

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ХАБАШНЭ Хусейн

ВЛИНИЕ ДЕФЕКТОВ ГЕОМЕТРИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ И КОНСТРУКЦИЙ ИХ УСИЛЕНИЯ
В ВИДЕ ГИБКИХ БАНДАЖЕЙ

05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1993

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена на кафедрах "Металлические и деревянные конструкции" Днепропетровского инженерно-строительного института и "Строительные конструкции" Винницкого политехнического института.

Научные руководители - кандидат технических наук, доцент
Егоров Е. А.
кандидат технических наук,
профессор Свердлов В. Д.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой строительных
конструкций Днепропетровского инсти-
тута инженеров железнодорожного тран-
спорта (ДИИТ), действительный член
международной Академии компьютерных
наук и систем М. И. Казакевич
кандидат технических наук
С. М. Антонов

Ведущая организация - Арендное предприятие Днепрпроект-
стальконструкция

Защита состоится "26" января 1994 г. на заседании
специализированного ученого совета К 068.32.01 Днепропетровского
инженерно-строительного института по адресу: 320006, г. Днепро-
петровск, ул. Чернышевского, 24а, ДИСИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "21" декабря 1993 г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета

В. Л. СЕДИН
В. Л. СЕДИН

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00802841 (N)

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертация посвящена вопросам совершенствования инженерных методов расчета стальных вертикальных цилиндрических резервуаров, в том числе и конструкций их усиления, применяемых для восстановления несущей способности резервуаров, подвергнутых физическому износу в процессе эксплуатации. Основная отличительная особенность общей направленности диссертационной работы состояла в том, чтобы в конечном итоге получить расчетные формулы для проверки прочности стального резервуара, находящегося в эксплуатации, с его конкретным физическим износом и имеющимися в его корпусе дефектами и повреждениями. Такая постановка исследований является весьма актуальной в настоящее время, поскольку в Украине находится в эксплуатации большое количество стальных резервуаров, срок службы которых составляет 20-25 и более лет. Безопасность их дальнейшей эксплуатации может быть обеспечена только путем квалифицированного технического освидетельствования этих конструкций и в некоторых случаях последующего их усиления для восстановления несущей способности.

Предметом исследования данной диссертационной работы является цилиндрическая стенка – главный расчетный элемент стальных вертикальных цилиндрических резервуаров. Основное внимание при этом было уделено изучению влияния геометрических несовершенств на основные компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС) стенки, в том числе и конструкций её усиления. В диссертации за основу был принят вариант усиления гибкими бандажами в виде стальных лент. Указанный вид усиления получил в последние годы наибольшее распространение на нефтебазах Украины и России.

Следует отметить, что принятая в диссертации тема исследований является актуальной для любой страны, имеющей резервуарные парки для хранения нефти и нефтепродуктов. К таким странам относится и Иордания, где эксплуатируется большое количество стальных вертикальных цилиндрических резервуаров различной вместимости и где интенсивность коррозионного износа нефтяных резервуаров весьма высока.

Цель работы. Исследование напряженно-деформированного состояния и разработка инженерных методов расчета стальных вертикальных цилиндрических резервуаров, в том числе и резервуаров, усиленных бандажами, при наличии геометрических несовершенств, произвольно расположенных по поверхности цилиндрической стенки.

Задачи исследования.

1. Провести анализ параметров локальных геометрических несовершенств, характерных для цилиндрической стенки стальных резервуаров, и апробировать возможность аналитического описания их.
2. Разработать алгоритмы для определения основных компонентов напряженно-деформированного состояния в свободной и бандажированной цилиндрической стенке вертикального резервуара при наличии в ней геометрических несовершенств.
3. Исследовать закономерности изменения характера напряженно-деформированного состояния в свободной и бандажированной цилиндрической стенке в зависимости от параметров локальных геометрических несовершенств.
4. Провести экспериментально-теоретические исследования по определению особенностей распределения напряжений в цилиндрической стенке резервуара и бандажах на этапе создания предварительного напряжения.

5. Провести апробацию предложенных расчетных методов путем сравнения результатов расчета с данными испытаний натурального резервуара объемом 5000 кубм.

6. Разработать рекомендации для учета локальных геометрических несовершенств цилиндрической стенки в инженерных расчетах стальных резервуаров.

Научная новизна. Научная новизна проведенных исследований состоит в следующем:

1. Разработаны алгоритмы для определения основных компонент напряженно-деформированного состояния в свободной и бандажированной цилиндрической стенке стального резервуара при наличии произвольно расположенных по поверхности стенки локальных геометрических несовершенств.

2. Исследованы закономерности влияния геометрических несовершенств на основные компоненты напряженно-деформированного состояния цилиндрической стенки резервуара.

3. Получена количественная оценка возможного перераспределения растягивающих напряжений между цилиндрической стенкой резервуара и усиливающими бандажами в зависимости от параметров геометрических несовершенств цилиндрической стенки.

4. Уточнено значение коэффициента трения в аналитических зависимостях, описывающих распределение напряжений в цилиндрической стенке резервуара и бандажах на этапе создания предварительного напряжения.

