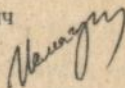


ПРИДНЕПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи

ИСМАГУЛОВ Болат Габдрахимович



УДК 624.956: 624.046.03

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ
СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

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 - 1994

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Е. А. Егоров

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
В. Л. Красовский

Официальные опоненты - доктор технических наук, профессор
Е. А. Яценко (ПГАСА)
кандидат технических наук, доцент
И. Д. Павленко (ДГУ)

Ведущая организация - АП ПИ "Днепрпроектальнoнструкция"

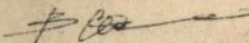
Защита состоится в "25" января 1995 г. на заседании специализированного ученого совета К 068.32.01 Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры по адресу: 320005, г. Днепропетровск, ул. Чернышевского, 24а, ПГАСА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке академии.

Автореферат разослан "25" января 1994 г.

Просим принять участие в заседаниях совета и направить отзыв на автореферат в двух экземплярах в секретариат совета по указанному адресу.

Телефон для справок: 47-35-22

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент  В. Д. Седин

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаніка

00756170 (Q)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В диссертации рассматриваются крупногабаритные стальные вертикальные цилиндрические резервуары (РВС) наемного типа. Такие резервуары нашли широкое применение в химической, нефтяной и газовой промышленности как емкости для хранения нефти, нефтепродуктов и газов (в том числе сжиженных газов). Как правило, стоимость хранимого продукта в несколько раз превышает стоимость самих резервуаров. Различного рода аварии, сопровождающиеся частичной или полной потерей хранимого продукта, приносят не только огромный материальный ущерб, но и в существенной мере ухудшают экологическую обстановку. Все это предъявляет высокие требования к вопросам надежности этих сооружений.

Решение проблем эксплуатационной надежности и эффективности проектных решений стальных резервуаров должны основываться на решении вопросов прочности и устойчивости цилиндрической стенки указанных сооружений. Бесспорно, что вопросы прочности играют определяющую роль в надежности этих сооружений. Однако, надежность резервуара не может быть гарантирована без обеспечения устойчивости цилиндрической стенки, поскольку, возможность возникновения в ней сжимающих усилий при условиях высокой степени её тонкостенности (особенно в РВС больших объемов), наличия существенных начальных трогивов и остаточных сварочных напряжений, также может определить несущую способность РВС, оцениваемой по критическому состоянию цилиндрической стенки.

Диссертация посвящена вопросам совершенствования инженерных методов расчета РВС на устойчивость. При этом предлагается рассматривать два расчетных случая: расчет резервуара на устойчивость на стадии проектирования и оценка его устойчивости в период эксплуатации. Это связано с принципиально различной концепцией расчетов в указанных двух случаях. Как правило, на стадии проек-

тирования не выделяются индивидуальные особенности геометрии каждого резервуара. Оценку устойчивости в такой постановке можно считать обобщенной. Для её реализации используются формулы СНиП II-23-81 "Стальные конструкции. Нормы проектирования". Следует однако отметить, что формулы СНиП, полученные для оболочек постоянной толщины и с идеализированными условиями нагружения, не могут быть непосредственно использованы для стальных резервуаров, так как цилиндрическая стенка РВС ступенчато-переменной толщины и находится под воздействиями неоднородных нагрузок. На стадии эксплуатации резервуар следует рассматривать как конкретный объект с его конструктивными и эксплуатационными особенностями, а также с конкретными дефектами геометрической формы. Такой подход к оценке устойчивости является индивидуальным и для его реализации общепринятых расчетных методов, по сути, не существует. В то же время, потребность в таких расчетных методах велика, поскольку именно методы индивидуальной оценки устойчивости могут в существенной мере повысить достоверность определения технического состояния резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Из вышесказанного следует, что исследования вопросов устойчивости РВС являются актуальными и важными для практики, так как в конечном счете они позволяют повысить надежность эксплуатации и эффективность проектных решений рассматриваемых сооружений.

Цель работы. Разработка расчетных методов, позволяющих получить уточненные оценки устойчивости стальных резервуаров на стадиях проектирования (обобщенная оценка) и эксплуатации (индивидуальная оценка)

В работе достижение указанной цели связывается с решением следующих задач:

1. Разработать методики обмеров и анализа начальных отклонений цилиндрической стенки РВС, позволяющие выявить важнейшие па-

раметры отклонений, необходимые для оценки устойчивости РВС.

2. Разработать инженерный метод индивидуальной оценки устойчивости стенки при действии на резервуар внешнего давления.

3. Исследовать влияние разнотолщинности поясов цилиндрической стенки РВС на величину критического внешнего давления.

4. Разработать методику и теоретически исследовать вопросы устойчивости РВС при условии частичного заполнения резервуара жидкостью.

5. Экспериментально оценить применимость предложенной методики расчета частично заполненного жидкостью резервуара на устойчивость.

6. Предложить практические рекомендации для оценки устойчивости стальных резервуаров при внешнем давлении с учетом разнотолщинности поясов, дефектов геометрии цилиндрической стенки, а также при условии частичного заполнения резервуара жидкостью.

Научная новизна проведенных исследований состоит в следующем:

1. На основе многочисленных обследований натуральных резервуаров выявлены общие закономерности распределения начальных отклонений формы цилиндрической стенки от правильного цилиндра.

2. Разработан инженерный метод определения величины критического внешнего давления для стального резервуара с учетом начальных геометрических несовершенств формы цилиндра.

3. Получена уточненная формула для учета разнотолщинности поясов стенки резервуара при определении величины критического внешнего давления.

4. Исследовано влияние частичного нагружения резервуара жидкостью на величину критического внешнего давления.

