



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2016, ТОМ 22, НОМЕР 1, 45–57

УДК 514.113.6:624.014.27

(16)-0342-1

МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ З УРАХУВАННЯМ НЕДОСКОНАЛОСТІ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

О. А. Крисько¹, Є. В. Конопацький², А. М. Миронов³, В. П. Мущанов⁴

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.

E-mail: ¹ a.a.krisko@donnasa.ru, ² e.v.konopatskiy@ donnasa.ru, ³ andrejexp@mail.ru,

⁴ volodymyr.mushchanov@mail.ru

Отримана 11 січня 2016; прийнята 22 січня 2016.

Анотація. У роботі наведено універсальний геометричний і комп'ютерний алгоритм моделювання дійсної поверхні стінки резервуара з урахуванням як загальних, так і місцевих недосконалостей геометричної форми. Запропоновано комплексний підхід до чисельного дослідження напружено-деформованого стану і оцінки технічного стану сталевих вертикальних циліндричних резервуарів для зберігання нафтопродуктів з урахуванням недосконалості геометричної форми, починаючи з вимірів відхилень від вертикальної твірної в контрольних точках і закінчуючи аналізом напружено-деформованого стану резервуара. Досліджено напружено-деформований стан дев'яти резервуарів різного об'єму для зберігання нафтопродуктів з урахуванням місцевої недосконалості сферичної форми під дією гідростатичного навантаження в лінійній постановці, що дозволило зіставити результати чисельних досліджень з експериментальними і теоретичними даними, отриманими іншими дослідниками, і підтвердило достовірність отриманих результатів досліджень.

Ключові слова: сталевий вертикальний циліндричний резервуар, напружено-деформований стан, недосконалість геометричної форми, чисельні дослідження, гідростатичне навантаження, БН-числення, обчислювальний алгоритм.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С УЧЁТОМ НЕСОВЕРШЕНСТВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

А. А. Крысько¹, Е. В. Конопацкий², А. Н. Миронов³, В. Ф. Мущанов⁴

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.

E-mail: ¹ a.a.krisko@donnasa.ru, ² e.v.konopatskiy@ donnasa.ru, ³ andrejexp@mail.ru,

⁴ volodymyr.mushchanov@mail.ru

Получена 11 января 2016; принята 22 января 2016.

Аннотация. В работе приведен универсальный геометрический и компьютерный алгоритм моделирования действительной поверхности стенки резервуара с учётом как общих, так и местных несовершенств геометрической формы. Предложен комплексный подход к численному исследованию напряжённо-деформированного состояния и оценке технического состояния стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической

формы, начиная с измерений отклонений от вертикальной образующей в контрольных точках и заканчивая анализом напряженно-деформированного состояния резервуара. Исследовано напряженно-деформированное состояние девяти резервуаров различного объема 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.

Ключевые слова: стальной вертикальный цилиндрический резервуар, напряженно-деформированное состояние, несовершенства геометрической формы, численные исследования, гидростатическая нагрузка, БН-исчисление, вычислительный алгоритм.

TECHNIQUE OF NUMERICAL ANALYSIS OF THE INTENSE DEFORMED STATE OF STEEL VERTICAL CYLINDRICAL TANKS WITH TAKING INTO ACCOUNT THE DEFECTS OF GEOMETRICAL FORM

Alexandra Krysko¹, Yevgeniy Konopatskiy², Andrey Myronov³,
Volodymyr Mushchanov⁴

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.*

*E-mail: ¹ a.a.krysko@donnasa.ru, ² e.v.konopatskiy@ donnasa.ru, ³ andreyexp@mail.ru,
⁴ volodymyr.mushchanov@mail.ru*

Received 11 January 2016; accepted 22 January 2016.

Abstract. The work shows a generic geometric and computer simulation algorithm of the actual surface of the tank wall taking into account both General and local geometry imperfections. Proposed integrated approach to the numerical study of the intense deformed state and evaluation of technical condition of vertical cylindrical steel storage tanks for petroleum products, taking into account the imperfections of geometric forms, ranging from measuring deviations from vertical forming at checkpoints and to the analysis of the stress-strain State of the tank. Researched the intense deformed state of nine tanks of various sizes for storage with local imperfections spherical shape under the influence of hydrostatic load linear setting, allowing to compare the results of numerical research with experimental and theoretical data obtained by other researchers and confirmed the authenticity of the received results.

Keywords: steel vertical cylindrical tank, the intense deformed state, the defects of geometrical form, numerical analysis, hydrostatic load, BN-calculation, computational algorithm.

Введение

Существует достаточно большое количество стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов, которые эксплуатируются со сверхнормативными дефектами геометрической формы. В существующих нормативных документах [1–5, 17] допуски на дефекты геометрической формы определены исходя из возможностей технологии изготовления и монтажа резервуарных конструкций. Эти допуски никак не связаны с условиями прочности или устойчивости, что, по

мнению профессора Егорова [6, 16], снижает их значимость. Для подтверждения возможности эксплуатации таких резервуаров необходим комплексный подход к оценке их напряженно-деформированного состояния.

