

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕСТНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА

А. А. Крысько, канд. техн. наук, доцент

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Аннотация. В работе предложена модификация универсального вычислительного алгоритма геометрического и компьютерного моделирования стенки резервуара с учётом общих несовершенств геометрической формы для построения и исследования местных несовершенств геометрической формы. Исследовано напряженно-деформированное состояние ряда стальных резервуаров объемом от 1000 до 10000 м³ для хранения нефтепродуктов с учётом местных несовершенств под действием гидростатической нагрузки в линейной постановке. Сопоставлены результаты численных исследований с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими исследователями.

Ключевые слова: стальной вертикальный цилиндрический резервуар, гидростатическое давление, напряжённо-деформированное состояние, местные несовершенства геометрической формы.



Крысько
Александра Анатольевна

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Имевшиеся случаи разрушения сварных вертикальных цилиндрических резервуаров привели к необходимости изучения действительных условий работы данных сооружений и изучению влияния искажения геометрической формы резервуаров на их прочность и устойчивость. В процессе эксплуатации к начальным дефектам постепенно добавляются различного рода повреждения, вызванные воздействием эксплуатационных факторов. Одними из наиболее характерных геометрических несовершенств стенки стальных резервуаров являются локальные выпучины или вмятины различной формы и расположения. Для учета местных несовершенств геометрической формы при расчетах на прочность и устойчивость стенки тонкостенных оболочек инженерных сооружений необходимо аналитическое описание ее действительной поверхности.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Местные несовершенства геометрии поверхностей тонкостенных оболочек инженерных сооружений исследовались в работах многих отечественных и зарубежных ученых [1-5].

Анализируя исследования влияния местных несовершенств геометрической формы на напряженно-деформированное состояние конструкции, можно сделать вывод об отсутствии на данном этапе универсального инструмента для их описания. Решение тех или иных задач по аналитическому описанию геометрических несовершенств напрямую зависит от данного конкретного условия задачи. Чаще всего используется идеализация несовершенств сферической формы, которую, тем не менее, нельзя считать универсальным подходом.

В работе [6] был предложен универсальный алгоритм геометрического и компьютерного моделирования стальных вертикальных цилиндрических резервуаров с учётом несовершенств геометрической формы с последующим численным исследованием их напряжённо-деформированного состояния под действием различных нагрузок и в различных постановках. При этом исследования проводились на общих несовершенствах геометрической формы, однако этот же вычислительный

алгоритм можно использовать и для моделирования местных несовершенств геометрической формы. Только для этого необходимо выполнить его модификацию.

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗЕРВУАРОВ С ВМЯТИНАМИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Численное исследование НДС (напряжённо-деформированного состояния) требует замены реального объекта его математической моделью, которая должна полностью или частично обладать свойствами своего прототипа, и желательно быть достаточно простой для практического осуществления расчетов. Если общепринятой проверенной модели (расчетной схемы) для данного случая не существует, её создают по аналогии, на основе опыта моделирования похожих конструкций, за счет принятия ряда упрощающих предположений (допущений). Поэтому математическая модель никогда не будет исчерпывающе полной и всегда будет отличаться от оригинальной строительной конструкции. Лучшим способом проверки расчетной схемы является сопоставление полученных с её использованием результатов с экспериментальными данными. В отсутствии экспериментальных данных верификацию такой модели можно проводить на основании данных, полученных другими исследователями и, соответственно, проверенных ими на существующих экспериментальных данных.

Для сравнения результатов численных исследований НДС стального ВЦР (вертикального цилиндрического резервуара), полученных на основе предложенного в работе [6] универсального алгоритма моделирования действительной поверхности резервуара, с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими исследователями, было проанализировано НДС девяти резервуаров различного объема от 1000 до 10000 м³ для хранения нефтепродуктов различного объема с учётом местных несовершенств геометрической формы.