Практическая ценность работы. Результаты проведенных исследований могут быть непосредственно использованы в практике эксплуатации стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при решении следующих вопросов:

- проведение расчетов на прочность и деформативность при технических освидетельствованиях резервуаров с локальными гео-

метрическими несовершенствами в цилиндрической стенке ;

- определение требуемого количества и расчетных сечений усиливающих элементов с учетом возможного перераспределения растягивающих напряжений между цилиндрической стенкой резервуара и конструкциями усиления (например, гибкие бандажи в виде стальных лент) ;

- создание предварительного напряжения цилиндрической стенки при усилении ее гибкими затягивающимися бандажами.

Все выше перечисленное в конечном счете повышает надежность эксплуатации резервуаров, а во многих случаях позволяет получить прямой экономический эффект за счет более правильного определения допустимого уровня залива нефтепродукта в резервуар, а также за счет сокращения требуемого количества усиливающих элементов.

Внедрение результатов. Результаты диссертации использованы Днепропетровским инженерно-строительным институтом и республиканским объединением "Укрнефтетранс" при проведении технических освидетельствований, а также при проектировании конструкций усиления стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов в различных регионах Украины.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены на научных семинарах кафедры металлических и деревянных конструкций ДИСИ в 1992-1993 годах, на международном симпозиуме "Материалы для строительства" в г.Днепропетровске в 1993 году, на научном семинаре кафедры строительные конструкции Винницкого политехнического института в 1993 году.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводы по работе, список литературы и приложения. Работа содержит 232 страницы, включая 82 рисунка, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации рассмотрены основные виды и закономерности физического износа стальных вертикальных цилиндрических резервуаров, используемых для хранения нефти и нефтепродуктов. Сделан вывод о том, что главным видом износа указанных сооружений является коррозия. Интенсивность коррозии главных конструктивных элементов резервуара – цилиндрической стенки, днища и кровли, зависит главным образом от вида хранимого продукта. Анализ же отказов в результате коррозии показывает, что наиболее часто происходят отказы из-за коррозионного износа нижних поясов цилиндрической стенки – главного расчетного элемента вертикальных резервуаров.¹ (Здесь под отказом понимаются и такие случаи, когда напряжения в каком-либо поясе цилиндрической стенки превышают расчетное сопротивление стали). В диссертации отмечаются работы Гутмана Д.М., Ажогина Ф.Ф., Кикина А.И., Шестопалова В.Е. и др., где доказана возможность увеличения интенсивности коррозионного износа при увеличении величины растягивающих напряжений и жесткости напряженного состояния. Применительно к стальным вертикальным цилиндрическим резервуарам данный вопрос изучался в работах Егорова Е.А. и Фоменко Д.С., в которых авторы делают вывод о том, что коррозионный износ нижних поясов и особенно зоны сопряжения стенки с днищем носит ускоренный характер в результате всё большего увеличения напряжений из-за уменьшения толщины в процессе коррозионного износа. В работах Вольберга М.Л., Горохова В.В., Бережного К.П., Филиппова В.В. и др. получены доказательства того, что коррозионный износ сказывается не только на уменьшении толщины конструктивных элементов, но и сопровождается целым рядом вторичных

эффектов, таких как снижение прочностных характеристик стали, уменьшение показателей трещиностойкости, повышение критических температур, определяющих области вязких, квазихрупких и хрупких разрушений.

Все выше отмеченные обстоятельства повышают актуальность усиления стальных резервуаров с целью восстановления их несущей способности, сниженной в результате коррозионного износа. Решению этих вопросов были посвящены работы Астряб С.М., Рамазанова Э.Б., Тарана В.Д., Сафаряна М.К., Зелигера Е.Л. и др. Наибольшее практическое внедрение получило усиление стальных вертикальных цилиндрических резервуаров гибкими кольцевыми бандажами. Метод бандажирования был предложен, теоретически обоснован и экспериментально исследован в работах Егорова Е.А., Сырцева В.М., Лайкова О.Н. и др.

В диссертации проводится краткий обзор известных теоретических и экспериментальных исследований по изучению напряженно-деформированного состояния бандажированных резервуаров, указывается на целый ряд нерешенных вопросов в этой области. В частности, это противоречивые сведения о влиянии сил трения на распределение напряжений по периметру стенки и длине бандажей при создании предварительного напряжения, неопределенность перераспределения напряжений между стенкой и бандажами при заполнении резервуара нефтепродуктом, отсутствие должного теоретического обоснования повышенной деформативности стенки резервуара до и после усиления бандажами.

В диссертации указывается, что решение выше указанных проблем должно быть связано прежде всего с исследованием влияния на напряженно-деформированное состояние локальных геометрических несовершенств, которые неизбежно имеются в цилиндрической стенке

любого стального вертикального цилиндрического резервуара объемом от 100 куб.м. и более. Работы Даниляк И.А., Никиреева В.М., Лысенко А.Е., Буренина В.А. и др. дают повод считать, что данная направленность исследований является актуальной не только для резервуаров бандажированных, но и стальных вертикальных цилиндрических резервуаров вообще.

