометрической формы /А. А. Крысько, Е. В. Конопацкий , А. Н. Миронов, В. Ф. Мущанов // Металлические конструкции. 2016. – Т.22, №1. - С. 123-137.
34. Крысько А. А. Геометрическое моделирование стенки стального вертикального цилиндрического резервуара с несовершенствами [Текст] / А. А. Крысько, Е. В. Конопацкий // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. - 2013. - Вып. 3. - С. 126-129.
35. Кондрашова О.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров [Текст] / О. Г. Кондрашова, М. Н. Назарова // Нефтегазовое дело. - 2004. - № 2.
36. Кулик, А. А. Действительная работа монтажных стыков вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] : дис..... канд. техн. наук: 05.23.01 / Кулик Александр Александрович ; Донбасская гос. академия строительства и архитектуры. - Макеевка, 2003. - 171 л. - Библиогр.: л. 121-132.
37. Купреишвили С.М. Записки резервуарщика. [Текст] / С.М. Купришвили - М. ; СПб. : Нестор-История, 2015. - 936 с.
38. Лапшин А.А. Конструирование и расчет вертикальных цилиндрических

резервуаров низкого давления: учебное пособие / А.А. Лапшин, А.И. Колесов, М.А. Агеева – Н. Новгород, ННГАСУ, 2009. – 122 с.

39. Матвеев, Е.А. Исследование устойчивости и закритического деформирования упругих цилиндрических оболочек при действии внешнего давления в высоких приближениях: автореф. дис..... канд. физ.-мат. наук : 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела / Моск. гос. техн. ун-т (МАМИ). — М.: МАМИ, 2011 — 17 с.: ил.

40. Механика в СССР за 50 лет [Текст] / Под ред. Л.И. Седова и др. М.: Наука, 1972. - Т.3. - 478 с.

41. Мочалин А. А. Устойчивость цилиндрической оболочки переменной толщины от неравномерной радиальной нагрузки [Текст] / А.А. Мочалин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. - №1. – С. 12-17.

42. Муталлапов, Н. Г. Становление и развитие системы нефтеснабжения в России [Текст] : автореф. дис..... канд. техн. наук : 07.00.10 / Н.Г.Муталлапов. - Уфа, 2007. - 26 с. - Библиогр.: с. 26. - 90

43. Муштари Х. М. Некоторые обобщения теории тонких оболочек с приложениями к задаче устойчивости упругого равновесия [Текст] / Х.М. Муштари // Изв. физ.-мат. о-ва при Казанском ун-те. – 1938. - Т. 21. - С. 71-150.

44. Мущанов В.Ф. Анализ численных и аналитических значений коэффициента запаса устойчивости стенки резервуара [Текст] / В.Ф. Мущанов, М.Н. Цепляев // Вестник ДонНАСА. - 2018. - №3(131). - С. 105-115.

45. Мущанов В. Ф. Исследования напряженно-деформированного состояния уторного узла в вертикальных цилиндрических резервуарах объемом 10000 и 50000 м<sup>3</sup> / В. Ф. Мущанов, Д. И. Роменский // Металлические конструкции - 2012. – Т.18, № 1. – С. 61-71.

46. 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.



47. 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.

48. 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. - 2017. - №3(23). - С. 123-137.

49. Мущанов В.Ф. Уточнение НДС стенки резервуара при объёмном моделировании колец жесткости [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

50. Мущанов В.Ф. Уточненные подходы к расчету и проектированию вертикальных цилиндрических резервуаров, эксплуатируемых в составе группы [Электронный ресурс] / А.В. Зубенко, В.Ф. Мущанов, М.Н. Цепляев // Наукоемкие технологии и инновации. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. – Ч.2. - С. 80-85. [Электронный ресурс]. - Режим доступа:

<http://conf.bstu.ru/shared/attachments/200934>

51. Новожилов В. В. Краткий очерк развития теории оболочек в СССР [Текст] / В.В. Новожилов // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1970. №6-7. - С. 3-22.

52. Обзор рынка металлоконструкций [Электронный ресурс] //Украинский центр стального строительства. - 2018. - Режим доступа: <https://www.uscc.ua/files/14.pdf>

53. Окунева С.Е. Тенденции и перспективы развития мирового нефтяного рынка [Текст] / С.Е. Окунева // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2017. – Т. 10, № 8. – С. 877 – 894.

54. Папкович П.Ф. Теория упругости [Текст] / П.Ф. Папкович - М.: Оборонгиз, 1939. – 640 с.