5. Экспериментально изучены поведение и выпучивание цилиндрической оболочки, частично заполненной жидкостью, при внешнем давлении.

Практическая ценность работы. Результаты проведенных исследований могут быть непосредственно использованы в практике проектирования и эксплуатации стальных вертикальных резервуаров для решения следующих вопросов:

- проведение расчетов на устойчивость при проектировании резервуаров с учетом разнотолщинности поясов цилиндрической стенки;
- оценка устойчивости эксплуатируемых РВС при проведении их технического освидетельствования.

Внедрение результатов. Результаты исследований диссертационной работы использованы Приднепровской государственной академией строительства и архитектуры и республиканским объединением "Укрнефтетранс" для оценки устойчивости при проведении технических освидетельствований РВС для хранения нефтепродуктов на нефтебазах Киевского, Львовского и Днепропетровского территориальных управлений "Госкомнефтепродукта" Украины.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены на научных семинарах кафедр металлических и деревянных конструкций и сопротивления материалов ПГАСА в 1993-1994 годах, на 1-ом Международном симпозиуме Украинских инженеров-механиков УИМ-93 в г. Львове в 1993 году, на 3-й Международной научной конференции "Материалы для строительных конструкций" ИСМБ'94 в г. Макеевке в 1994 году.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертации 130 страниц, в том числе 105 машинописного текста, 42 рисунков и фотографий, 5 таблиц. Список литературы включает 63 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены особенности конструктивных решений цилиндрического корпуса стальных вертикальных резервуаров. Корпус РВС представляет собой тонкую круговую осесимметричную цилиндрическую оболочку средней длины со ступенчато-переменной толщиной ($R/t=590:3800$; $R/L=0,6:2,6$). Газнотолщинность поясов цилиндрической стенки характеризуется малой изменчивостью ($t_{max}/t_{min}=1:2,2$). Для корпусов РВС характерны существенные начальные несовершенства геометрии, а также остаточные сварочные напряжения. Известно, что эти факторы оказывают решающее влияние на критическое состояние тонких оболочек. Проблеме устойчивости цилиндрических оболочек с начальными несовершенствами при различных условиях нагружения посвящено большое число публикаций. Тем не менее эта проблема далека от своего разрешения и остается в центре внимания многих ученых в странах СНГ и дальнего зарубежья. О её актуальности свидетельствуют регулярно проводимые международные конференции и симпозиумы, посвященные вопросам устойчивости тонкостенных конструкций. Как следует из материалов этих научных форумов, к настоящему времени принято несколько подходов к учету начальных несовершенств при определении критического состояния оболочки.

Один из таких подходов заключается в выявлении закономерностей распределения начальных прогибов, характерных для определенного технологического процесса изготовления конструкции и использовании этой информации для выбора метода оценки влияния этих отклонений на критическое состояние оболочки. В связи с этим в диссертации отмечаются работы Сафаряна М. К., Писанко Н. М., Поповского В. В., Егорова Е. А. по анализу действительной геометрии

цилиндрической стенки РВС, в которых приведены характерные виды и величины начальных отклонений цилиндрической стенки от правильного цилиндра, полученные на основе многочисленных обследований натурных РВС.

Проведен также краткий обзор известных теоретических и экспериментальных исследований устойчивости стальных резервуаров с начальными несовершенствами. Отмечено, что в настоящее время отсутствует какая-либо общепринятая методика оценки устойчивости эксплуатирующихся резервуаров с учетом произвольной картины начальной погиби.

В заключении первой главы проведен анализ теоретических основ существующих инженерных методов оценки устойчивости РВС. Отмечено, что в современных нормативных источниках учет чувствительности оболочечных конструкций к неизбежным начальным прогибам производится путём введения эмпирических "коэффициентов понижения", которые после умножения на классические значения критических нагрузок (осевого сжатия и внешнего давления) дают "нижнюю границу" всех известных экспериментальных данных. Такая концепция "нижней границы" дает надежную обобщенную оценку устойчивости рассматриваемых конструкций и её использование для РВС на стадии проектирования допустимо, поскольку, на этом этапе расчета отсутствует конкретная информация, о начальной погиби проектируемого резервуара. Кроме того, к настоящему времени отсутствует надежная база данных о начальных несовершенствах, характерных для технологического процесса изготовления РВС. При индивидуальной оценке устойчивости РВС, в процессе их эксплуатации, указанные "коэффициенты понижения" необходимо уточнять для каждого конкретного резервуара на основе рассмотрения его действительной геометрии, поскольку, как показывает практика обследований, интенсивность начальных несовершенств для различных резервуаров одного

масштаба может изменяться в широких пределах.

Отмечается также, что указания нормативной литературы по учету в расчетах на устойчивость возможной разнотолщинности отдельных поясов стальных оболочек являются весьма приближенными и могут быть уточнены. Не учитывается также и то, что, как правило, резервуары в процессе эксплуатации, полностью или частично заполнены жидкостью. Это обстоятельство также заслуживает дополнительного исследования.

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

Во второй главе рассмотрены методы обмеров и анализа начальных несовершенств, используемые при исследовании особенностей действительной геометрии цилиндрической стенки РВС; приведены результаты обмеров начальных отклонений конкретных резервуаров и проведен анализ их распределения.

Методы обмеров и обработки начальных отклонений выбраны таким образом, чтобы в итоге можно было бы выявить важнейшие параметры отклонений (величины амплитуд и форма начальных погибей, радиус кривизны, характер и закон распределения начальных отклонений), необходимые для дальнейшего расчета РВС на устойчивость.