На основании рассмотренного в первой главе материала сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассматривается инженерный расчет на прочность цилиндрической стенки стального вертикального цилиндрического резервуара правильной формы, анализируются некоторые особенности действительной геометрии указанного конструктивного элемента, приводятся аналитические зависимости, составляющие основу расчетных алгоритмов по определению основных компонент напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрической стенки при наличии в ней геометрических несовершенств, произвольно расположенных по поверхности.

При рассмотрении инженерного расчета подчеркивается, что прочность цилиндрической стенки определяется главным образом кольцевыми растягивающими напряжениями σ_2 , возникающими от давления нефтепродукта. Всеми остальными компонентами НДС в инженерном расчете пренебрегают, за исключением расчета на прочность первого (нижнего) пояса, когда дополнительно пояс проверяется по изгибным напряжениям, которые возникают в зоне сопряжения цилиндрической стенки резервуара с плоским дном. Все пояса цилиндрической стенки считаются отдельно, условно принимая, что каждый пояс находится в безмоментном напряженном состоянии. При таких допущениях напряжения σ_2 в каком-либо

i -ом поясе будут равны:

$$G_2 = \frac{\rho \cdot e}{t_i} \quad (1)$$

а функция радиальных перемещений точек, лежащих на поверхности этого пояса, будет определяться по формуле:

$$\omega = \frac{\rho e^2}{Et} \quad (2)$$

В обеих формулах ρ - расчетное давление для i -го пояса, определяемое по известным рекомендациям.

В диссертации на основании анализа многочисленных данных о поведении цилиндрической стенки натуральных резервуаров под нагрузкой отмечается, что если (1) с достаточной для инженерной практики точностью определяет уровень растягивающих напряжений в поясе стенки, то (2) практически непригодно для описания радиальных перемещений, поскольку расхождения между расчетными, по формуле (2), и действительными значениями радиальных перемещений достигают 100+200 % и более. Кроме того, в ряде научных работ отечественных и зарубежных авторов отмечается, что в натуральных резервуарах заметно более развитыми по протяженности оказываются зоны моментных состояний, возникающих в узле сопряжения цилиндрической стенки с плоским дном, а также в узлах сопряжения разнотолщинных поясов. По мнению большинства специалистов указанные выше особенности объясняются наличием в цилиндрических стенках стальных вертикальных цилиндрических резервуаров множества геометрических несовершенств в виде локальных отклонений действительной поверхности стенки от формы правильного цилиндра.

В диссертации показано, что все геометрические несовершенства цилиндрической стенки можно разделить на несовершенства в виде длинноволновых отклонений с длиной волны $1/2 + 1/10$ периметра

и коротковолновых отклонений с длиной волны $1/60 + 1/120$ периметра. Амплитуды первых находятся в пределах $(2 + 10) \epsilon$ и более, а вторых в пределах $(0,2 + 0,8) \epsilon$, где ϵ - толщина стенки. Для описания первого вида несовершенств в любом горизонтальном сечении цилиндрической стенки может быть использован тригонометрический ряд:

$$W_0^{n\text{мк}} = \sum_{n=2} (A_{n0} \cos n\varphi + B_{n0} \sin n\varphi) \quad (3)$$

коэффициенты A_{n0} и B_{n0} которого определяются гармоническим анализом результатов натуральных обмеров геометрической формы стенки (обмеры заключаются в замерах отклонений образующих цилиндрической стенки резервуара от контрольных вертикалей, как это предусмотрено в инструкциях по техническому освидетельствованию данных конструкций). Для описания второго вида несовершенств целесообразно ограничиться функцией:

$$W_0^{n\text{мк}} = a_{n0} \sin n\varphi \quad (4)$$

где a_{n0} - средняя амплитуда коротковолновых отклонений, а $n = 2\pi\epsilon/l_0$, где l_0 - средняя длина волны.

Для получения целостной картины действительной геометрии необходимо иметь описания в виде (3), (4) по нескольким горизонтальным сечениям резервуара.

Учитывая характерные параметры геометрических несовершенств, в диссертации для проведения расчетов цилиндрической стенки с учетом имеющихся в ней геометрических несовершенств предлагается алгоритм, основой которого является представление действительной стенки с локальными геометрическими несовершенствами в виде конструктивно-ортотропной цилиндрической оболочки правильной формы, но с приведенными значениями радиальной K_{cm}^* и изгибной жесткости D_{cm}^* , зависящими от амплитуды a_n корот-

коволновых отклонений. Тогда расчет цилиндрической стенки резервуара с учетом геометрических несовершенств проводится по формулам теории правильных оболочек, но результирующее значение функции радиальных перемещений будет определяться суммой:

$$w = w^{**} + w^{***} + w^{****} \quad (5)$$

где w^{**} - радиальные перемещения, полученные из расчета конструктивно-ортоотропной цилиндрической оболочки по формулам теории правильных оболочек, но с приведенными значениями радиальной и изгибной жесткостей; w^{***} - радиальные перемещения точек поверхности цилиндрической стенки, вызванные деформациями коротковолновых отклонений под воздействием растягивающих усилий; w^{****} - то же, вызванные деформациями длинноволновых отклонений. Функции w^{***} и w^{****} определяются из допущения о том, что в процессе деформирования под нагрузкой форма начальных геометрических несовершенств остается неизменной, изменяются лишь амплитуды отклонений. Тогда:

$$w^{**} = a_n \sin n\varphi \quad (6)$$

$$w^{***} = \sum (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \quad (7)$$

$$a_n = \frac{a_{n0}}{1 + \frac{N_2}{N\sigma(n)}}; \quad A_n = \frac{A_{n0}}{1 + \frac{N_2}{N\sigma(n)}}; \quad (8)$$

$$B_n = \frac{B_{n0}}{1 + \frac{N_2}{N\sigma(n)}}$$

$$N\sigma(n) = \frac{(n^2 - 1) E t^3}{12(1 - \mu^2) E^3} \quad (9)$$

Функция w , как и в решениях правильных оболочек, является определяющей для всех основных компонент НДС. С позиций оценки прочности цилиндрической стенки резервуара следует отметить, что наличие геометрических несовершенств приводит к появ-

лению изгибающих моментов M_2 в окружном направлении, которые будут определяться разностью кривизны поверхности стенки до и после деформирования:

$$M_2 = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \Delta \chi \quad (10)$$

Тогда фибровые растягивающие напряжения σ_2 в кольцевом направлении будут определяться суммой:

$$\sigma_2 = \frac{K_{cm} \cdot e}{t} \cdot \omega^* + \frac{M_2}{W_{cm}} \quad (11)$$

При $a_0/t > 0,2$, решение проводилось методом пошагового приложения нагрузки, чем учитывалось изменение амплитуды, а значит и приведенных жесткостей цилиндрической стенки, в процессе деформирования.

Предложенный алгоритм сравнивался с более точным решением, приведенным в работе Грудева И.Д., Лысенко А.Е. Сравнение показало, что при $a_0/t \approx 1,0 + 1,5$ расхождения находятся в пределах $5 + 10\%$, что в данном случае можно считать вполне приемлемым.

В заключительном разделе второй главы приведены результаты исследований особенностей влияния геометрических несовершенств на основные компоненты НДС цилиндрической стенки резервуара. В частности показано, что наличие в стенке коротковолновых отклонений приводит к увеличению значений составляющей ω^* , увеличению изгибающего момента M_0 в точке сопряжения стенки с дном, увеличению зоны протяженности моментного состояния на участке примыкания цилиндрической стенки к плоскому дну. Графики зависимости ω^* и M_0 от параметров коротковолновых отклонений показаны на рис. 1,2.

Наличие длинноволновых отклонений практически не влияет на напряженное состояние, но приводит к тому, что результиру-