55. Пастернак П.Л. Практический расчет складок и цилиндрических оболочек с учетом изгибающих моментов [Текст] / П.Л. Пастернак // Проект и стандарт: Журнал Глав-стройпрома НКТП СССР. - 1933, - № 2. - С. 31-36.
56. Петропавловская И. А. В. Г. Шухов - выдающийся инженер и ученый [Текст] / И.А. Петропавловская – М.: Наука, 1984. – 96 с.
57. Пикуль В.В. К теории устойчивости оболочек [Текст] / В.В. Пикуль // Докл. РАН. – 2007. - Т. 416, №3. - С. 341-343.
58. Порываев И.А., М. Н. Сафиуллин, В. В. Юрченко. Металлические конструкции. Расчет элементов и соединений с использованием программного комплекса SCAD [Текст]: учебное пособие / И.А. Порываев, М. Н. Сафиуллин, В. В. Юрченко - М.: Издательство СКАД СОФТ, Издательство АСВ, 2012.- 338 с.
59. Российский климат стал еще суровее [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://andrometa.ru/rossijskij-klimat-stal-esche-surovee.html> (дата обращения: 09.09.2019).
60. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов - Серия 03. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов (СТО-СА-03-002 2009) / М., 2009 – 216 с.
61. Сафарян М.К., Иванцов О.М. Проектирование и сооружение стальных резервуаров [Текст] / М.К. Сафарян, О.М. Иванцов - М.: Гостоптехиздат, 1961. – 328 с.
62. Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры [Текст] / М.К. Сафарян - М.: Недра, 1987. – 200 с.
63. Сафарян М.К. и др. Сооружение Нефтебаз и газохранилищ [Текст] / М.К. Сафарян - М.: Недра, 1973. - 246 с.
64. Сильницкий П.Ф. Влияние дефектов сварки на напряженно-деформированное состояние резервуаров : дис..... кандидата технических наук : 25.00.19 / Сильницкий Павел Федорович; [Место защиты: Тюмен. гос. нефтегаз. ун-т].- Тюмень, 2012.- 181 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/2122.

65. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции [Текст]. – Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. – Введ. 2011- 05-20 / Министерство регионального развития РФ. – М. : ОАО «ЦПП», 2011. – 172 с.
66. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия [Текст]. Актуализированная редакция взамен СНиП 2.01.07-85. – Введ. 2011-05-20 / ОАО «НИЦ "Строительство"». – М. : Минстрой России. – 2011. – 81 с.
67. Спириденко, Л.М. Проблемы нормативно-технической базы в резервуаростроении / Л. М. Спириденко, В. К. Липский, И. А. Свирко // Техническое нормирование, стандартизация и сертификация в строительстве. - 2009. - № 2. - С. 45-48.
68. Тарасенко, А.А. Численное моделирование подъема резервуара при ремонте кольцевого фундамента [Текст]/ А.А. Тарасенко, С.В. Чирков// Технические науки. 2014. Вып. 8. С.155-158.
69. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем / С. П. Тимошенко. – ОГИЗ: Гостехиздат, 1946.– 532 с.
70. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / С. П. Тимошенко – М.: Наука, 1971. – 807 с.
71. Тимошенко С. П. К вопросу о деформации и устойчивости цилиндрической оболочки / С. П. Тимошенко // Вестн. о-ва технол.– 1914. – Т. 21. – С. 785–792.
72. Тодчук В. А. Устойчивость цилиндрических оболочек [Электронный ресурс] / В. А. Тодчук // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2016. - № 3. - С. 25-28. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kiem\\_2016\\_3\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kiem_2016_3_7).
73. Типовой проект 704-1-70 Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 20000 куб. м. - М. : ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1984. - Ал. 1. -44 с.
74. Типовой проект 704-1-170.84. Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 10000 куб. м. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара. М.: ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. 46 с.

75. Типовой проект 704-1-171.84. Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 20000 куб. м. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара.

76. Типовой проект 704-1-172.84. Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 30 000 куб. м. Альбом I. Рабочие чертежи КМ резервуара. М.: ЦНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР, 1972. 46 с.

77. Тянь В.К. Системный анализ и прогноз поведения металлоконструкций при ремонте стальных резервуаров, изготовленных методом рулонирования [Текст] / В.К. Тянь, П.А. Комаров, О.В. Худяков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2012. - Т.14, № 1-2. - С. 435-438.

78. Филиппов В.В. Техническое состояние резервуаров для хранения нефтепродуктов объединения «Якутскнефтепродукт» / В.В. Филиппов, В.А. Прохоров, С.В. Аргунов, И.И. Буслаева // Известия вузов. Строительство. – 1993. - №7-8. - С. 13-16

79. Фадина Ю.И. Анализ российского рынка полимеров и дальнейшие пути его развития [Текст] / Ю.И. Фадина // Бизнес-образование в экономике знаний. – 2017. - №1. – С. 99-101.

80. Ханухов Х.М. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций [Текст] / Х.М. Ханухов, А.В. Алипов // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2011. № 10. С. 1-40.

81. Цепляев, М. Н. Моделирование реальной эпюры ветрового давления на цилиндрический резервуар в среде SCAD [Текст] / М. Н. Цепляев // Металлические конструкции. – 2016. Т. 22. – № 4. – с. 183–192.

82. Чепур, П.В. Особенности деформирования крупногабаритных резервуаров со стационарной крышей при неосесимметричном воздействии ветровой нагрузки [Текст] / П.В. Чепур, А.А. Тарасенко // Технические науки. - 2015. - №12. - С.97-102.

83. Швырков С.А. Статистика квазимгновенных разрушений резервуаров для

хранения нефти и нефтепродуктов [Текст] / С.А. Швырков, С.А. Горячев, В.П. Сорокоумов // Пожаровзрывобезопасность. - 2007. - Т.16, №6. – С. 48-52.

84. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage [Текст]. – Eleventh edition. – Washington, D. C. : API Publishing Services, 2011. – 449 p. – (USA Standard).

85. Azzuni, E. Stability of open top cylindrical steel storage tanks: Design of top wind girder [Текст] / E. Azzuni, S. Guzey // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2017. - Vol. 139, No 3. – Pp. 639-649.

86. Bu F. A rational design approach of intermediate wind girders on large storage tanks [Текст] / F. Bu, C. Qian // Thin-Walled Structures. - 2015. – Vol. 92, No.1. - Pp. 76-81.