В диссертации показано, что картина распределения начальных отклонений по всей поверхности цилиндрической стенки может быть получена в результате замеров отклонений контрольных образующих стенки от вертикалей при помощи каретки, как это предусмотрено в инструкциях по техническому освидетельствованию РВС. При этом базовой поверхностью служит поверхность правильного цилиндра, направляющей которого является линия сопряжения цилиндрической стенки резервуара с плоским дном. Эта линия является окружностью, радиус которой равен проектному радиусу резервуара. В отличие от традиционных методов обмеров, расстояние между контроль-

ными образующими (ΔS) и интервалы замеров вдоль образующих (ΔX) следует назначать исходя из условия получения картины распределения начальных отклонений с точностью, достаточной для оценки их влияния на устойчивость. В качестве исходного критерия для назначения величины ΔS была принята длина полуволны формы потери устойчивости, полученная из линейного расчета $L\varphi$. Если принять, что на длину волны $2L\varphi$ приходится 4 узловых точки, при этом, ординаты 2-х из них определяются непосредственными замерами, а 2-х других - путем интерполяции, то ΔS определяется соотношением:

$$\Delta S = \pi R / n_{cz} \quad , \quad \text{где } n_{cz} = 2,7 \sqrt{R/L} \sqrt{R/t} \quad (1)$$

и составляет (0,3-0,4)R в зависимости от геометрических параметров РВС. Опорные точки замеров по образующим принимались на середине и верхней кромке каждого пояса резервуара.

Дальнейшая обработка замеренных начальных отклонений сводилась к гармоническому анализу данных отклонений в кольцевом направлении для каждого опорного горизонтального сечения. Кривая отклонений $f_j(\varphi)$ каждого кольцевого сечения на j -ом уровне представлялась рядом Фурье:

$$f_j(\varphi) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \quad (2)$$

Расчеты показали, что представление кривых отклонений многочленом (2) в узловых точках дает нулевую погрешность. В данном случае точность представления зависит от количества точек замеров и характера изменчивости ординаты функции $f_j(\varphi)$ в этих точках.

Сумма гармоник ряда (2) дает полную информацию о начальных отклонениях (виды, величины и характер распределения) в пределах соответствующего j -го кольцевого сечения. В частности, рассматривая отдельно каждую гармонику ряда (2), можно выделить основные виды отклонений: $n = 0$ - изменение радиуса (конусность), $n = 1$ - общее смещение (крен), $n = 2$ - овальность, а также $n > 3$ - регулярные искривления (рис. 1.). А сумма гармоник $n > 2$ ряда (2) дает произ-

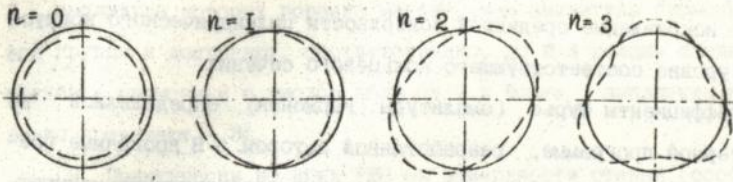


Рис. 1. Некоторые гармоники Фурье

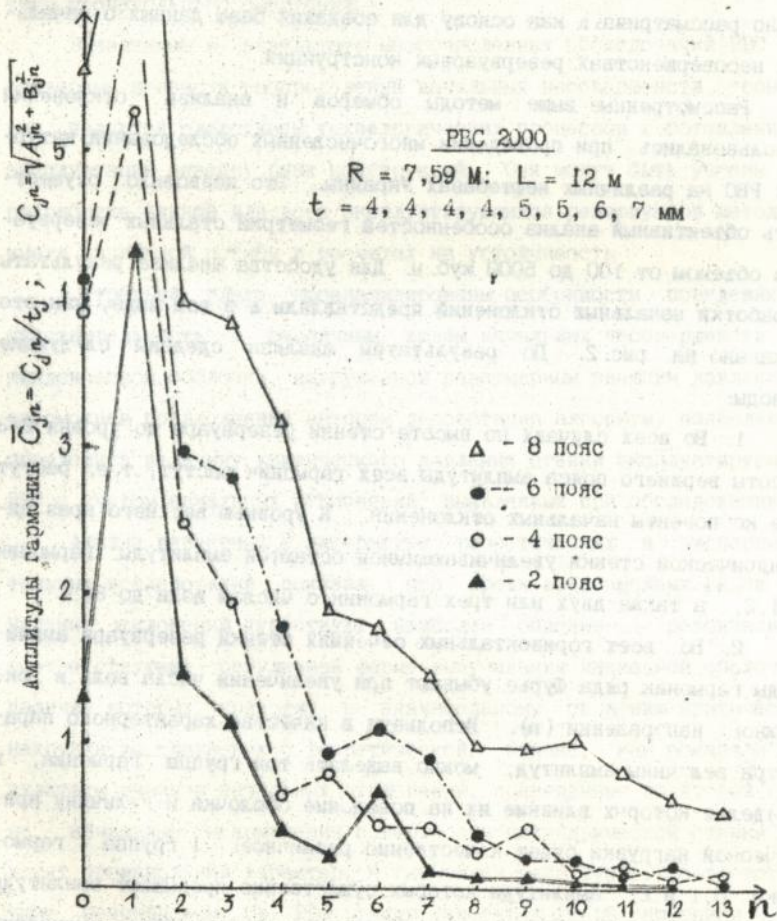


Рис. 2. Зависимость амплитуд гармоник от числа ванн в окружном направлении

вольное искривление срединной поверхности цилиндрического корпуса РВС на уровне соответствующего кольцевого сечения.