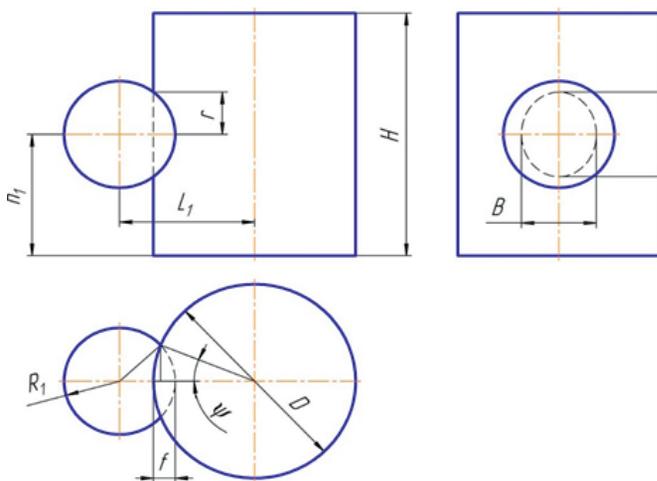


Рис. 1. Геометрические размеры резервуара и сферической вмятины

Универсальный вычислительный алгоритм моделирования действительной поверхности резервуара [9] позволяет на основании данных, полученных в результате обследования (высота резервуара, его радиус и отклонения стенки резервуара от вертикали), создавать геометрическую и компьютерную модель резервуара с несовершенствами геометрической формы. Причем в вычислительном алгоритме учтены различные способы обследования резервуара, такие как измерение с помощью традиционных инструментов (лазерная или обычная рулетка, отвес, измерительное колесо, тахеометр, нивелир и т.д.) и современная технология наземного лазерного сканирования [10].

Нормы [7], в соответствии с которыми проводят техническую диагностику вертикальных цилиндрических резервуаров, не требуют детальных промеров геометрии локальных дефектов формы, поэтому в технических отчетах приводится минимальная информация о параметрах вмятин (высота, глубина и примерное расположение). Это обстоятельство было учтено Алифановым Л. А. [2] при схематизации (идеализации) формы вмятины. В качестве геометрических параметров, однозначно определяющих НДС в зоне дефекта, были выбраны диаметр, толщина и высота стенки резервуара и глубина вмятины. Алифановым Л. А. в работе [2] был выбран следующий способ идеализации – считать поверхность дефекта сферической. Поэтому для верификации результатов моделирования и численного расчёта необходимо адаптировать универсальный алгоритм, предложенный во втором разделе, под исходные данные, которые использовал в своей работе Алифанов Л. А.

Для описания вмятины сферической формы определенного размера и расположения на поверхности резервуара (рис. 1) в универсальный алгоритм кроме отклонения от вертикали были дополнительно введены высота вмятины и коэффициент, определяющий положение центра вмятины относительно высоты резервуара (Таблица 1), что позволило смоделировать вмятину нужного размера и сопоставить его НДС под действием гидростатической нагрузки с результатами, полученными в работе Алифанова Л. А. [2].

Координаты горизонтальной проекции центра сферической вмятины определялись в соответствии с формулами (3.1) – (3.3), приведенными в [2]. Высота центра вмятины была определена с помощью коэффициента h_0 (Таблица 1).

Далее для автоматизации процесса был разработан и использован алгоритм, позволяющий реструктурировать исходные данные с последующей реконструкцией поверхности с вмятиной на основе универсального алгоритма, основанного на аппроксимации отсека поверхности выпуклыми обводами первого порядка гладкости.

Универсальный алгоритм формирования неэкономерной поверхности оболочки инженерных сооружений, предложенный во втором разделе [6] и эффективно использованный в третьем разделе [6] для моделирования общих несовершенств геометрической

Таблица 1.

Основные геометрические размеры резервуаров и сферических вмятин

V рез-ра	№ в.м.	D, м	H, м	t, мм	h_0	h1	f, м	L, м	R1, м	L1, м	B, м
1000 м ³	94	12,34	8,94	4	0,17	1,52	0,038	1,2	4,76	10,89	0,90
	95	12,34	8,94	4	0,08	0,72	0,041	1,12	3,84	9,97	0,88
	97	12,34	8,94	4	0,67	5,99	0,076	1,6	4,25	10,34	1,23
5000 м ³	133	22,79	11,92	7	0,88	10,49	0,05	1,5	5,65	17,00	1,23
	135	22,79	11,92	7	0,56	6,68	0,06	2,5	13,05	24,39	1,71
	145	22,79	11,92	7	0,06	0,72	0,02	0,7	3,07	14,45	0,62
10000 м ³	244	39,9	17,88	8	0,83	14,84	0,04	3	28,15	48,06	1,93
	249	39,9	17,88	8	0,62	11,09	0,02	1	6,26	26,19	0,87
	251	39,9	17,88	8	0,71	12,69	0,02	1,5	14,07	34,00	1,15