87. Bu, F. On the Rational Design of the Top Wind Girder of Large Storage Tanks [Текст] / F. Bu, C. Qian // Thin-Walled Structures. – 2016. - Vol. 99, pp. 91–96.

88. Burgos C. A. Buckling estimates for oil storage tanks: Effect of simplified modeling of the roof and wind girder [Текст] / C. A. Burgos, J. C. Batista-Abreu H. D. Calabró , R. C. Jaca , L. A. Godoy // Thin-Walled Structures. - 2015. - Vol. 91. - Pp. 29 – 37.

89. Burgos C. A. Wind buckling of tanks with conical roof considering shielding by another tank [Текст] / C. A. Burgos, R. C. Jaca, J. L. Lassig, L. A. Godoy // Thin-Walled Structures. - 2014. - Vol. 84, No.1. - Pp. 226-240.

90. Bushnell D. Difficulties in Optimization of Imperfect Stiffened [Электронный ресурс] / D. Bushnell, C. Rankin // Conference Paper in Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – Newport, 2012. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/097f/36b3d6201f4ca552f47ad8228fca92d19640.pdf>

91. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-6: Strength and stability of shell structures. - Brussels: Management Centre, 2007. – 94 с. – (European Standard).

92. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4-2. Tanks : EN 1993-4-2. – Brussels: Management Centre, 2007. – 55 с. – (European Standard).

93. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions: EN 1991-1-4. – Brussels: Management Centre, 2010. – 149 с. – (European Standard).

94. Flügge W. Die stabilität der Kreiszyinderschale [Текст] / W. Flügge // Ing.-Archiv. – 1932. – No. 5 (3). - Pp. 463-506.
95. Godoy L. A. Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks [Текст] / L. A. Godoy // Structural Engineering and Mechanics. - 2012. - No. 5(13). - Pp. 1-9.
96. Godoy L. A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies [Текст] / L. A. Godoy // Thin Walled Structures. – 2016. - Vol. 103. - Pp. 1-21.
97. Gorski J. Identification and simulation of initial geometrical imperfections of steel cylindrical tanks [Текст] / J.Gorski, T. Mikulski // Journal of theoretical and applied mechanics. – 2008. Vol. 46, No. 2. – Pp. 413-434.
98. Jahangiri Me. Computational Buckling Analysis of Wind Loaded Cylindrical Storage Tanks [Текст] / Me. Jahangiri, M.H. Fakhrabadi, Mi. Jahangiri // Majlesi Journal of Energy Management. - 2012. - No. 4(1). - Pp. 23-31.
99. Kim. S. Buckling strength of the cylindrical shell and tank subjected to axially compressive loads [Текст] / S. Kim, C.Kim // Thin Walled Structures. – 2002. - Vol. 40.- Pp. 329–353.
100. Lemak D. Influence of Ring Stiffeners on a Steel Cylindrical Shell [Текст] / D. Lemak, J. Studnicka // Acta Polytechnica. - 2005. - No. 1(45). - Pp. 56-63.
101. Lorenz R. Die nicht assensymmetrische [Текст] / R. Lorenz // Knickung dünnwandiger Hohlzylinder Zeitschrift.– 1911. – Vol. 12, No. 7. – Pp. 241–260.
102. Maraveas C. Numerical evaluation on shell buckling of empty thin-walled steel tanks under wind load according to current American and European design codes [Текст] / C. Maraveas, G. A. Balokas, K. D. Tsavdaridis // Thin-Walled Structures. - 2015. – Vol. 95, No. 1. - Pp. 152-160.
103. McGrath R. V. Stability of API Standard 650 Tank Shells [Текст] / R. V. McGrath // American Petroleum Institute - 1963, Vol. 3. Pp. 458–469.
104. Mises R. Der kritische Aussendruck zylindrischer [Текст] / R. von Mises // Zeit. V.D.I. – 1914. – vol. 58. – Pp. 750-755.
105. Mushchanov V., Zubenko G., Moskalenko I. Numerical simulation of wind

pressure on a vertical cylindrical tank surface [Текст] / V. Mushchanov, Zubenko G., Moskalenko I. // Metal Constructions.- 2013.- No. 3(19). - Pp. 173–182.

106. 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. – No. 7 (83). - Pp. 49-62.

107. Nguyen H. T. Buckling under the external pressure of cylindrical shells [Текст] / H. T. Nguyen, I. Elishakoff, V. T. Nguyen // International Journal of Solids and Structures. – 2009. – No.46. – Pp. 4163–4168.

108. Olivar O. The Effects of Extreme Winds on Industrial Equipment [Текст] / O. Olivar, S. Mayorgaa, F. Giraldoa, M. Sánchez-Silvaa, E. Salzanob // Chemical engineering transactions – 2018. – Vol.67. – Pp. 871-876.

109. Portela G. Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a conical roof [Текст] / G. Portela, L. A. Godoy // Journal of Constructional Steel Research. – 2005. - No.61(6). – Pp. 786-807.

110. Prabu. B. Parametric study on buckling behaviour of thin stainless steel cylindrical shells [Текст] / B. Prabua, A.V.Raviprakasha, A.Venkatramanb // Thin-Walled Structures. – 2010. – Vol.48, No 8. - Pp. 102–114.

111. Samigullin G.H. Evaluation of stress-strain state of steel cylindrical tank with dent defect [Текст] / G.H. Samigullin, A.A. Lyagova, A.S.Dmitriyeva // International Journal of Applied Engineering Research.- 2017. - Vol.12, No. 5.- Pp. 761-764.