Коэффициенты Фурье (амплитуды гармоник) определялись по компьютерной программе, разработанной автором. В программе предусмотрено хранение информации о начальных несовершенствах конкретных резервуаров в виде коэффициентов A_{jn} и B_{jn} . В связи с чем её можно рассматривать как основу для создания базы данных о начальных несовершенствах резервуарных конструкций.

Рассмотренные выше методы обмеров и анализа отклонений использовались при проведении многочисленных обследований натуральных РВС на различных нефтебазах Украины. Это позволило осуществить объективный анализ особенностей геометрии стальных резервуаров объемом от 100 до 5000 куб. м. Для удобства анализа результаты обработки начальных отклонений представлялись в том виде, как это показано на рис. 2. По результатам анализа сделаны следующие выводы:

1. Во всех случаях по высоте стенки резервуара до уровня $2/3$ высоты верхнего пояса амплитуды всех гармоник растут, т. е. растут все компоненты начальных отклонений. К уровню верхнего края цилиндрической стенки увеличивающимися остаются амплитуды гармоник $0, 1, 2$, а также двух или трех гармоник с числом волн до 8.

2. Во всех горизонтальных сечениях стенки резервуара амплитуды гармоник ряда Фурье убывают при увеличении числа волн в окружном направлении (n). Используя в качестве характерного параметра величины амплитуд, можно выделить три группы гармоник, в пределах которых влияние их на поведение оболочки и величину критической нагрузки будет качественно различное: I группа - гармоники $0, 1$ и 2 , амплитуды которых существенно превышают амплитуды остальных гармоник достигая на уровне верхнего края цилиндрической стенки до $20t$; II группа - гармоники с числом волн от 3 до

8, амплитуды которых гораздо меньше, чем амплитуды гармоник первой группы и достигают, соответственно, до 8-4 толщин стенки; III группа - гармоники с числом волн от 9 и более, амплитуды которых редко превышают 1,3t.

3. Практически во всех РВС на поверхности стенки (особенно в зоне монтажного шва) имеют место явно выраженные локальные вмятины произвольного очертания.

Выявленные в результате многочисленных обследований РВС характерные признаки распределений начальных несовершенств геометрии являются следствием технологических процессов изготовления и эксплуатации резервуарных конструкций. Они могут быть учтены при разработке единой для всех эксплуатирующихся резервуаров методики учета начальной погрешности в расчетах на устойчивость

в третьей главе проанализированы особенности поведения и чувствительность к различным видам начальных несовершенств цилиндрической оболочки, нагруженной равномерным внешним давлением; рассмотрен предложенный автором диссертации алгоритм, позволяющий определить величину критического давления стенки эксплуатируемого РВС с учетом начальных отклонений, выявленных при обследовании.

Анализ известных в литературе теоретических и экспериментальных исследований показал, что среди всевозможных видов начальных отклонений существуют наиболее опасные - резонансные, соответствующие регулярной форме выпучивания идеальной оболочки, наличие которых приводит к значительному снижению критической нагрузки по сравнению с теоретической. Однако, как показали результаты анализа начальных отклонений, приведенные во второй главе, начальные искривления поверхности цилиндрической стенки РВС носят произвольный характер, а гармоники ряда Фурье, соответствующие резонансным (в РВС таким относятся 12-18 гармоники - III группа), имеют незначительные амплитуды. В этом случае можно счи-

тать, что решающее влияние на критическое состояние РВС окажут значительные по амплитудам локальные вмятины. По данным известных экспериментов выпучивание реальных цилиндрических оболочек при внешнем давлении начинается с образования одиночной закритической вмятины, а в дальнейшем нагружении формируется система регулярных закритических вмятин. При этом, инициатором выпучивания, как правило, является начальная локальная погибь. Значение нагрузки, соответствующей началу волнообразования зависит, в основном, от амплитуды и формы инициирующей начальной погиби, а также от изменения радиуса кривизны оболочки и наличия остаточных напряжений в этой зоне. При этом критическая нагрузка может изменяться в достаточно широких пределах.

Анализируя эксплуатационные требования, предъявляемые к резервуарам, в диссертации показано, что для РВС образование на поверхности цилиндрической стенки первоначальной одиночной вмятины (локальная потеря устойчивости) равнозначно предельному состоянию конструкции. Поэтому, соответствующую величину нагрузки следует считать опасным (критическим) давлением.

В связи с вышеизложенными, в диссертации определение критического давления для резервуара сводилась к определению давления выпучивания оболочки с образованием одиночной локальной закритической вмятины. Использовался метод, предложенный профессором А. Ю. Евкин, который заключается в определении предельной точки на кривой деформирования цилиндрической оболочки с начальными прогибами (кривая 1 на рис. 3.), полученной путём сращивания линейного докритического решения несовершенной оболочки (прямая 2) с кривой закритического поведения идеального цилиндра с локальной вмятиной (кривая 3). При этом кривая 1 представляется соотношением:

$$\lambda = \lambda(\xi) + \beta \left(\frac{\xi}{\xi_c} \right) + \gamma \left(\frac{\xi}{\xi_c} \right)^2, \quad (3)$$

где $\lambda = \frac{q}{q_{ce}}$ - параметр нагрузки; $\xi_c^2 = t L^2 / (f^2 R \sqrt{12(1-\mu^2)})$ - параметр