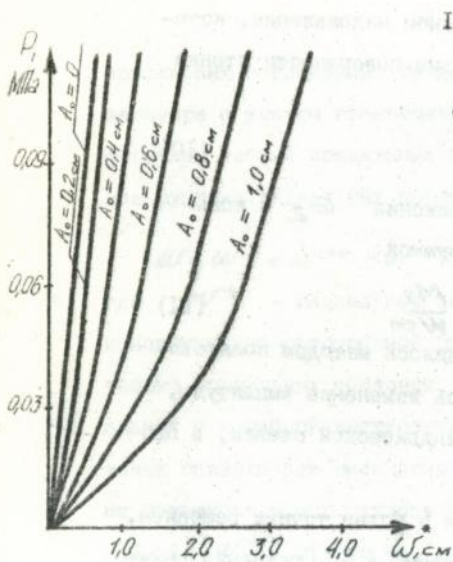


Рис. 1. Кинетика роста радиальных перемещений

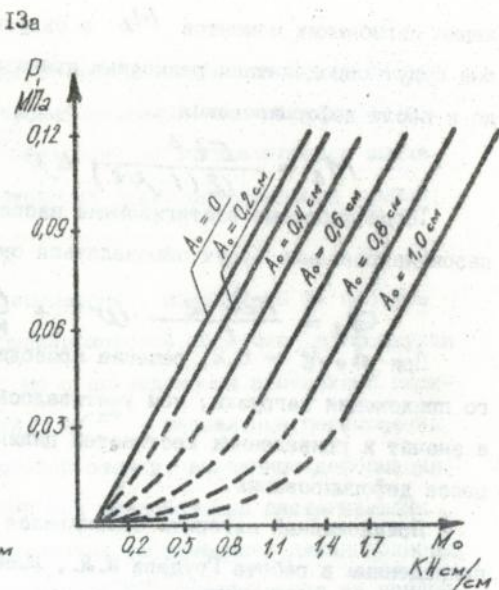


Рис. 2. Влияние начальной амплитуды на величину изгибающего момента в уторе

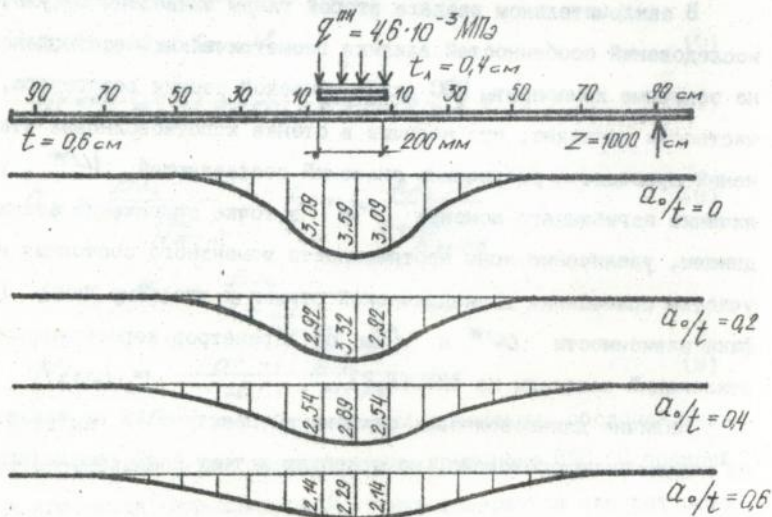


Рис. 3. Распределение кольцевых сжимающих напряжений

щее значение функции радиальных перемещений w определяются в основном составляющей $w_{\text{нп}}$. Изменения $w_{\text{нп}}$ имеют место в основном на первых этапах нагружения, т.е. при давлении, составляющем 0,1 + 0,2 от расчетной величины давления. В диссертации обоснована возможность отрицательных (по направлению к центру кривизны цилиндрической стенки резервуара) радиальных перемещений отдельных участков цилиндрической стенки при наполнении резервуара нефтепродуктом. Данный эффект неоднократно наблюдался при проведении испытаний натуральных резервуаров и крупногабаритных моделей.

На базе приведенного во второй главе расчетного метода в третьей и четвертой главах диссертации рассмотрены разработанные автором диссертации алгоритмы, позволяющие определять основные компоненты НДС в цилиндрической стенке резервуара, усиленной гибкими бандажами, исследуются особенности поведения цилиндрической стенки с геометрическими несовершенствами на этапе создания в ней предварительного напряжения путем затяжки бандажей (третья глава) и на этапе загрузки резервуара нефтепродуктом (четвертая глава). Кроме того, в третьей главе приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований влияния начальных несовершенств цилиндрической стенки на коэффициент трения между стенкой и бандажами, а следовательно, и на характер распределения предварительных напряжений по периметру цилиндрической стенки и по длине бандажей при затяжке последних. Исследования проводились на крупногабаритной модели цилиндрической стенки резервуара в виде цилиндрической оболочки диаметром $D = 1000$ мм, высотой $H = 500$ мм и толщиной $t = 3$ мм из стали 16Г2АФ. Оболочка имела начальные отклонения от формы правильного цилиндра как коротковолновые с амплитудой $a_0 = (0,15 + 0,20) t$, так и длинноволновые с ампли-

тудой в пределах $(0,6 + 1,5) \epsilon$, которые появились в оболочке естественным путем в процессе её изготовления. Оболочка преднапрягалась бандажами шириной $b_1 = 35$ мм и толщиной $\epsilon_1 = 2$ мм из стали ВСт 3 пс 6. Показано, что при наличии начальных несовершенств значение коэффициента трения зависит от величины усилий затяжки бандажей и для практически возможных усилий затяжки составляет:

$$\begin{aligned} f &= 1,2 & \text{при} & \quad \sigma_{\text{пн}_0}^s \leq 20 \text{ МПа} \\ f &= 1,45 & \text{при} & \quad 20 < \sigma_{\text{пн}_0}^s \leq 30 \text{ МПа} \\ f &= 2,0 & \text{при} & \quad 30 < \sigma_{\text{пн}_0}^s \leq 40 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (12)$$

То есть, фактические значения коэффициента трения значительно отличаются от общепринятых его значений $0,25 + 0,35$ при трении гладких поверхностей металла о металл. Распределение напряжений по периметру цилиндрической стенки и длине бандажей находится в области, ограниченной следующими зависимостями:

$$\sigma_{\text{пн}} = \frac{\sigma_{\text{пн}_0}}{2} (\cos f\varphi + 1) \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{пн}} = \sigma_{\text{пн}_0} \cdot e^{-f\varphi}$$

Первое равенство определяет верхнюю границу возможных напряжений, второе – нижнюю. Индекс "0" в (12), (13) относится к напряжениям в месте расположения стяжных стыков банджа.

В диссертации показано влияние количества стяжных стыков в бандже на равномерность распределения усилий предварительного напряжения. В частности, получено, что при количестве стяжных стыков менее 4 шт. потери усилий предварительного напряжения составляют более 40 %. Вместе с тем теоретически и экспериментально показано, что наличие коротковолновых начальных геометрических несовершенств приводит к некоторому выравниванию предварительных напряжений по высоте усиливаемого участка цилиндрической стенки резервуара. На рис. 3 показаны эпюры сжимающих

напряжений от затяжки одного бандажа в зависимости от отношения a/l . Указанное обстоятельство позволяет при отношении ширины бандажа b_1 к шагу расстановки бандажей b в пределах $b_1/b = 0,6 + 0,7$ учитывать в расчете бандажи как равномерно распределенную по высоте усиливаемого участка оболочку с толщиной стенки:

$$\epsilon_{cp} = \frac{\epsilon_1 \cdot b_1}{b} \quad (14)$$

При меньших значениях b_1/b для вычисления ϵ_{cp} в цилиндрической стенке необходимо использовать алгоритм, приведенный в третьей главе. Алгоритм построен на основе известного решения Тимошенко С.П. о поперечном изгибе длинной оболочки радиальной внешней нагрузкой, приложенной на участке, ширина которого значительно меньше длины оболочки. Сама оболочка считается конструктивно-ортотропной и её жесткостные характеристики определяются в зависимости от параметров начальных геометрических несовершенств. Для реализации алгоритма разработана специальная программа, которая позволяет учитывать влияние на величину ϵ_{cp} в какой-либо точке усиливаемого участка цилиндрической стенки практически неограниченного количества бандажей.