112. Samuelson L.A. Shell Stability Handbook 1st Edition [Текст] / L.A. Samuelson, S.F. Eggwertz // London: CRC Press, 1992. - 300 p.

113. Seleim S. Buckling behaviour of ring-stiffened cylinders; experimental study [Текст] / S. Seleim, J. Roorda // Thin-Walled Structures. – 1986. – Vol. 4. – Pp. 203-222.

114. Southwell R. V. On the Collapse of Tubes by External Pressure [Текст] / R. V. Southwell // Phil. Mag. - 1913. - Pp. 687-698.

115. Shokrzadeh A. Strengthening effects of spiral stairway on the buckling behavior of metal tanks under wind and vacuum pressures [Текст] / A. Shokrzadeh, M. Sohrabi // Thin-Walled Structures. – 2016. – Vol. 106. – Pp. 437-447.

116. Shokrzadeh A. Buckling of ground based steel tanks subjected to wind and vacuum pressures considering uniform internal and external corrosion [Текст] / A. Shokrzadeh, M. Sohrabi // Thin-Walled Structures. – 2016. – Vol. 108. – Pp. 333-350.
117. Sun J. Buckling of cylindrical shells under external pressure in a Hamiltonian system [Текст] / J. Sun, X. Xu, C. W. Lim. // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2014. - Vol. 52, No. 3. - Pp. 641-653.
118. Sušnik, G. A. Analysis of damaged storage tank [Электронный ресурс] / G. A. Sušnik // Diplomska naloga; University of Ljubljana. – Ljubljana, 2016 - 79 p. - Режим доступа: <http://drugg.fgg.uni-lj.si/5911/>
119. Teng J.G. Buckling of Thin Metal Shells. London [Текст] / J.G. Teng, J.M. Rotter - CRC Press, 2003. - 520 p.
120. Uematsu Y. Wind Loads on Open-topped Oil-storage Tanks in Various Arrangements [Текст] / Y. Uematsu, J. Yasunaga, C. Koo // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2015. – Vol. 138 (3). – Pp. 77-86.
121. Uematsu Y. Effects of wind girders on the buckling of open-topped storage tanks under quasi-static wind loading [Текст] / Y. Uematsu, T. Yamaguchi, J. Yasunaga // Thin Walled Structures. – 2018. - Vol. 124. - Pp. 1-12.
122. Windenburg D.F. Collapse by Instability of Thin Cylindrical Shells Under External Pressure [Текст] / D.F. Windenburg, C. Trilling Trans //ASME. – 1934. Vol. 11. - Pp 819-825.
123. Zeybek Ö. Strength and stiffness requirements for intermediate ring stiffeners on discretely cylindrical shells [Текст] / Zeybek Ö, Topkaya C, Rotter J.M. // Thin-Walled Structures. – 2015. – Vol. 96. – Pp. 64-74.
124. Zhao Y. Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure [Текст] / Y. Zhao, Q. Cao, L. Su // Thin Walled Structures. – 2013. - Vol. 73. - Pp. 337-349.
125. Zhu Y. Buckling Analysis of Thin Walled Cylinder with Combination of Large and Small Stiffening Rings under External Pressure [Текст] / Y. Zhu, J.H. Dong, B.J. Gao // Procedia Engineering. - 2015. - No. 1(130). - Pp. 364-373.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### (методика задания ветровой нагрузки через текстовый файл в программе ЛИРА-САПР 2015 r4)

Принципиальная последовательность задания нагрузки:

1. Согласно используемых норм проектирования устанавливаются все коэффициенты для определения ветровой нагрузки, которые не меняются в зависимости от местоположения рассматриваемой точки на конструкции.
2. Для переменных коэффициентов определяются граничные значения, промежуточные вычисляются интерполяцией.
3. Формируется таблица с вычисленными при помощи программного комплекса MS Office Excel значениями ветрового давления на каждый конечный элемент. Фрагмент получаемой таблицы приведен ниже – таблица А.1.

Таблица А.1. Ветровое давление на каждый КЭ

№ КЭ	№ пояса	Угол $\alpha$	$C_{p0}$	$\Psi_{\lambda\alpha}$	$C_{pe}$	z, м	$C_e(z)$	$q_p$ , кН/м <sup>2</sup>	$W_e$ , кН/м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0,359	0,989	1	0,9898	0,25	1,09	0,469	0,464
2	1	1,0778	0,97	1	0,969	0,25	1,09	0,469	0,454
3	1	1,796	0,949	1	0,949	0,25	1,09	0,469	0,445
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
36070	72	1,796	0,949	1	0,949	18	1,55	0,667	0,633
36071	72	1,078	0,97	1	0,97	18	1,55	0,667	0,646

Продолжение таблицы А.1. - Ветровое давление на каждый КЭ

№ КЭ	...	Тип нагрузки	Направление		Значение нагрузки: № элемента		
1	...	11	12	13	14	15	16
1	...	6	3		0,464:1		/
2	...	6	3		0,454:2		/
3	...	6	3		0,445:3		/
...	...	...	...	...	...	...	...
36070	...	6	3		0,633:36070		/
36071	...	6	3		0,646:36071		/

Комментарии к таблице:

столбец 1 и 2 - № конечного элемента и № пояса конечных элементов;  
 столбец 3 – это угол  $\alpha$  между нормальными начального и рассматриваемого конечного элемента в пределах одного пояса в градусах;  
 столбец 7 – высота рассматриваемой точки от земли;  
 столбцы 4, 5, 6, 8, 9, 10 – коэффициенты для определения ветровой нагрузки;  
 столбец 11 – номер вида нагрузки;  
 столбец 12 – направление нагрузки (ось z соответствует номеру 3);  
 столбец 14 – формируется с помощью функции MS Office Excel «=СЦЕПИТЬ(..)».  
 столбцы 13, 15, 16 – элементы программного кода.