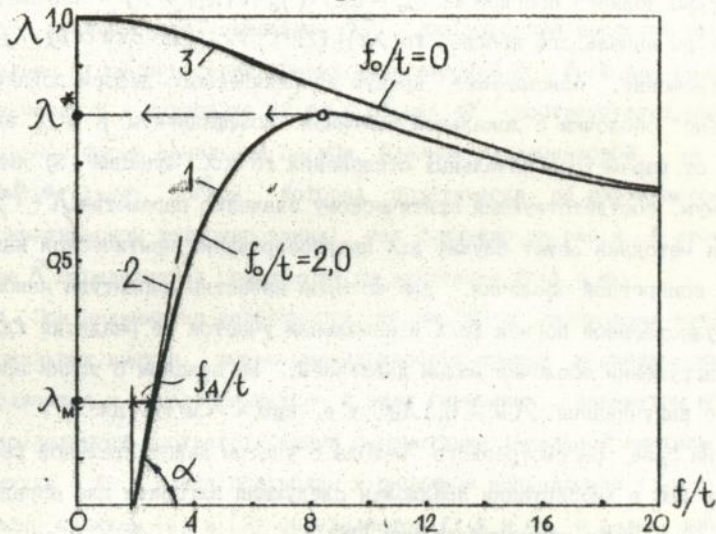


Рис. 3. Определение на кривой деформирования оболочки с начальным прогибом предельной точки.

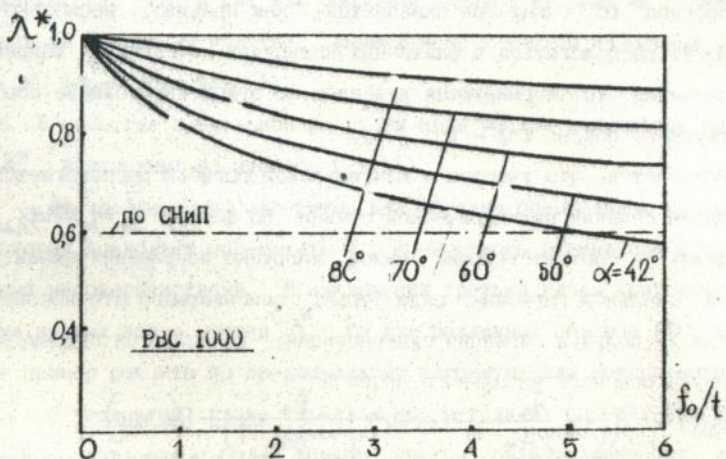


Рис. 4. Зависимость параметра критического давления от относительной амплитуды прогиба при различных значениях α

амплитуды полного прогиба f ; $\epsilon_0^2 = tL^2 / (f_0^2 R \sqrt{12(1-\mu^2)})$ - параметр амплитуды начального прогиба f_0 ; $\lambda(\epsilon) = F/1+F$, $F = \epsilon(1,45 - 0,55 \ln \epsilon) + 0,22 \epsilon^2$

- соотношение, описывающее кривую за критического деформирования идеальной оболочки с локальной вмятиной. Коэффициенты β и γ зависят от параметров начальных отклонений f_0 и α . Функция (3) имеет максимум, соответствующий критическому значению параметра $\lambda^* = q_{кр} / q_{д}$.

Данная методика может служить для прогнозирования критической нагрузки конкретной оболочки, для которой известны амплитуда наиболее существенной погиби f_0/t и начальный участок её развития f_d/t при нагружении оболочки малым давлением, не опасным с точки зрения её выпучивания, $\lambda_m = 0,1 \lambda_d$, т.е. $\text{tg} \alpha = \lambda_m / f_d$ (рис. 3.).

На базе рассмотренного метода с учетом действительной геометрии РВС в диссертации предложен следующий алгоритм для определения $q_{кр}$ цилиндрической стенки РВС:

1. На основе кривых отклонений каждого кольцевого сечения без учета 0 и 1 гармоник (т.е. без учета конусности и крена резервуара), определяются начальные несовершенства с наибольшей амплитудой прогиба f_0 (каждых зон окажется, как правило, несколько и они могут располагаться в различных кольцевых сечениях). Найденные значения f_0 нормируются делением по отношению к толщине соответствующего пояса: $\bar{f}_{0j} = f_{0j} / t_j$;

2. Предполагается, что участок с максимальной погибью располагается в среднем сечении цилиндрической стенки. По формуле $\bar{f}_d = \bar{f}_0 / (\lambda_d / \lambda_m - 1)$ определяются соответствующие малой нагрузке приращение амплитуд каждой отдельной гармоники ряда Фурье, описывающего это несовершенство. Используя принцип суперпозиции, вычисляется приращение амплитуды опасного начального прогиба:

$$\bar{f}_d(\epsilon) = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{A_n}{(\lambda_{d(n)} / \lambda_m - 1)} \cos n\varphi + \frac{B_n}{(\lambda_{d(n)} / \lambda_m - 1)} \sin n\varphi \right) \quad (4)$$

3. Определив $\text{tg} \alpha$ (рис. 3) в координатах $\lambda - f/t$ по уже известным значениям f_d/t и λ_m , находят коэффициенты β и γ (3) и затем пара-

метр критического давления λ^* . Для удобства расчетов предварительно строилась серия кривых зависимостей $\lambda - f_0/t$ для разных значений α в диапазоне $42^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$ ($\alpha = 42^\circ$ - соответствует наиболее опасной форме начальной погиби, близкой к резонансной, $\alpha = 80^\circ$ - соответствует погиби, которая практически не развивается при докритическом деформировании), как показано на рис. 4. В этом случае λ^* определяется графически по значениям f_0/t и α .

4. При наличии на поверхности стенки РВС изолированных начальных локальных вмятин, форма цилиндрической стенки периодически продолжается и представляется в виде гармоники, параметры которой определяются соответствующими параметрами локальной вмятины (амплитуда - f_0 и длина полуволны в окружном направлении - l_φ). Согласно пунктам (2) и (3) определяются f_0/t и α , и далее значение λ^* для каждой такой локальной вмятины.