Для определения растягивающих напряжений и изгибающих моментов в бандажированной цилиндрической стенке при заполнении резервуара нефтепродуктом в четвертой главе рассматриваются алгоритмы, основанные на безмоментной и моментной теории длинных и коротких оболочек. При наличии в цилиндрической стенке локальных геометрических несовершенств она представляется как конструктивно-ортотропная. Главным результатом представленных в четвертой главе исследований является обоснование и количественная оценка эффекта, заключающегося в возможном перераспределении растягивающих напряжений между цилиндрической стенкой и бандажами в результате раз-

личной деформативности этих конструктивных элементов из-за наличия в них геометрических несовершенств. Получено, что действительный уровень растягивающих напряжений в бандажах может в 1,5 и более раз превышать значения соответствующих напряжений, определенных в предположении идеально правильной формы цилиндрической стенки. Одновременно с увеличением напряжений в бандажах напряжения в цилиндрической стенке оказываются в 1,1+1,2 раза ниже чем по расчету без учета геометрических несовершенств. Графики, иллюстрирующие эффект перераспределения напряжений между стенкой и бандажами, показаны на рис. 4.

Наличие геометрических несовершенств в стенке, как и при создании предварительного напряжения, приводит к более равномерному распределению растягивающих напряжений по длине усиливаемого участка. На данном этапе (загрузка резервуара нефтепродуктом) этот эффект проявляется более существенно и при отношении $\delta_n / \delta \geq 0,5$ расчет усиливаемого участка стенки можно вести приближенно, определяя величину растягивающих напряжений в стенке по формуле:

$$\sigma_{cm} = \frac{p \cdot \delta}{\epsilon_{cm} + \epsilon_{np}} \quad (15)$$

где ϵ_{np} определяется по (14).

При $\delta_n / \delta < 0,5$ расчет необходимо производить по приведенному в четвертой главе алгоритму. Расчетная схема цилиндрической стенки на усиливаемом участке представлялась в виде, изображенном на рис. 5, шаг расстановки бандажей δ принимался на всем участке усиления постоянным. На участках типа I (см. рис. 5) изгибная и радиальная жесткости определялись суммарно от стенки и бандажа:

$$D_I = D_{cm}^* + D_\delta; \quad K_I = K_{cm}^* + K_\delta \quad (16)$$

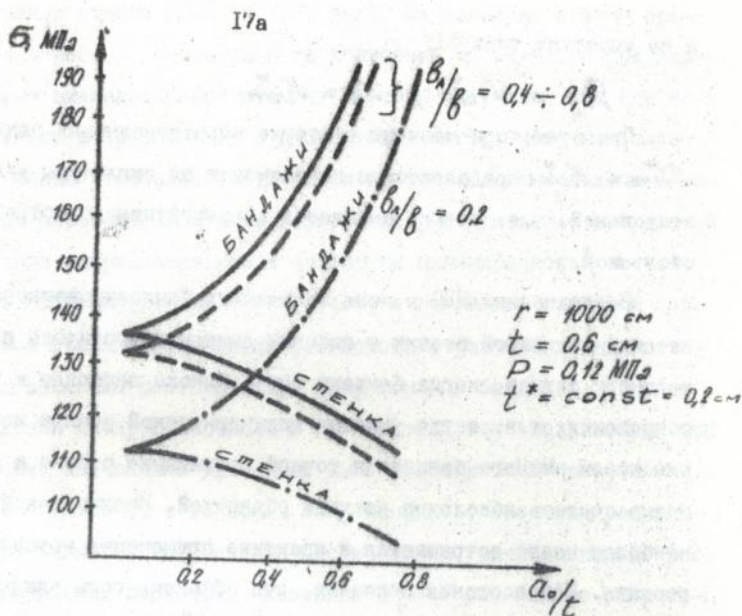


Рис. 4. Изменение напряжений в цилиндрической стенке и бандажах в зависимости от амплитуды коротковолновых отклонений

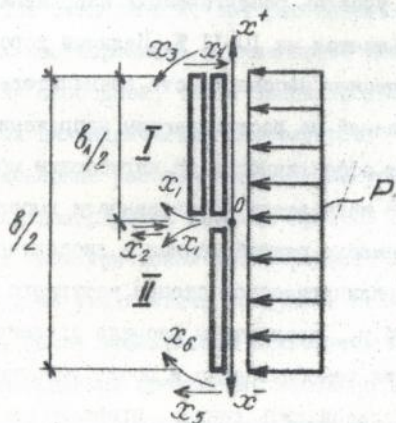


Рис. 5. Расчетная схема бандажированной схемы резервуара

в на участках типа II:

$$D_{\bar{z}} = D_{cm}^* ; K_{\bar{z}} = K_{cm}^* \quad (17)$$

При этом, при наличии в стенке коротковолновых отклонений D_{cm}^* и K_{cm}^* определяются в зависимости от амплитуды указанных отклонений, т.е. стенка считается конструктивно-ортотропной оболочкой.