Для диагностики технического состояния резервуара и определения возможных условий его дальнейшей эксплуатации необходимо провести исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) стенки резервуара с учётом всех искажений геометрической формы. Учитывая большое разнообразие форм геомет-

рических несовершенств, их расположения и незакономерность искажённой поверхности резервуара, а также невозможность учесть без численного исследования воздействие конкретного несовершенства геометрической формы поверхности на весь резервуар в целом, эту задачу можно решить двумя способами: с помощью натурного измерения напряжений и с помощью численного анализа НДС, реализованного на основе метода конечных элементов. Численный анализ влияния несовершенств геометрической формы на НДС стальных вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР) возможен только с помощью применения современной вычислительной техники. Однако для его выполнения необходимо иметь компьютерную модель, а следовательно, и аналитическое описание действительной поверхности стенки ВЦР с несовершенствами.

Вычислительный алгоритм формирования геометрической модели действительной поверхности резервуара с учётом несовершенств геометрической формы

Для геометрического моделирования конструкций тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы в данной работе используется математический аппарат БН-исчисления [7–10], который позволяет получить аналитические зависимости, описывающие действительную поверхность тонкостенных оболочек инженерных сооружений.

При проведении измерений с помощью традиционных инструментов сооружение условно разделяется по вертикали на несколько поясов, на уровне которых измеряется отклонение конструкции от образующей. Таким образом, исходные данные для построения геометрической модели тонкостенной оболочки инженерного сооружения состоят из геометрических характеристик конструкции, количества поясов, количества точек в каждом поясе и значений отклонений в этих точках от образующей. Однако для построения геометрической модели в БН-исчислении необходимо получить массив точек, т. е. координаты точек вместо отклонений.

Для определения точек на поверхности резервуара (рис. 1) принимаем следующие обо-

значения точек: $A_{i,j}$, где i – порядковый номер опорного контура, изменяющийся от 1 до m ; j – порядковый номер точки на опорном контуре, изменяющийся от 1 до n . Для упрощения расчетов принимаем количество точек в каждом поясе одинаковым, причем точки располагаются равномерно. Принята прямоугольная система координат с началом в точке O (рис. 1). Тогда оси x и y будут совпадать с осями окружности (рис. 2), а за ось z примем прямую OO_i (рис. 1).

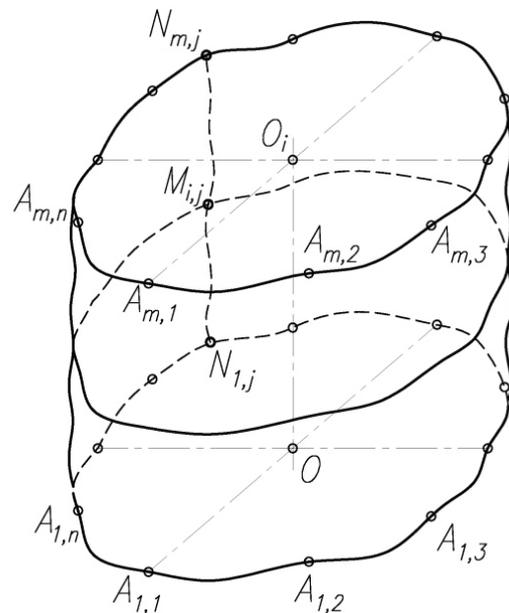


Рисунок 1. Геометрическая схема стенки резервуара с несовершенствами.

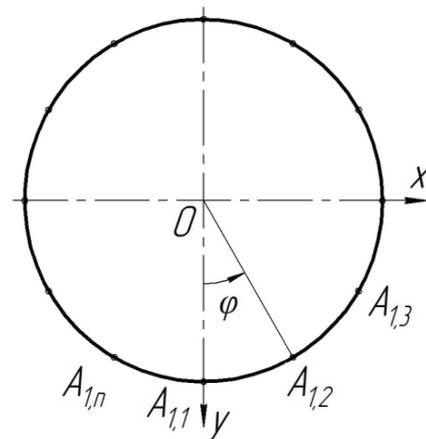


Рисунок 2. Основание цилиндрической поверхности резервуара.

На основе полученных в работе [11] алгоритмов конструирования обводов разработан универсальный вычислительный алгоритм моделирования действительной поверхности стального ВЦР с учётом несовершенств геометрической формы [13], который приводится ниже.

1. Для начала необходимо получить исходные данные для геометрического моделирования, которыми являются координаты точек на поверхности резервуара, с помощью данных, полученных в результате обследования резервуара (высота резервуара, его радиус и отклонения от вертикальной стенки). Эти данные принимаем в соответствии с типовым проектом ТП 704-1-54 «Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 1 000 м³».

1.1. Вводим: высоту резервуара h , радиус резервуара R , количество поясов k , количество точек в каждом поясе n и массив отклонений от вертикальной стенки $\delta_{i,j}$.