4. Созданную в расчётном комплексе модель стенки без нагрузок необходимо сохранить через текстовый файл. Открыв сохраненный текстовый файл, необходимо перейти в конец и сделать запись, состоящую из двух строк:

(6/

**1 Name="Ветровая нагрузка" Type=9 Mode=1 ReliabilityFactor=1.1 /)**

(7/

**6 3 Load=1 0.464:1 /**

Примечание: 1 - № элемента; 0,464 – значение нагрузки на указанный элемент из таблицы А.1 .

5. Далее необходимо скопировать все строки, начиная со второй, из таблицы А.1. в текстовый файл. В последней строке задания нагрузок необходимо закрыть скобку.

6) Сохранив сформированный текстовый файл, необходимо открыть программу ЛИРА-САПР и выбрать функцию «Прочитать из текстового файла».

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(расчёт КЗУ стенки для различных резервуаров при различном положении колец жёсткости)

Таблица Б.1. КЗУ стенки при различном положении одного КЖ (ВЦР 10000 м<sup>3</sup>, высота стенки 12 м)

Высота расположения кольца, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
5	1.15	0,94
6,5	0.81	1,2
8	0.56	1,4
9,5	0.37	1,37
11	0.23	1,2

Таблица Б.2. КЗУ стенки при различном положении двух КЖ (ВЦР 10000 м<sup>3</sup>, высота стенки 12 м)

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=4; H_2=8$	$\lambda_1/\lambda_2=0,96; \lambda_2/\lambda_3=1.18$	1,84
Смещённые вверх	$H_1=8; H_2=10$	$\lambda_1/\lambda_2=0,93; \lambda_2/\lambda_3=0.27$	1,6
Равные $\lambda$	$H_1=4,5; H_2=8,25$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=1$	1,9
$\lambda_1/\lambda_2=0,74$	$H_1=5,4; H_2=9,1$	$\lambda_1/\lambda_2=0.78; \lambda_2/\lambda_3=0.79$	1,95

Таблица Б.3. КЗУ стенки при различном положении трёх КЖ (ВЦР 10000 м<sup>3</sup>, высота стенки 12 м)

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=3,15; H_2=6.15; H_3=9.15$	$\lambda_1/\lambda_2=1.05; \lambda_2/\lambda_3=0.96; \lambda_3/\lambda_4=1.23$	3
С равной гибкостью ( $\lambda$ ) между участками	$H_1=3,45; H_2=6,3; H_3=9,15$	$\lambda_1/\lambda_2=2; \lambda_2/\lambda_3=1.01; \lambda_3/\lambda_4=0.99$	3,2
По оптимальному отношению из п. 3.3.2.	$H_1=4,4; H_2=7,45; H_3=10.1$	$\lambda_1/\lambda_2=0,72; \lambda_2/\lambda_3=0.87; \lambda_3/\lambda_4=0.83$	3,35

Таблица Б.4. КЗУ стенки при различном положении одного КЖ (ВЦР 10000 м<sup>3</sup>, высота стенки 18 м)

Высота расположения кольца, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
4,875	3,32	0,81
6,5	2,1	0,91
9,15	1,15	1,08
9,75	1	1,14
13,875	0,35	1,04

Таблица Б.5. КЗУ стенки при различном положении двух КЖ (ВЦР 10000 м<sup>3</sup>, высота стенки 18 м)

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=6,15; H_2=12,15$	$\lambda_1/\lambda_2=1,04; \lambda_2/\lambda_3=1,14$	1,52
Смещённые вверх	$H_1=12,3; H_2=15,25$	$\lambda_1/\lambda_2=1,02; \lambda_2/\lambda_3=0,27$	1,24
С равной гибкостью ( $\lambda$ ) между участками	$H_1=6,6; H_2=12,5$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=1$	1,61
$\lambda_1/\lambda_2=0,74$	$H_1=6,8; H_2=13,1$	$\lambda_1/\lambda_2=0,71; \lambda_2/\lambda_3=0,79$	1,63

Таблица Б.6. КЗУ стенки при различном положении трёх КЖ (ВЦР 10000 м<sup>3</sup>, высота стенки 18 м)

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=4,65; H_2=9,15;$ $H_3=13,65$	$\lambda_1/\lambda_2=1,03; \lambda_2/\lambda_3=1,06; \lambda_3/\lambda_4=1,13$	2,7
С равной гибкостью ( $\lambda$ ) между участками	$H_1=3,45; H_2=6,3;$ $H_3=9,15$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=1; \lambda_3/\lambda_4=1$	3,05
По оптимальному отношению из п. 3.3.2.	$H_1=5,9; H_2=10,4;$ $H_3=14,7$	$\lambda_1/\lambda_2=0,84; \lambda_2/\lambda_3=0,81; \lambda_3/\lambda_4=0,85$	3,31

Таблица Б.7. КЗУ стенки при различном положении одного КЖ (ВЦР 20000 м<sup>3</sup>, высота стенки 12 м)

Высота расположения кольца, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
5	1,476	1,01
6,5	0,88	1,4
8	0,52	1,55
9,5	0,27	1,41
11	0,093	1,2