Исследование НДС в зоне сопряжения бандажированного участка цилиндрической стенки с плоским дном проводилось применительно к случаю, когда бандажи очень близко подходят к точке сопряжения, т.е. когда участок цилиндрической стенки между нижним краем нижнего бандажа и точкой примыкания стенки к дну можно считать абсолютно жесткой оболочкой. Именно такой случай наиболее часто встречается в практике применения метода бандажирования. Исследования показали, что эффективность влияния бандажей на величину изгибающего момента M_0 существенно ниже, чем на величину растягивающих напряжений. Так для цилиндрической стенки идеально правильной формы установка бандажей общим сечением составляющим 20 % сечения усиливаемого участка цилиндрической стенки снижает средний уровень растягивающих напряжений на 15+17%, а величина M_0 уменьшается на 10+11 %. Наличие коротковолновых локальных геометрических несовершенств незначительно увеличивает эффективность бандажей по растягивающим напряжениям и более существенно увеличивает эффективность по изгибающим моментам. При $a_0/t = 0,6 + 0,8$ показатели эффективности выравниваются.

В пятой главе с помощью разработанных в диссертации алгоритмов проводится расчет цилиндрической стенки натурального резервуара объемом $V = 5000$ куб.м., результаты расчета сравниваются с данными испытаний такого же резервуара до и после усиления его стенки гибкими бандажами (использовались данные, приведенные в научно-

техническом отчете ДИСИ за 1979 год). Параллельно с этим проводился и расчет, основанный на допущении об идеально правильной форме цилиндрической стенки. В итоге получено, что при использовании разработанных в диссертации алгоритмов, наиболее существенные уточнения достигаются при определении величины радиальных перемещений стенки и фибровых растягивающих напряжений в окружном направлении как в свободной цилиндрической стенке, так и в бандажированной. Кроме того, в последнем случае в значительной степени улучшается соответствие расчетных и действительных значений растягивающих напряжений в бандажах. В целом расхождения между расчетными и действительными (полученными при испытании) значениями указанных выше компонент НДС составляли в среднем $15 \pm 20\%$, в то время как, например, значения радиальных перемещений в центральной части стенки, вычисленные по расчету правильных оболочек, оказались в 6-10 раз меньше полученных при испытаниях.

На основании анализа особенностей геометрии, а также выявленных закономерностей влияния геометрических несовершенств на НДС цилиндрической стенки резервуара, в диссертации приводятся упрощенные зависимости, которые позволяют учесть наличие геометрических несовершенств в инженерной постановке расчета на прочность как свободной, так и бандажированной стенки стальных вертикальных цилиндрических резервуаров.

Инженерные расчеты конструкций усиления в виде гибких бандажей для резервуаров объемом от 1000 до 5000 куб.м. показывают, что учет геометрических несовершенств стенки заставляет в целом ряде случаев увеличивать требуемое количество бандажей. С другой стороны, более эффективным становится применение для бандажей сталей повышенной прочности, особенно в случаях предварительного напряжения стенки резервуара. Полученные в диссертации результаты

позволяют считать, что наиболее эффективное значение предварительного напряжения стенки, в случае её усиления бандажками, равно $\sigma_{пл} = 12 + 15$ МПа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Геометрическая форма цилиндрической стенки стальных резервуаров такова, что в ней всегда имеются отклонения от формы правильного цилиндра. В общем спектре отклонений можно выделить отклонения длинноволновые и длиной волны $\lambda_0 = (1/2 + 1/12)$ периметра стенки и коротковолновые с $\lambda_0 = (1/60 + 1/120)$ периметра. Длинноволновые отклонения имеют амплитуду в пределах $A_0 = (2 + 10) \epsilon$ и более, но не нарушают условия выпуклости поверхности стенки. Коротковолновые отклонения имеют $\sigma_0 = (0,15 + 0,5) \epsilon$ и имеют участки с отрицательной кривизной.

2. При нагружении резервуара внутренним давлением длинноволновые отклонения полностью устраняются на первых же этапах нагружения при давлении $P_0 = (0,1 + 0,2) P_{расч}$. Коротковолновые отклонения лишь уменьшают свою первоначальную амплитуду и остаются заметными даже при полном загрузении резервуара.

3. Длинноволновые отклонения практически не влияют на напряженное состояние цилиндрической стенки резервуара, однако вносят существенную поправку в картину радиальных перемещений цилиндрической стенки. В итоге, радиальные перемещения отдельных участков цилиндрической стенки под давлением нефтепродукта могут в 10+15 раз превышать величину перемещений, получаемых теоретически для правильных оболочек.