Для восполнения недостающей информации относительно отклонений стенки от вертикальной образующей воспользуемся техническим заключением № 96-2 ДЦ «Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций резервуара №1 для хранения бензина объемом 1 000 м³ КСП «Бешенский», которое было проведено «Донбасским диагностическим центром строительных конструкций, зданий и сооружений» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (табл. 1).

1.2. Определяем количество опорных контуров по формуле: $m = k + 1$, где k – количество поясов (в данном случае 6).

1.3. Координаты $x_{A_{i,j}}$ и $y_{A_{i,j}}$ определим с помощью радиуса резервуара и таблицы отклонений стенки резервуара от вертикали по формулам:

$$x_{A_{i,j}} = (R + \delta_{i,j}) \sin \frac{2(j-1)\pi}{n}; \quad (1)$$

$$y_{A_{i,j}} = (R + \delta_{i,j}) \cos \frac{2(j-1)\pi}{n}.$$

1.4. Определяем массив координат $z_{i,j}$ по формуле: $z_{i,j} = (i-1)h/k$, из расчёта, что в каждом i -м слое координата $z_{i,j}$ является одинаковой. Т. е. $z_{i,j} = z_{i,j+1} = \dots = z_{i,n}$.

В результате получим три двумерных массива соответственно для координат точек $x_{A_{i,j}}$, $y_{A_{i,j}}$ и $z_{A_{i,j}}$.

При проведении измерений с помощью технологии наземного лазерного сканирования (НЛС) результатом является цифровая модель действительной поверхности тонкостенной оболочки технической формы [12]. Таким образом, в этом случае первая часть исключается из алгоритма за ненадобностью.

2. Алгоритм формирования линий опорного контура следующий:

2.1. Формируем цикл для i от 1 до m .

2.2. Определяем длину отрезка $A_{i,j}A_{i,j+1}$:

$$|A_{i,j}A_{i,j+1}| = \sqrt{\sum (A_{i,j+1} - A_{i,j})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n+1. \quad (2)$$

2.3. Определяем длину отрезка $A_{i,j}A_{i,j+2}$:

$$|A_{i,j}A_{i,j+2}| = \sqrt{\sum (A_{i,j+2} - A_{i,j})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n+1. \quad (3)$$

2.4. Определяем массив точек $B_{i,j+1}$:

$$B_{i,j+1} = (A_{i,j+2} - A_{i,j}) \frac{|A_{i,j+1}A_{i,j+2}|}{\pi |A_{i,j}A_{i,j+2}|} + A_{i,j+1},$$

Таблица 1. Отклонения стенки от вертикальной образующей в опорных точках

№ пояса	Отклонения стенки от вертикали в опорных точках (верх пояса), мм											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	5	0	-5	-10	23	57	90	67	43	20	15	10
2	7	-1	-9	-17	10	38	65	50	35	20	16	11
3	-10	-13	-17	-20	11	41	72	61	51	40	23	7
4	-20	-20	-20	-20	8	35	63	62	61	60	33	7
5	-30	-23	-17	-10	19	47	76	81	85	90	50	10
6	-45	-35	-24	-14	9	32	55	67	78	90	45	0

$$j = 1, 2, \dots, n+1. \quad (4)$$

2.5. Определяем массив точек $C_{i,j+1}$:

$$C_{i,j+1} = (A_{i,j} - A_{i,j+2}) \frac{|A_{i,j} A_{i,j+1}|}{\pi |A_{i,j} A_{i,j+2}|} + A_{i,j+1}, \quad (5)$$

$$j = 1, 2, \dots, n+1.$$

2.6. Определяем дуги линий i -го опорного контура:

$$N_{i,j} = A_{i,j} \bar{u}^3 + 3B_{i,j} \bar{u}^2 u + 3C_{i,j} u^2 \bar{u} + A_{i,j+1} u^3, \quad (6)$$

$$j = 2, \dots, n+1,$$

где $\bar{u} = 1 - u$; $0 \leq u \leq 1$.

2.7. Увеличиваем i на 1 и возвращаемся к пункту 2.1.

3. Алгоритм формирования образующих линий:

3.1. Формируем цикл для j от 2 до $n+1$.

3.2. Определяем длины отрезков:

$$|N_{i,j} N_{i+1,j}| = \sqrt{\sum (N_{i+1,j} - N_{i,j})^2}, \quad i = 2, \dots, m-1,$$

$$|N_{i-1,j} N_{i+1,j}| = \sqrt{\sum (N_{i+1,j} - N_{i-1,j})^2}, \quad i = 2, \dots, m-1, \quad (7)$$

$$|N_{i,j} N_{i-1,j}| = \sqrt{\sum (N_{i-1,j} - N_{i,j})^2}, \quad i = 2, \dots, m-1.$$