Таблица Б.8. КЗУ стенки при различном положении двух КЖ (ВЦР 20000 м<sup>3</sup>, высота стенки 12 м)

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=4; H_2=8$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=1.06$	2.1
Смещённые вверх	$H_1=8; H_2=10$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=0.25$	1.75
С равной гибкостью ( $\lambda$ ) между участками	$H_1=4,2; H_2=8,1$	$\lambda_1/\lambda_2=1; \lambda_2/\lambda_3=1$	2.32
$\lambda_1/\lambda_2=0,74$	$H_1=5,5; H_2=9,3$	$\lambda_1/\lambda_2=0.71; \lambda_2/\lambda_3=0.72$	2.4

Таблица Б.9. КЗУ стенки при различном положении трёх КЖ (ВЦР 20000 м<sup>3</sup>, высота стенки 12 м)

Вариант размещения	Высота расположения колец жёсткости, м	Отношение между гибкостями участков $\lambda$ (сверху-вниз)	КЗУ стенки
С равным шагом	$H_1=3,15; H_2=6,15; H_3=9,15$	$\lambda_1/\lambda_2=0,95; \lambda_2/\lambda_3=1.00; \lambda_3/\lambda_4=1.035$	3.5
С равной гибкостью ( $\lambda$ ) между участками	$H_1=3,15; H_2=6,15; H_3=9,15$	$\lambda_1/\lambda_2=0,95; \lambda_2/\lambda_3=1; \lambda_3/\lambda_4=1,03$	3.6
По оптимальному отношению из п. 3.3.2.	$H_1=4,4; H_2=7,7; H_3=10.05$	$\lambda_1/\lambda_2=0,83; \lambda_2/\lambda_3=0.72; \lambda_3/\lambda_4=0.8$	3.8

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

**(вычисление коэффициентов приращения для КЗУ при их вычислении  
аналитически и численно)**

Таблица В.1. КЗУ стенки для ВЦР различных объёмов

Объём ВЦР	Методика вычисления КЗУ	КЗУ стенки при количестве КЖ:					
		0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	СП16.13330.2017	1.00	1.96	2.63	3.26	3.84	4.21
	СТО СА 03-002-2009	1.06	2.09	2.69	3.34	4.14	4.90
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (без дефекта)	1.14	2.35	3.07	3.92	4.94	5.78
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (с дефектом)	1.13	2.27	2.93	3.70	4.73	5.68
20 тыс. м <sup>3</sup>	СП16.13330.2017	1.01	1.86	2.66	3.39	4.73	5.88
	СТО СА 03-002-2009	1.06	1.96	2.81	3.57	4.94	6.07
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (без дефекта)	1.16	2.25	3.30	4.30	6.02	7.12
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (с дефектом)	1.14	2.21	3.15	4.03	5.77	6.99
30 тыс. м <sup>3</sup>	СП16.13330.2017	1.29	3.16	4.24	4.76	5.89	6.90
	СТО СА 03-002-2009	1.37	3.35	4.49	5.03	6.17	7.16
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (без дефекта)	1.35	3.72	5.16	5.77	7.69	9.22
	ЛИРА-САПР 2015 г4 (с дефектом)	1.33	3.60	4.93	5.48	7.37	9.05

Таблица В.2. Коэффициент приращения К(2) – приращение КЗУ, определенных численным методом, при постановке КЖ по сравнению с первоначальным (для ВЦР без дефекта)

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	2.05	2.68	3.43	4.31	5.05
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.94	2.85	3.71	5.19	6.14
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	2.76	3.83	4.28	5.70	6.84

Таблица В.3. Коэффициент приращения К(2) – прирост численных КЗУ при постановке КЖ по сравнению с первоначальным (для ВЦР с дефектом)

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	2.01	2.60	3.28	4.20	5.03
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.93	2.76	3.52	5.04	6.11
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	2.72	3.72	4.14	5.56	6.83

Таблица В.4. Коэффициент приращения К(1) – приращение КЗУ, определенных аналитическим методом, при постановке КЖ по сравнению с первоначальным (СП16.13330.2017)

КЖ, шт	0	1	2	3	4	5
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.93	2.51	3.19	3.86	4.23
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.85	2.64	3.37	4.71	5.85
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.97	2.64	3.28	3.86	4.23

Таблица В.5. Коэффициент приращения К(1) – приращение КЗУ, определенных аналитическим методом, при постановке КЖ по сравнению с первоначальным (СТО СА 03-002-2009)

КЖ, шт	1.00	1.98	2.54	3.16	3.92	4.64
10 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.85	2.64	3.36	4.65	5.72
20 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	2.45	3.29	3.68	4.52	5.24
30 тыс. м <sup>3</sup>	1.00	1.98	2.54	3.16	3.92	4.64

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г****(табличные значения гибкостей и коэффициентов для применения методики рационального расположения колец жесткости)****Г.1. Значения  $\lambda_1$  для оболочки без дефектов геометрии**

- 1) для резервуаров с  $r/H = 0,79$ , гибкость  $\lambda_1 = 540..570$ ;
- 2) для резервуаров с  $r/H = 1,11$ , гибкость  $\lambda_1 = 280..480$ ;
- 3) для резервуаров с  $r/H = 1,27$ , гибкость  $\lambda_1 = 245..270$ .

Промежуточные значения следует определять линейной интерполяцией.

**Г.2. Значения  $\lambda_1$  для оболочки с дефектом в виде угловатости вертикального монтажного шва цилиндрической стенки**

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

Формула для определения  $\lambda_{1(ДЕФ)}$  приведена в разделе 4 настоящей работы под номером 28. Промежуточные значения следует определять линейной интерполяцией.