5. При наличии на поверхности цилиндрической стенки утолщенных участков с длиной a в окружном направлении $L_y \gg L_\varphi$ повторяются пункты (2), (3) и (4) для оболочки радиуса R_y , где R_y - действительный радиус на участке, вычисленный с учетом начальных отклонений формы оболочки (2).

6. В качестве предельной нагрузки принимается наименьшее из всех λ^* , полученных по пунктам (2)-(5).

Для реализации алгоритма разработана специальная программа, которая позволяет определить $q_{кр}$ конкретного резервуара с начальными несовершенствами. В заключении третьей главы приводятся серия кривых зависимостей $\lambda^* - f_0$ для различных объемов РВС, а также пример расчета по предложенному алгоритму для конкретного РВС.

В четвертой главе предложены методики определения критического давления с более точным учетом разнотолщинности пояса стенки РВС. Исследовано влияние разнотолщинности на и проведена оценка применимости существующих в практике расчетов приемов

по учету разнотолщинности при определении $q_{кр}$.

В инженерных нормах для определения величины критического давления стенки РВС используется формула для гладких оболочек:

$$q_{кр} = 0,92 E \left(\frac{R}{L}\right) \left(\frac{t}{R}\right)^{5/2} \quad (5)$$

Разнотолщинность поясов при этом учитывается путем осреднения толщин всех поясов по высоте стенки резервуара (t_{cp}). В некоторых случаях разнотолщинность предлагается учитывать путем введения в (5) эффективной длины оболочки $L_{ef} = L - 0,3L_1$ с толщиной t_{min} (где L_1 - часть длины переменной толщины).

Для оценки указанных упрощений в диссертации предлагается методика расчета, позволяющая более точно оценить влияние разнотолщинности поясов резервуара на величину $q_{кр}$. Поскольку, разнотолщинность поясов стенки РВС характеризуется малой изменчивостью, использовался асимптотический метод интегрирования уравнений устойчивости оболочек переменной толщины. В качестве предельной сх мы рассматривалась гладкая оболочка осредненной толщины (t_{cp}), а отклонения толщин поясов $\Delta t_j = t_{cp} - t_j$ рассматривались как возмущения исходного параметра. Тогда для цилиндрической стенки РВС получается $\Delta t / t_{cp} \leq 0,275$. Интегрирование методом возмущений дифференциального уравнения устойчивости теории полубезмоментных цилиндрических оболочек переменной толщины в первом приближении дает выражение для $q_{кр}$:

$$q_{кр} = q_0 \left(1 + \sum_{j=1}^m \omega_j\right) \quad (6)$$

где q_0 - критическое давление гладкой цилиндрической оболочки средней толщины t_{cp} ; m - количество поясов;

$$\omega_j = \left(4,97K_j + 4,37K_j^2 + 1,46K_j^3\right) \left[\frac{A_j}{2L} - \frac{1}{2\pi} \cos \frac{2\pi}{L} X_{цj} \sin \frac{\pi}{L} A_j\right] \quad (7)$$

- коэффициент, учитывающий влияние отклонения толщины j -го пояса

Δt_j на q_0 . Здесь: $K_j = \Delta t_j / t_{cp}$; A_j - высота пояса; $X_{цj}$ - координата центра j -го пояса.

Разработана также более общая методика численного расчета на

основе метода конечных разностей, позволяющая оценить влияние Δt во всем диапазоне K . На основе сравнения результатов (6) с данными МКР в диссертации показано, что при $K_1=0,275$ формула (6) дает отступления от более точного решения МКР на 1,7%. Это свидетельствует о том, что выражение (6) может быть использована для практических расчетов устойчивости РВС при внешнем давлении с учетом возможной разнотолщинности цилиндрической стенки.

В заключении четвертой главы приводится сравнение результатов по формулам (5) и (6) для различных РВС. В частности, для РВС 5000, геометрические параметры которого $R=10,47$ м, $L=15$ м, $t=6,6,6,6,6,6,7,7,8,9$ мм, формула (6) дает значение критического давления на 10% ниже, чем предполагаемое по (5). Это объясняется тем, что при расчете по t_{cp} утолщения 4-х нижних поясов равномерно "размазываются" по всей высоте стенки резервуара. Тогда как, по (7), влияние утолщения поясов зависит не только от Δt_j , но и от X_{ij} , т.е. от места расположения каждого пояса. На основе анализа результатов расчетов для РВС различного объема в диссертации показано, что расчеты по t_{cp} всегда дают завышенные значения критической нагрузки (до 20%), и поэтому при оценке устойчивости стенки РВС на стадии проектирования следует использовать формулу (6). А при оценке устойчивости эксплуатируемых РВС с использованием алгоритма, приведенного в третьей главе, целесообразно вести расчеты для оболочки толщиной t_{min} .

В пятой главе приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований устойчивости цилиндрической оболочки, частично заполненной жидкостью и находящейся под воздействием равномерного внешнего давления.

Исследование вопросов устойчивости в такой постановке имеет практическую ценность при решении ряда вопросов. Так например, некоторые резервуары эксплуатируются в режиме малой осорачивае-

мости кр. имогс продукта и для таких РВС вопросы устойчивости верхних относительно тонких поясов целесообразно рассматривать именно в такой постановке. Кроме того, сжимающие напряжения в цилиндрич зкой стенке РВС от расчетного вакуума могут возникнуть только при наличии в резервуаре какого-то количества нефтепродукта, поскольку, возникновение самого расчетного вакуума вызвано либо сливом неф.епродукта, либо резким понижением температуры паров, насыщающих газовое пространство резервуара.