3.3. Определяем точки $P_{i,j}$ и $Q_{i,j}$:

$$P_{i,j} = (N_{i+1,j} - N_{i-1,j}) \frac{|N_{i,j} N_{i+1,j}|}{2 |N_{i-1,j} N_{i+1,j}|} + N_{i,j}, \quad (8)$$

$$i = 2, 3, \dots, m-1.$$

$$Q_{i,j} = (N_{i-1,j} - N_{i+1,j}) \frac{|N_{i,j} N_{i-1,j}|}{2 |N_{i-1,j} N_{i+1,j}|} + N_{i,j}, \quad (9)$$

$$i = 2, 3, \dots, m-1.$$

3.4. Определяем дуги обвода для первого и последнего поясов:

$$M_{1,j} = N_{1,j} \bar{v}^2 + 2Q_{2,j} v \bar{v} + N_{2,j} v^2. \quad (10)$$

$$M_{m,j} = N_{m-1,j} \bar{v}^2 + 2P_{m-1,j} v \bar{v} + N_{m,j} v^2. \quad (11)$$

3.5. Формируем дуги образующих линий для промежуточных поясов:

$$M_{i,j} = N_{i,j} \bar{v}^3 + 3P_{i,j} \bar{v}^2 v + 3Q_{i,j} v^2 \bar{v} + N_{i+1,j} v^3, \quad (12)$$

$$i = 2, 3, \dots, m-2,$$

где $\bar{v} = 1 - v$; $0 \leq v \leq 1$.

Увеличиваем значение j на 1 и возвращаемся к пункту 3.1.

На основании разработанного ранее вычислительного алгоритма в программном комплексе *Maple* создана компьютерная модель поверхности вертикального цилиндрического резервуара №1 объемом 1 000 м³ для хранения бензина с учетом несовершенств их геометрической формы.

Исследование влияния несовершенств геометрической формы на НДС резервуара № 1 для хранения бензина объёмом 1 000 м³

Полученная модель является основой для создания расчетной схемы в вычислительном комплексе *SCAD Office*, но для её использования необходимо аппроксимировать полученную поверхность плоскими конечными элементами заданного размера. Эта задача была реализована с помощью *VBA* с последующим выводом информации в *AutoCAD* в формате *.dxf. В результате получим следующую расчетную схему (рис. 3).

Определение размера конечного элемента резервуара было выполнено на основании сопоставления результатов аналитического и численного расчёта нижнего пояса идеализированного резервуара без учёта несовершенств

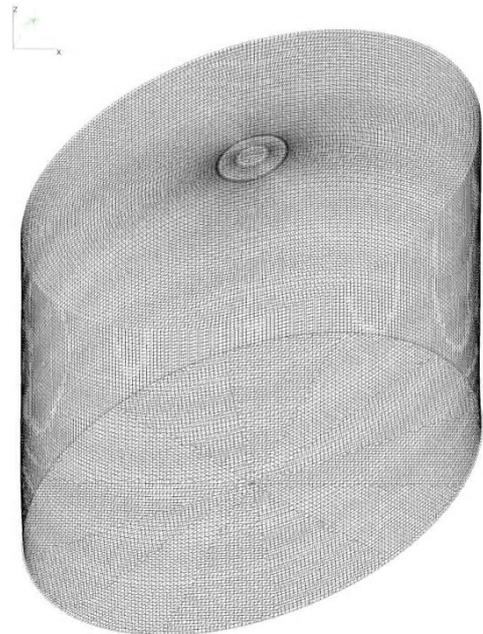


Рисунок 3. Расчетная схема резервуара объемом 1 000 м³ с геометрическими несовершенствами.

геометрической формы. Окончательно было принято разбиение стенки резервуара с размерами конечного элемента $0,1076 \times 0,1000$ м, при этом погрешность вычисленных напряжений составляет всего 1,2 %. Такой же размер конечного элемента был принят и для численного исследования НДС резервуара с учётом несовершенств геометрической формы.

Для вертикальных цилиндрических резервуаров основной нагрузкой является внутреннее давление жидкости на стенки резервуара (т. н. гидростатическое давление), которое вызывает нормальные кольцевые напряжения. Следует отметить, что исходный расчёт НДС стенки резервуара при гидростатической нагрузке в линейной постановке давал результат в пределах нормы, а в нелинейной постановке – напряжения в стенке резервуара в десятки раз превышали предел текучести стали. Было установлено, что это вызвано некорректным заданием гидростатического давления при моделировании нелинейных нагрузок на стенку резервуара. Гидростатическое давление жидкости на стенку резервуара не может быть разбито на доли простым введением коэффициента загрузки и количества шагов ввиду того, что давление увеличивается не частями на всю стенку по высоте, а снизу вверх по мере наполнения резервуара. Поэтому для исследования НДС стенки резервуара под действием гидростатической нагрузки в нелинейной постановке была реализована поэтапная схема загрузки резервуара, как показано на рисунке 4. Таким образом, при моделировании нелинейного нагружения гидростатическим давлением имеем 6 шагов нагружения с коэффициентом загрузки, равным 1, в соответствии с количеством поясов стенки резервуара. На первом этапе нагружается первый пояс стенки резервуара, на втором – первый и второй, на третьем – первый, второй и третий и т. д. до выхода на уровень налива жидкости в резервуар (табл. 2). Проверочный расчёт проводился для условий гидростатических испытаний, т. е. моделировалось гидростатическое давление воды.