**Г.3. Значения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $k$  для определения требуемого количества кольцевых рёбер жёсткости  $n^*$** 

- 1) для резервуаров с  $r/H = 0,79$  параметр  $k = 1,00437$ ;
- 2) для резервуаров с  $r/H = 1,11$ , параметр  $k = 1,01$ ;
- 3) для резервуаров с  $r/H = 1,27$ , параметр  $k = 1,016$ ;
- 4) параметр  $a = 0,85$ ;
- 5) параметр  $b = 1.25$ .

Промежуточные значения следует определять линейной интерполяцией.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(блок-схема и код программы для автоматизации методики размещения)

Д.1. Блок-схема и код программы для автоматизации методики размещения

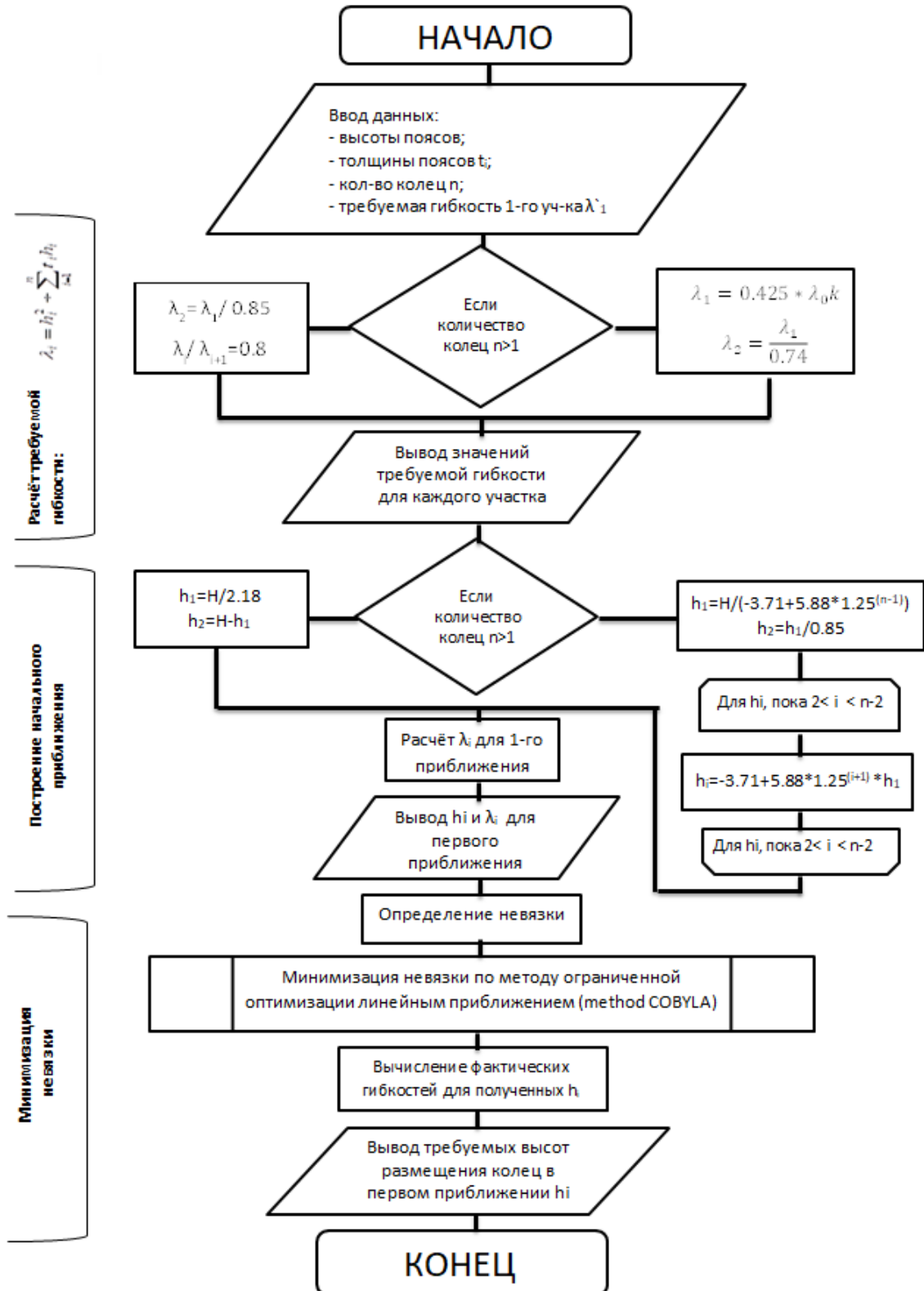


Рис. Б.1. Блок-схема программы для автоматизации методики размещения кольцевых рёбер жёсткости на стенках ВЦР.