где D – диаметр нефтехранилища, H – высота резервуара, t – толщина стенки резервуара, L – высота вмятины, f – глубина вмятины, h_0 – относительная высота расположения вмятины

формы, был разработан таким образом, что поверхность оболочки строится по точкам, принадлежащим этой оболочке, с помощью выпуклых обводов первого порядка гладкости. Таким образом на поверхности оболочки получаем некоторую сеть, состоящую из ячеек определенного размера. Этот размер определяется положением исходных точек поверхности. Такая сеть может иметь достаточно большой размер, по сравнению с необходимым размером конечного элемента. Поэтому каждую ячейку сети на поверхности оболочки нужно дополнительно разбить на конечные элементы нужного размера. Легче всего это сделать, разделив на нужное количество два параметра, образующих ячейку сети поверхности оболочки. Для моделирования местных несовершенств геометрической формы стальных ВЦР, имеющих свою специфику, возникает отдельная задача определения исходных точек на поверхности оболочки, для которых, впоследствии, можно применить универсальный алгоритм построения незакономерной поверхности.

Итак, количество ячеек поверхности оболочки, которые составляют целостную поверхность стального ВЦР, определяется четырьмя параметрами. Первые два из них определяют количество ячеек, на которые делится поверхность резервуара. Эти параметры напрямую зависят от геометрических размеров вмятины L и B , представленных в таблице 1. Далее каждая из ячеек поверхности резервуара с помощью других двух параметров аппроксимируется конечными элементами – плоскостями с помощью параметров StU и StV . Следует отметить, что если количество ячеек зафиксировано для каждой конкретной задачи, то параметрами StU и StV можно варьировать для получения требуемой плотности конечных элементов по всей

поверхности резервуара. При таком алгоритме сетка конечных элементов на поверхности резервуара получается неравномерной. Причём эта неравномерность представлена кольцами по высоте резервуара. Преимуществом такого подхода является универсальность, а также полная автоматизация процесса вычисления. Недостатком является то, что нет возможности, в случае необходимости, загустить сетку именно в зоне локального дефекта. Поэтому для увеличения точности расчётов приходилось «загущать» сетку по всей поверхности резервуара, что, конечно же, значительно влияло на быстродействие. Однако данный недостаток следует отнести именно к недостаткам программной реализации. Поскольку автор не является профессиональным программистом, нами была выбрана более упрощённая схема программной реализации универсального алгоритма, которая, однако, показала результат с достаточной для инженера точностью, позволила сопоставить результаты исследований автора и подтвердить возможность использования предложенных алгоритмов формирования незакономерной поверхности по заданным характеристикам, а также использование их для моделирования и численного исследования поверхностей тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы.

Для программной реализации модифицированного универсального алгоритма и получения геометрических и компьютерных моделей стенки резервуара с местными несовершенствами геометрической формы в виде сферических вмятин использовалась среда программирования VBA с последующим выводом информации в AutoCAD.

Таблица 2.

Сравнение результатов численных исследований НДС резервуаров

V рез-па	№ в.м.	D, м	H, м	h0	f, мм	L, м	t, мм	σ_{max}	$\sigma_{max}(R)$	Δ^* , %
1000 м ³	94	12,34	8,94	0,17	38	1,2	4	993	906,73	8,69
	95	12,34	8,94	0,08	41	1,12	4	1280	1165,3	8,96
	97	12,34	8,94	0,67	76	1,6	4	525	491,64	6,35
5000 м ³	133	22,79	11,92	0,88	50	1,5	7	196	184,12	6,06
	135	22,79	11,92	0,56	60	2,5	7	807	747,84	7,33
	145	22,79	11,92	0,06	20	0,7	7	862	788,32	8,55
10000 м ³	244	39,9	17,88	0,83	40	3	8	650	607,57	6,53
	249	39,9	17,88	0,62	20	1	8	723	679,31	6,04
	251	39,9	17,88	0,71	20	1,5	8	636	594,65	6,50

σ_{max} – максимальные напряжения при полной высоте налива, полученные Алифановым Л. А. [2];
 $\sigma_{max}(R)$ – максимальные напряжения при полной высоте налива, полученные в данной работе