Результаты анализа влияния несовершенств геометрической формы на НДС резервуара под действием гидростатической нагрузки в нелинейной постановке приведены в таблице 3.

Как видно из анализа (табл. 3), приведенные напряжения в стенке резервуара с несовершенствами в среднем в 1,5 раза превышают аналогичные напряжения в резервуаре с идеализированной стенкой, за исключением верхних поясов резервуара, что говорит о значительном влиянии искажений геометрической формы на НДС стальных ВЦР и подтверждает актуальность выбранной темы и необходимость проведенных научных исследований.

Кроме этого, поэтапная схема нагружения позволяет отслеживать тенденцию изменения напряжений под действием гидростатической нагрузки. Так, на приведенных рисунках (табл. 4) видно, что при третьем этапе нагружения значения приведенных напряжений не превышают значения предела текучести стали, а уже четвёртый этап даёт значительное увеличение приведенных напряжений, которые превышают предел текучести почти в два раза. Таким образом, при реализации поэтапной схемы нагружения появляется возможность определения максимальной высоты налива жидкости в резервуар с учётом несовершенств геометрической формы для его дальнейшей безопас-

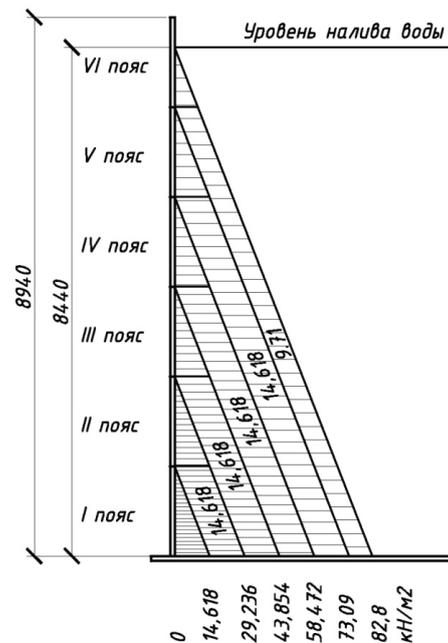


Рисунок 4. Схема поэтапного нагружения резервуара гидростатической нагрузкой в нелинейной постановке.

Таблица 2. Значение приведенных напряжений от действия гидростатической нагрузки в нелинейной постановке, кН/м²

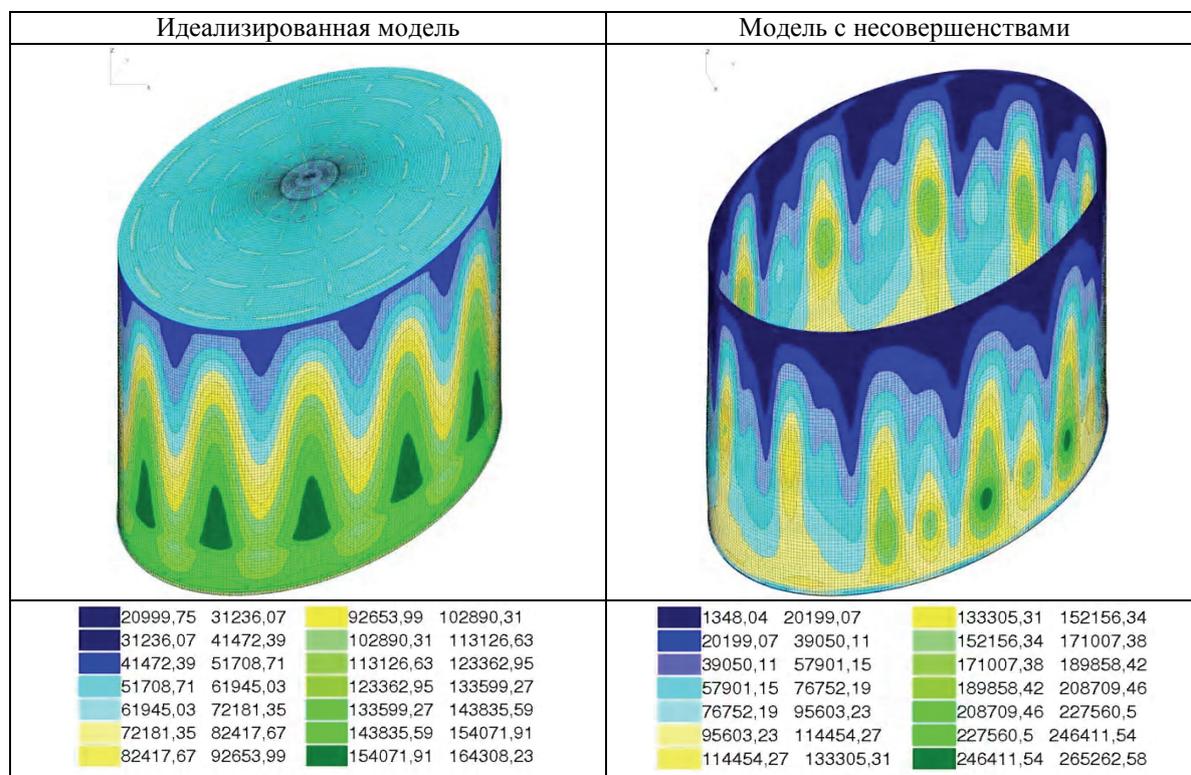


Таблица 3. Анализ результатов расчета НДС резервуара действия гидростатической нагрузки в нелинейной постановке