4. Коротковолновые отклонения также не изменяют величину растягивающих кольцевых напряжений в безмоментных зонах, однако в зонах сопряжения разнотолщинных поясов распределение растягивающих напряжений по высоте стенки становится более равномерным,

т.е. зоны моментного состояния расширяются.

5. В зоне сопряжения стенки с днищем, как правило, имеют место коротковолновые отклонения с амплитудой в пределах $a_0 \approx (0,2 + 0,4) t$ (на отдельных участках возможно до $(0,6 + 0,8) t$) и длиной волны $\lambda_0 \approx (1/90 + 1/120)$ периметра стенки. При таких параметрах начальных отклонений величина изгибающего момента в уторе в 1,25 + 1,5 раза превышает значения соответствующего момента для гладкой оболочки. Кроме того, существенно расширяется зона моментного состояния, выходя за пределы ширины нижнего пояса цилиндрической стенки резервуара.

6. При усилении цилиндрической стенки резервуара гибкими бандажами наличие начальных отклонений обеспечивает более равномерное распределение растягивающих кольцевых напряжений по высоте усиливаемого участка. Это происходит в силу того, что увеличивается ширина зоны влияния каждого отдельного бандажа. Данный эффект проявляется как на этапе создания в стенке резервуара предварительного напряжения, так и при нагружении резервуара внутренним давлением. Для резервуаров объемом 1000+5000 куб. м. степень равномерности распределения напряжений, оцениваемая отношением:

$$\eta = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

находится в пределах $\eta = 0,95$ при $b_1/b \geq 0,6$, $\eta = 0,90$ при $b_1/b \geq 0,5$, $\eta = 0,85$ при $b_1/b \geq 0,4$ (соотношения b_1/b относятся к случаю, когда ширина бандажной ленты находится в пределах $b_1 = 150 + 250$ мм).

7. Наиболее важным фактором влияния геометрических несовершенств для бандажированных резервуаров является то, что в силу неодинаковой радиальной жесткости стенки (из-за наличия отклонений) и бандажей, при нагружении резервуара внутренним давлением

происходит перераспределение растягивающих напряжений между этими конструкциями. При этом напряжения в стенке оказываются в 1,1 + 1,15 раза меньше, а в бандажах в 1,3 + 1,5 раза больше значений соответствующих напряжений, получаемых при расчете стенки, как правильной оболочки.

8. Эксперимент на крупногабаритных моделях показал, что коэффициент трения между поверхностями стенки и бандажей при затяжке последних значительно отличается от общепринятого значения этого коэффициента для металлических поверхностей. Кроме того, при наличии в цилиндрической стенке геометрических несовершенств значение коэффициента трения зависит от величины усиления затяжки бандажей. При использовании для нахождения величины преднапряжения формулы Эйлера, коэффициент трения рекомендуется принимать равным:

$$\begin{array}{lll} f = 1,2 & \text{при} & \sigma_{ли}^f \leq 20 \text{ МПа} \\ f = 1,45 & \text{при} & 20 \leq \sigma_{ли}^f \leq 30 \text{ МПа} \\ f = 2,0 & \text{при} & 30 \leq \sigma_{ли}^f \leq 40 \text{ МПа} \end{array}$$

9. Эффективная величина предварительного напряжения цилиндрической стенки резервуара при усилении ее гибкими бандажами составляет $\sigma_{ли}^{эф}$ = 12 + 15 МПа. При усилении резервуаров объемом 3000 + 5000 куб.м. такая величина предварительного напряжения цилиндрической стенки позволяет эффективно использовать для изготовления бандажей стали с пределом текучести $\sigma_T = 275 \text{ МПа}$ (вместо обычной малоуглеродистой стали с $\sigma_T = 235 + 250 \text{ МПа}$), получая при этом снижение металлоемкости конструкций усиления в 1,2 + 1,5 раза. Для резервуаров объемом 2000 куб.м. и менее применение для бандажей стали повышенной прочности не эффективно.

Основные положения диссертации опубликованы:

1. "Анализ влияния геометрических несовершенств на напряженно-деформированное состояние цилиндрической стенки стального вертикального цилиндрического резервуара". Депонировано УкрНИИТИ Госплата УССР, № I406, 1993 г. / Егоров Е.А. и Хабашне Х. Личный вклад: проведение численных расчетов на ЭВМ и решение поставленной задачи.

2. "Экспериментальные исследования особенностей влияния сил трения на распределение предварительных напряжений в бандажах и цилиндрической стенке". Депонировано УкрНИИТИ Госплата УССР № I734, 1993 г. /Егоров Е.А. и Хабашне Х. Личный вклад: проведение модельных экспериментов и обработка результатов.

3. "Исследование деформативности стальных резервуаров". // Интенсификация рабочих процессов строительного производства; Сборник научных трудов. / Днепропетровского инженерно-строительного института. - К.: УМКВО, 1993./Егоров Е.А. и Хабашне Х. Личный вклад: проведение натурных исследований, обработка полученных результатов и решение поставленной задачи.



Подписано в печать 7.12.93г. Формат 60x84
Заказ 348 Тираж 100 экз. Ротапринт ДХТУ.

461321

AB 28.929