Эксперименты проводились на малогабаритных образцах с $L=17$ мм, $D=11,4$ мм, изготовленной из триацетатной пленки толщиной $t=0,22$ мм. Нагружение осуществлялось вакуумированием внутренней, свободной от воды, полости оболочки. Контроль давления осуществлялся манометром с ценой деления 1 Па. Наблюдая за процессом выпучивания, можно отметить следующие: во всех случаях первоначально возникла одиночная закритическая вмятина, центр которой расположен на участке оболочки, свободном от воды. При дальнейшем нагружении формировалась система периодических вмятин. В случае $0,7 \leq C/L \leq 1,0$ (C -высота уровня залива водой) вмятины распространялись только на части длины оболочки. При изменении C/L от 0,6 до 0,5 центр вмятин резко смещался к середине оболочки и для $C/L \leq 0,45$ - практически находился в среднем сечении оболочки.

Теоретическая задача решалась методом конечных разностей (МКР) применительно к системе уравнений устойчивости в смешанной форме с учетом докритического искривления образующей. В расчетах принимался модуль Юнга $E=2,3 \cdot 10^3$ МПа (определялся на образцах из данной партии материала). Результаты расчета и данные испытания показаны на рис.5., соответственно, кривой 1 и треугольниками. Данные испытаний и расчетов представлены как нормированные величины к соответствующим значениям критического давления для свободного от воды образца. Как видно из рис.5. опытные данные ка-

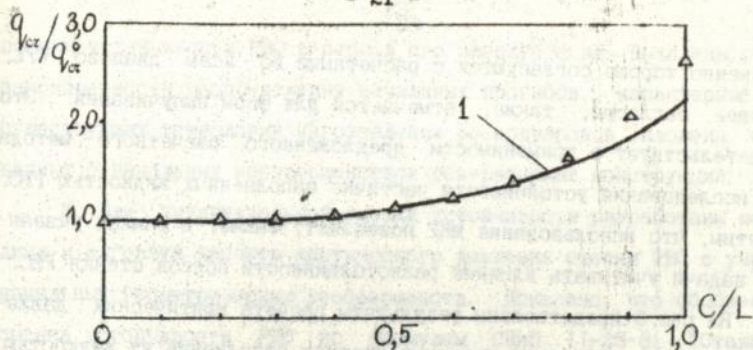


Рис. 5. Зависимость относительного критического давления от высоты заполнения оболочки жидкостью

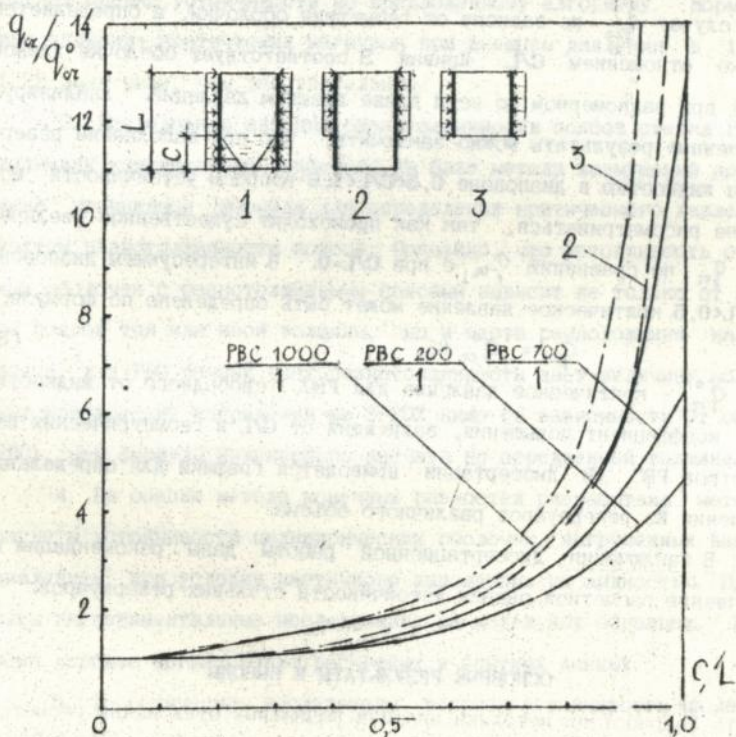


Рис. 6. критическое давление для некоторых ПВХ при различных уровнях заполнения их жидкостью

ественно хорошо согласуются с расчетными во всем диапазоне $СЛ$. Хорошее согласие, также, отмечается для форм выпучивания. Это свидетельствует о применимости предложенного расчетного метода для исследования устойчивости частично заполненных жидкостью РВС. Отметим, что использование МКР позволяет, также, в рамках указанной задачи учитывать влияние неравномерности поясов стенки РВС.

На рис. 6 представлены результаты расчета критических давлений некоторых РВС при различных уровнях заполнения их жидкостью. Кривой 2 показаны результаты расчета для пустой оболочки, нагруженной внешним давлением на участке длины $(L-C)$. Известно, что в этом случае $q_{кр}$ не зависит от геометрии оболочки, а определяется только отношением $СЛ$. Кривая 3 соответствует оболочке длиной $(L-C)$ при равномерном по всей длине внешнем давлении. Анализируя полученные результаты можно заключить, что при заполнении резервуара жидкостью в диапазоне $0,5 < СЛ < 1,0$ вопросы устойчивости могут не рассматриваться, так как происходит существенное увеличение $q_{кр}$ по сравнению $q_{кр}$ с при $СЛ=0$. В интересующем диапазоне $0 < СЛ < 0,5$ критическое давление может быть определено по формуле:

$$q_{кр} = q_{кр}^0 K_3 \quad (8)$$

где $q_{кр}^0$ - критическое давление для РВС, свободного от жидкости; K_3 - коэффициент повышения, зависящий от $СЛ$ и геометрических параметров РВС. В диссертации приводятся графики для определения значения K_3 резервуаров различного объема.