№ пояса	Напряжения в идеализированной стенке, МПа				Напряжения в стенке с несовершенствами, Мпа				Δ*, %
	σ _x	σ _y	t _{xy}	σ _{пр}	σ _x	σ _y	t _{xy}	σ _{пр}	
I	159,2	20,2	3,2	150,8	266,7	76,6	17,5	240,2	59
II	173,9	26,7	2,5	164,3	298,4	90,7	12,7	266,1	62
III	170,5	29,9	1,4	158,9	237,7	84,5	16,0	209,4	32
IV	156,1	29,9	1,6	143,6	236,1	84,4	6,8	207,7	45
V	124,1	26,8	2,5	113,2	138,3	46,9	5,9	125,0	10
VI	81,8	20,4	3,1	73,7	77,6	28,2	7,5	69,8	-5

ной эксплуатации, которая, однако, должна быть подтверждена расчётом на устойчивость.

Моделирование и численное исследованию НДС стальных ВЦР с учётом местных несовершенств геометрической формы

Для сравнения результатов численных исследований НДС стального ВЦР, полученных на

основе предложенного в работе универсального алгоритма моделирования действительной поверхности резервуара, с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими исследователями, было проанализировано НДС девяти резервуаров различного объема с учётом местных несовершенств под действием гидростатической нагрузки в линейной постановке. Определение НДС в зоне местных

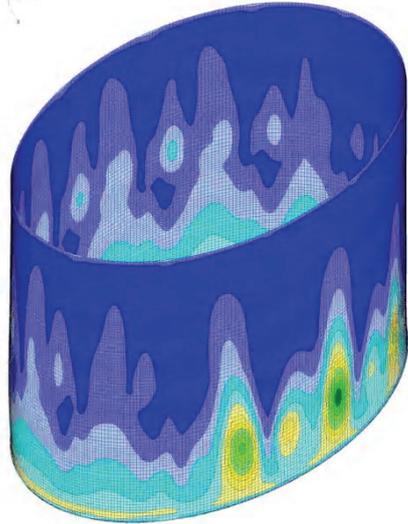
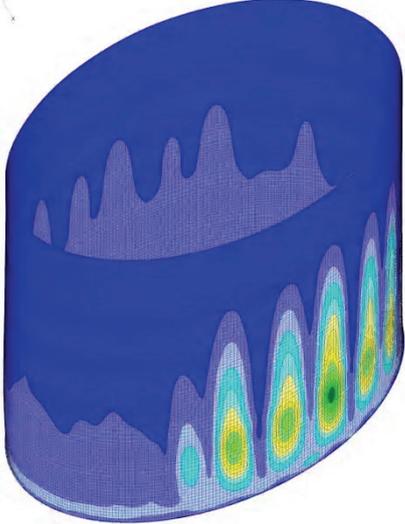
несовершенств рассматривалось в работах [6, 14, 15, 18–20].

Для описания сферической формы вмятины определенного размера и расположения (рис. 5) в универсальный алгоритм кроме отклонения от вертикали, были дополнительно введены высота вмятины и коэффициент, определяющий положение центра вмятины по отношению к высоте резервуара (табл. 5), что позволило смоделировать вмятину нужного

размера и сопоставить его НДС под действием гидростатической нагрузки с результатами, полученными в работе Л. А. Алифанова [14].

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 приведены в таблице 6.

Таблица 4. Значение приведенных напряжений в стенке резервуара с несовершенствами от совместного действия собственного веса и гидростатической нагрузки в нелинейной постановке на третьем и четвертом этапах нагружения, кН/м^2

3 этап нагружения		4 этап нагружения	
			
163,98	12489,39	86441,86	98767,27
12489,39	24814,8	98767,27	111092,68
24814,8	37140,21	111092,68	123418,09
37140,21	49465,62	123418,09	135743,5
49465,62	61791,04	135743,5	148068,91
61791,04	74116,45	148068,91	160394,33
74116,45	86441,86	160394,33	172719,74
65,13	37272,5	260516,7	297724,07
37272,5	74479,86	297724,07	334931,43
74479,86	111687,23	334931,43	372138,8
111687,23	148894,6	372138,8	409346,17
148894,6	186101,96	409346,17	446553,53
186101,96	223309,33	446553,53	483760,9
223309,33	260516,7	483760,9	520968,27