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕСТНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Как отмечалось в [2], моделирование НДС несовершенств формы на стенках тонкостенных сосудов давления в общем случае представляет собой геометрически и физически нелинейную задачу. Однако на практике перед проведением подобных исследований выполняют расчеты конструкций в линейной постановке. Это объясняется следующими причинами:

1. В начальной стадии нагружения, когда действующие нагрузки не достигли определенного порога, нелинейные свойства обычно не проявляются.
2. Существует большое количество приближенных (инженерных) методик учета физической нелинейности [8], отталкивающихся от условных результатов «упругих» расчетов.

Для нас важен тот факт, что в работе [2] автором проводились численные исследования НДС в линейной постановке, поэтому для полного сопоставления и верификации результатов исследований нами принято решение также выполнять исследования НДС резервуаров в линейной постановке.

Поскольку универсальный алгоритм позволяет моделировать стенку резервуара полностью, а введение в расчетную схему кровли и днища требует дополнительных временных затрат, было решено проводить расчеты на модели стенки резервуара, заменив кровлю и днище дополнительными закреплениями. Так как в [2] автор для проведения исследований использовал только гидростатическую нагрузку, без учета собственного веса конструкций, то замену считаем правомерной. Чтобы минимизировать воздействие краевого эффекта в зоне закрепления стенки были выбраны вмятины, достаточно удаленные от других зон концентрации напряжений.

Для проведения численных исследований использован расчетный комплекс SCAD версия 11.5,

в который расчетная схема в виде двумерной конечно-элементной сети точек импортируется из AutoCAD. Моделирование стенки в линейной постановке выполнено с использованием конечных элементов пластинчатого типа.

Сравнение результатов численного расчёта НДС резервуаров с учётом вмятины сферической формы, полученных на основе универсального алгоритма, предложенного во втором разделе, с аналогичными исследованиями, приведенными в работе Л. А. Алифанова, приведено в таблице 2.

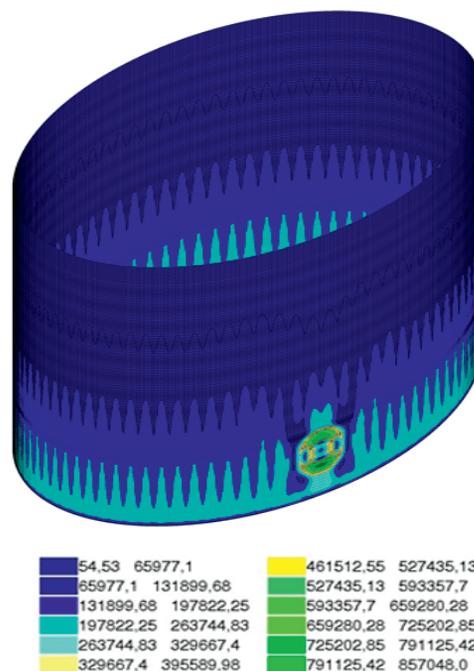


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений в стенке резервуара объемом 1000 м³ со сферической вмятиной при действии гидростатической нагрузки, кН/м²

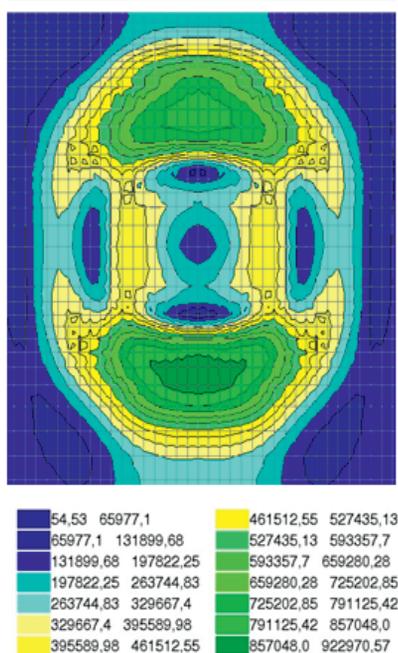


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в зоне сферической вмятины № 94 при действии гидростатической нагрузки, кН/м²

На рис. 2 представлено распределение эквивалентных напряжений в стенке резервуара объемом 1000 м³ со сферической вмятиной при действии гидростатической нагрузки. Представленный расчет выполнен для сферической вмятины № 94.