В заключении диссертационной работы даны рекомендации по уточнению расчетной оценки устойчивости стальных резервуаров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика анализа начальных отклонений геометрии цилиндрической стенки РВС, позволяющая выявить важнейшие параметры отклонений, необходимые для получения индивидуальной

оценки устойчивости РВС в период его эксплуатации. Выявлены общие закономерности распределения начальных прогибов, характерные для существующих технологий изготовления резервуаров и заложена база данных о начальных несовершенствах резервуарных конструкций.

2. Для индивидуальной оценки устойчивости разработаны методика и алгоритм расчета критического давления стенки РВС с учетом начальных геометрических несовершенств. Показано, что обобщенная оценка устойчивости РВС по формулам СНиП 11-23-81 "Стальные конструкции. Нормы проектирования", для подавляющего большинства случаев, дает значение критического давления ниже, чем индивидуальная оценка устойчивости по предложенному алгоритму. Нормативные значения критических нагрузок при внешнем давлении в 1.1 - 1.25 раза ниже, чем действительные.

3. Исследовано влияние разнотолщинности поясов стенки РВС на величину критического давления; на базе метода возмущений предложена уточненная формула для определения критического давления с учетом разнотолщинности поясов. Показано, что устойчивость стальных оболочек с разнотолщинными поясами зависит не только от набора поясов той или иной толщины, но и места расположения каждого пояса; для РВС точный учет разнотолщинности дает величину кольцевых критических напряжений на 5-20% ниже (в зависимости от объема РВС), чем формулы инженерного расчета по осредненной толщине.

4. На основе метода конечных разностей разработана методика расчета устойчивости цилиндрических оболочек, нагруженных внешним давлением, при условии частичного заполнения их жидкостью. Проведены экспериментальные исследования на модельных образцах. Получено хорошее согласование расчетных и опытных данных.

5. Теоретически исследованы вопросы устойчивости цилиндрической стенки стальных резервуаров, частично заполненных жидкостью, при внешнем давлении. Для резервуаров предложена формула

для определения критических кольцевых напряжений в виде:

$$\sigma^* = \sigma \cdot K_3$$

где σ - критическое значение напряжений для резервуара, свободного от жидкости; K_3 - коэффициент, зависящий от отношения высоты заполнения резервуара жидкостью к полной высоте стенки и геометрических параметров РВС. Для разных РВС при различных уровнях заполнения их жидкостью даны практические рекомендации по определению K_3 , при этом всегда $K_3 > 1$.

Б. Предложены практические рекомендации для уточненной оценки устойчивости РВС с учетом особенностей конструктивных решений и эксплуатации стальных резервуаров. Показано, что уточненная оценка устойчивости резервуаров позволяет существенно повысить качество оценки технического состояния в период эксплуатации и эффективность проектных решений на стадии проектирования рассматриваемых конструкций.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Егоров Е. А., Исмагулов Б. Г. Уточнение расчетных методов оценки устойчивости стальных резервуаров на стадии проектирования и эксплуатации // Научные основы строительства: Сб. науч. тр. Днепропетровского инженерно-строительного института. - К.: ИСДО, 1993. - С. 34-40.
2. Исмагулов Б. Г. Анализ геометрических несовершенств цилиндрической стенки вертикального резервуара // Интенсификация рабочих процессов строительного производства: Сб. науч. тр. Днепропетровского инженерно-строительного института. - К.: ИСДО, 1993. - С. 138-142.
3. Андрианов И. В., Исмагулов Б. Г. Влияние разностолщинности поясов на устойчивость вертикальных цилиндрических резервуаров

при внешнем давлении // Материалы для строительства: Теа. докл. III-й Международной научной конференции ISMB'94. Ч. II - Днепропетровск, 1994, 8-10 июня. - С. 36-37.

4. Исмагулов Б. Г. Уточнения влияния разнотолщинности цилиндрической стейки стального вертикального резервуара на критиче- не навантаження при зовнішньому тиску // Наукові дослідження для будівництва: Зб. наук. пр. ДІВІ. - К: ІСДО, 1994. - С. 46-52.

Ismagulov B. G. Improvements of the stability estimation methods for steel storage tanks, manuscript. Doctor technical sciences thesis, Speciality - 05.23.01 - Structural constructions, buildings and structures, Pridneprovsky State Academy of Civil Engineering and Architecture, 1994.

The problems of buckling of steel storage tanks under external pressure have been investigated. The effects of initial imperfections, the changing of the shell range thickness, and stability of tanks partially filled by a liquid are examined.

Ісмагулов Б. Г. Удосконалення методів оцінки стійкості сталевих вертикальних циліндричних резервуарів, рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.23.01 - Будівельні конструкції, будови та споруди, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. 1994.

Досліджені питання стійкості сталевих вертикальних циліндричних резервуарів наземного типу при зовнішньому тиску. Розглянуті ефекти впливу, початкових недосконалостей, можливої разнотолщинності циліндричної стінки, а також стійкість в умовах часткового заповнення резервуару рідиною. Ключові слова: сталеві вертикальні циліндричні резервуар, стійкість оболонки, критичні зовнішні тиски, початкові недосконалості, разнотолщинність поясів.

Формат 60x84

Заказ 400 , тираж 80 , ДХТИ ротапринт.

AB 31.669