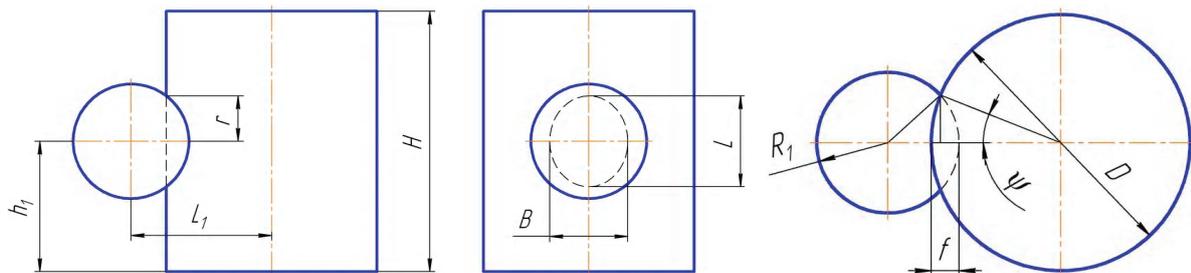


Рисунок 5. Геометрические размеры резервуара и сферической вмятины.

Таблица 5. Основные геометрические размеры резервуаров и сферических вмятин

№ в.м.	D , м	H , м	t , мм	h_0	hl	f , м	L , м	R_I , м	L_I , м	B , м
94	12,34	8,94	4	0,17	1,52	0,038	1,20	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	1,60	4,25	10,34	1,23
133	22,79	11,92	7	0,88	10,49	0,050	1,50	5,65	17,00	1,23
135	22,79	11,92	7	0,56	6,68	0,060	2,50	13,05	24,39	1,71
145	22,79	11,92	7	0,06	0,72	0,020	0,70	3,07	14,45	0,62
244	39,90	17,88	8	0,83	14,84	0,040	3,00	28,15	48,06	1,93
249	39,90	17,88	8	0,62	11,09	0,020	1,00	6,26	26,19	0,87
251	39,90	17,88	8	0,71	12,69	0,020	1,50	14,07	34,00	1,15

Таблица 6. Сравнение результатов численных исследований НДС резервуаров

№ в.м.	D , м	H , м	h_0	f , мм	L , м	t , мм	σ_{\max} , МПа	σ_{\max} (расч.), МПа	Δ^* , %
94	12,34	8,94	0,17	38	1,20	4	993	906,73	8,69
95	12,34	8,94	0,08	41	1,12	4	1 280	1 165,30	8,96
97	12,34	8,94	0,67	76	1,60	4	525	491,64	6,35
133	22,79	11,92	0,88	50	1,50	7	196	184,12	6,06
135	22,79	11,92	0,56	60	2,50	7	807	747,84	7,33
145	22,79	11,92	0,06	20	0,70	7	862	788,32	8,55
244	39,90	17,88	0,83	40	3,00	8	650	607,57	6,53
249	39,90	17,88	0,62	20	1,00	8	723	679,31	6,04
251	39,90	17,88	0,71	20	1,50	8	636	594,65	6,50

Графическая визуализация полей эквивалентных напряжений в зоне сферической вмятины резервуара № 94 при воздействии гидростатической нагрузки приведена на рисунке 6.

На основании анализа значений погрешности при численном расчёте (табл. 6), 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. В данном случае погрешность в расчётах может быть вызвана не только использованием разных вычислительных комплексов (Л. А. Алифанов использовал ANSYS), но и тем фактом, что Л. А. Алифанов 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

1. Получен универсальный геометрический и компьютерный алгоритм моделирования действительной поверхности стенки резервуара с учётом как общих, так и местных несовершенств геометрической формы, что позволяет использовать вычислительные возможности современной компьютерной техники для численного исследования и анализа НДС стальных ВЦР с учётом несовершенств геометрической формы при совместном действии нагрузок на весь резервуар в целом.
2. Предложена поэтапная схема нагружения резервуара, при реализации которой появляется возможность определения максимальной высоты налива жидкости в резервуар с учётом несовершенств геометрической формы для его дальнейшей безопасной эксплуатации, которая, однако, должна быть подтверждена расчётом на устойчивость.