Детальная графическая визуализация полей эквивалентных напряжений в зоне сферической вмятины на примере резервуара № 94 при воздействии гидростатической нагрузки приведена на рис. 3.

На основании анализа значений погрешности при численном расчёте (таблица 2), которая не превышает 10 %, можно сделать вывод о достоверности полученных результатов и подтверждении полной работоспособности универсального алгоритма моделирования поверхности резервуара с учётом местных несовершенств геометрической формы. При этом большая сходимость результатов наблюдается для резервуаров большего объема. В данном случае погрешность в расчётах может быть вызвана не только использованием разных вычислительных комплексов (доц. Алифанов Л. А. использовал вычислительный комплекс ANSYS и программный пакет NASTRAN), но и тем фактом, что Алифанов Л. А. в местах концентрации напряжений использовал более плотную сетку, в то время как в нашем случае сетка была более равномерной, чтобы не отходить от концепции универсальности предложенного алгоритма.

ВЫВОДЫ

Модифицирован универсальный алгоритм моделирования стенки резервуара с помощью дополнительного введения высоты вмятины и коэффициента, определяющего положение центра вмятины по отношению

к высоте резервуара для описания сферической формы вмятины определенного размера и расположения. Исследовано НДС ряда стальных резервуаров объемом от 1000 м³ до 10000 м³ для хранения нефтепродуктов с учётом местных несовершенств сферической формы под действием гидростатической нагрузки в линейной постановке, что позволило сопоставить результаты численных исследований с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими исследователями, и подтвердило достоверность полученных результатов исследований и работоспособность универсального алгоритма.

Список литературы

1. Е. А. Егоров, *Комплексный анализ, оценка и управление надежностью стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов* [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Е. А. Егоров // Приднепровская гос. академия строительства и архитектуры. — Д., 2004. — 337 с.
2. Л. А. Алифанов, *Нормирование дефектов формы и ресурса вертикальных цилиндрических резервуаров* [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / Л. А. Алифанов // Институт вычислительного моделирования СО РАН. — Красноярск, 2003. — 224 с.
3. B. Prabu, *Parametric study on buckling behaviour of dented short carbon steel cylindrical shell subjected to uniform axial compression* [Текст] / B. Prabu, A.V. Raviprakash, A. Venkatraman // *Thin-Walled Structures*. — 2010. — 48. — pp. 639-649.
4. F. H. Hamdan, *Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks* [Текст] / F. H. Hamdan // *Journal of Constructional Steel Research*. — 2000. — 53. — pp. 307-333.
5. K. Rasiulis, *Stress/strain state investigations for extreme points of thin wall cylindrical tanks* [Текст] / K. Rasiulis, A. Ёapalas, R. Vadluga, M. Samofalov // *Journal of Constructional Steel Research*. — 2006. — 62. — pp. 1232-1237.
6. А. А. Крысько, *Геометрическое и компьютерное моделирование эксплуатируемых конструкций тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы* [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01, 05.01.01 / А. А. Крысько // ГОУ ВПО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. — Макеевка: ДОННАСА, 2016. — 193 с.
7. РД 05-95-95. *Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов* [Текст]. — М. : ВНИИМонтажспецстрой, 1995. — 17 с.
8. Е. А. Егоров, *Исследование вопросов устойчивости стальных вертикальных цилиндрических резервуаров* [Текст] / Е. А. Егоров, Ю. В. Федоряка // *Металлические конструкции*. — 2006. — Том 9, № 1. — С. 89-97.
9. О. А. Крысько, *Вычислительный алгоритм формирования геометрических моделей действительной поверхности тонкостенных оболочек технических форм методами БН-исчисления* [Текст] / О. А. Крысько // *Наукові нотатки : Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»)*. — Луцьк, 2015. — Випуск 48. — С. 125-129.
10. О. А. Крысько, *Обработка данных отриманих НЛС для створення геометричної моделі дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм* [Текст] / О. А. Крысько // *Сучасні проблеми моделювання : зб. наук. праць / МДПУ ім. Б. Хмельницького ; гол. ред. кол. А. В. Найдич. — Мелітополь : Видавництво МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. — Вип. 2. — С. 51-56.*