## Д.2. Код программы автоматизации методики размещения кольцевых рёбер жёсткости на стенках ВЦР для языка программирования Python

Ввод параметров резервуара:

```
h = []      # input parameter
t = []      # input parameter
full_h = sum(h)
```

Ввод количества колец жесткости и первую гибкость

```
ring_count = 1      # input parameter
lambda_1 = 270      # input parameter
lambda_count = ring_count + 1
lambdas = [lambda_1]
if lambda_count == 2:
    lambdas += [lambda_1 / 0.74]
else:
    last_lambda = lambda_1 / 0.85
    lambdas += [last_lambda]
    for i in range(lambda_count - 2):
        last_lambda /= 0.8
        lambdas += [last_lambda]
```

Функция расчёта гибкостей участков по высотам расположения колец жесткости

```
def get_lambdas (ring_h):
    ring_h.sort()
    ring_h += [full_h]
    prev_h = 0
    curr_gammas = []
    for curr_h_i in ring_h:
        curr_h = curr_h_i
        if curr_h < 0:
            curr_h = 0
        if curr_h > full_h:
            curr_h = full_h
        #print ("curr", prev_h, curr_h)
        curr_gamma_nom = (curr_h - prev_h) * (curr_h - prev_h)
        curr_gamma_div = 0
        if curr_gamma_nom > 0.0001:
            prev_i = 0
            curr_i = 0
            for i in range(len(h)):
                curr_i += h[i]
                l = prev_i
                if l < prev_h:
                    l = prev_h
                r = curr_i
                if r > curr_h:
                    r = curr_h
                if l < r:
                    #print ("  calc", l, r)
                    curr_gamma_div += (r - l) * t[i]
```

```

    prev_i = curr_i
else:
    curr_gamma_div = 1
    prev_h = curr_h
    curr_gammas += [curr_gamma_nom / curr_gamma_div]
return curr_gammas

```

### Функция построения начального приближения

```

def get_first():
    shift_1 = full_h / (-3.70588+5.8824*1.25 ** (ring_count-1))
    shifts = [shift_1]
    if ring_count == 1:
        shifts += [full_h / 2.17647]
    else:
        last_shift = shift_1 / 0.85
        shifts += [last_shift + shift_1]
        for i in range(ring_count-2):
            shifts += [(-3.70588+5.8824*1.25 ** (i+1))*shift_1]
    return shifts

def get_bounds():
    ret = []
    for i in range(ring_count):
        ret += [(0, full_h)]
    return ret

```

### Функция построения границ

```

def get_bounds():
    ret = []
    for i in range(ring_count):
        ret += [(0, full_h)]
    return ret

```

### Функция невязки

```

def residual(curr):
    res = 0
    for a,b in zip(lambdas, curr):
        res += (a-b)*(a-b)
    return res

```

### Алгоритм минимизации невязки

```

from scipy.optimize import minimize, LinearConstraint
import numpy as np
for method in ['COBYLA', 'SLSQP']:
    res = minimize(residual, get_first(), method=method, jac='2-point',
                   constraints=lin_constraint, tol=0.001)
    print ("Method:", method)
    print (" Result:", res.x)
    print (" Result residual:", residual(get_lambdas (res.x.tolist())))
    print (" Result lambda:", get_lambdas (res.x.tolist()))
    print (" Target lambda:", lambdas)
    print ()

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е



ООО «Донецкий Промстройниипроект», 283004, г. Донецк, ул. Университетская, 112,  
Тел. (062)303-22-59 (дополнительные номера: проектная часть 01, научная часть 02, факс 22),  
E-mail: donpromstroy@gmail.com

На № 120319 № 1/135-06

На  
№

Диссертационный совет Д 01.006.02 при

ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Цепляева Максима Николаевича, представленную на соискание учёной  
степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 –

Строительный конструкции, здания и сооружения.

Результаты научных исследований аспиранта кафедры  
«Теоретическая и прикладная механика» ГОУ ВПО «Донбасская  
национальная академия строительства и архитектуры» Цепляева М.Н. учтены  
при вариантном проектировании технических решений по усилению  
конструкций силосов имеющих дефекты и повреждения с помощью  
тонкостенных металлических оболочек. Работа выполнялась в рамках  
договоров:

- 1) №20-1/15/45-15/8-ООЗС в 2015 году при подготовке проектной  
документации по теме: «Обследование технического состояния  
строительных конструкций цементных силосов №11-№18 здания  
склада цеха помола цемента», Инв. №300989.

Справка выдана для представления в специализированный  
диссертационный совет Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская  
национальная академия строительства и архитектуры» для защиты  
кандидатской диссертационной работы и получения ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные  
конструкции, здания и сооружения»

Директор  
ООО «Донецкий Промстройниипроект»



подпись

С. В. Маликов

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



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

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,  
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, идент. код 02070795

от 27.02.2019 № 01  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

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

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Цепляева Максима Николаевича на тему «Обеспечение устойчивости стенок  
вертикальных цилиндрических резервуаров на основе рационального расположения колец  
жесткости», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по  
специальности 05.23.01 – Строительный конструкции, здания и сооружения.

Комиссия в составе: проректора по учебной работе, д.т.н., профессора  
Нездойминова В.И., декана строительного факультета, к.т.н., доцента  
Лозинского Э.А., начальника учебного отдела, к.э.н., доцента Сухины А.А.  
свидетельствует, что при подготовке специалистов по направлению  
подготовки 08.04.01 «Строительство», магистерская программа «Теория и  
проектирование зданий и сооружений», в лекционном материале дисциплин  
«Расчет и проектирование зданий и сооружений» используются  
теоретические и практические данные по кандидатской диссертационной  
работе Цепляева Максима Николаевича на тему «Обеспечение устойчивости  
стенок вертикальных цилиндрических резервуаров на основе рационального  
расположения колец жесткости».

Члены комиссии:

Проректор по учебной работе,

д.т.н., профессор

Декан строительного факультета,

к.т.н., доцент

Начальник учебного отдела,

к.э.н., доцент



В.И. Нездойминов

Э.А. Лозинский

А.А. Сухина