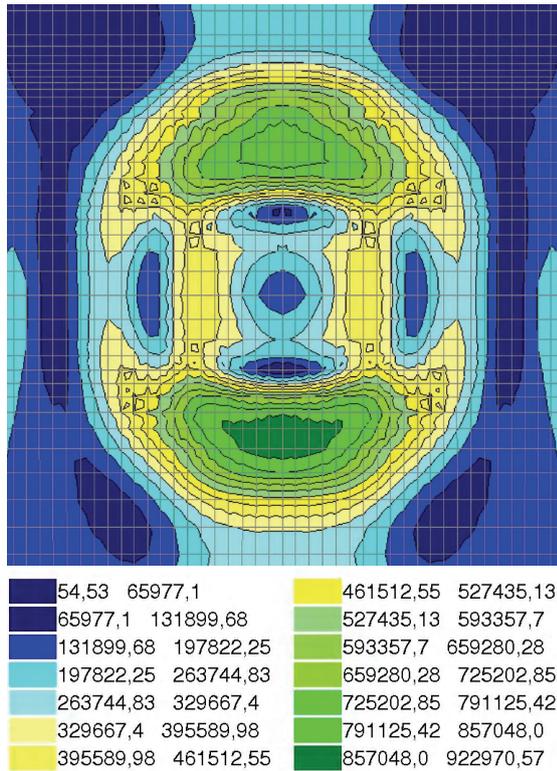


Рисунок 6. Эквивалентные напряжения, кН/м^2 в зоне сферической вмятины при действии гидростатической нагрузки.

Литература

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст]. – На заміну ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 та ДСТУ Б В.2.6-194:2013 ; чинні від 2015–01–01. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
2. ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008. Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів [Текст]. – Уведено вперше ; чинний з 2009–07–01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 13 с.
3. ДБН В.1.2-14:2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Уведено вперше зі скасуванням в Україні ГОСТ 27751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4417-83, СТ СЭВ 4868-84 ; чинні з 2009–12–01. – К. : Мінрегіонбуд, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
4. РД 05-95-95. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных

3. Исследовано НДС девяти резервуаров 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.
4. Разработан и реализован комплексный подход по обработке геометрической информации при обследовании и оценке технического состояния ВЦР, численному моделированию и анализу влияния несовершенств геометрической формы на НДС стального ВЦР. Такой подход позволяет не только аналитически описать действительную поверхность оболочки на основе дискретного массива точек, полученного любым способом, в том числе и НЛС, и исследовать её под действием различных нагрузок, но и моделировать с помощью ЭВМ изменение действительной поверхности оболочки при проведении предполагаемых мер по усилению стенки резервуара.

References

1. DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design code. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014. 199 p. (in Ukrainian)
2. DSTU-N B A.3.1-10:2008. Management, organization and technology technical diagnostics manual for vertical steel tanks. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2008. 13 p. (in Ukraine)
3. DBN V.1.2-14:2009. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. General principles of reliability control and constructional safety of buildings, structures and supports. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. 37 p. (in Ukraine)
4. RD 05-95-95. Regulation on technical diagnostics of welded vertical cylindrical tanks for oil and oil products. Moscow: VNIImontazhspetsstroy, 1995. 17 p. (in Russian)
5. Russian Association of expert organizations of technogenic objects of the increased safety of «Rostekhsperitiza». SA 03-008-08. Tanks vertical steel welded for oil and oil products. Technical diagnosing

- цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов [Текст]. – Введ. 1995–09–01. – М. : ВНИИМонтажспецстрой, 1995. – 17 с.
5. СА 03-008-08. Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности [Текст] : Методические указания / Российская ассоциация экспертов организаций технологических объектов повышенной безопасности «Ростехэкспертиза». – М. : [б. и.], 2009. – 288 с.
 6. Егоров, Е. А. Комплексный анализ, оценка и управление надежностью стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.23.01 / Егоров Евгений Аркадьевич ; Приднепровская гос. академия строительства и архитектуры. – Д., 2004. – 337 с.
 7. Балюба, И. Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.01.01 / И. Г. Балюба. – Макеевка, 1995. – 227 с.
 8. Балюба, И. Г. Точечное исчисление [Текст] : [учебное пособие] / И. Г. Балюба, В. М. Найдьш ; под ред. В. М. Верещаги. – Мелитополь : МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. – 236 с.
 9. Конопацький, Є. В. Геометричне моделювання алгебраїчних кривих та їх використання при конструюванні поверхонь у точковому численні Балюби–Найдиша [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.01 / Конопацький Євген Вікторович. – Мелітополь, 2012. – 164 с.
 10. Давыденко, И. П. Конструирование поверхностей пространственных форм методом подвижного симплекса [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.01 / И. П. Давыденко. – Макеевка, 2012. – 186 с.
 11. Крысько, А. А. Геометрические основы конструирования одномерного обвода через k наперед заданных точек в БН-исчислении [Текст] / А. А. Крысько, Є. В. Конопацький, А. Я. Чураков // Сучасні проблеми моделювання. 2015. Вип. 4. С. 76–81.
 12. Крысько, О. А. Обробка даних отриманих НДС для створення геометричної моделі дійсної поверхні тонкостінних оболонок технічних форм [Текст] / О. А. Крысько // Сучасні проблеми моделювання. 2014. Вип. 2. С. 51–56.
 13. Крысько, А. А. Вычислительный алгоритм формирования геометрических моделей действительной поверхности тонкостенных оболочек технических форм методами БН-исчисления [Текст] / А. А. Крысько // Наукові нотатки. 2015. Випуск 48. С. 125–129.
 14. Алифанов, Л. А. Нормирование дефектов формы и ресурса вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст] : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Л. А. Алифанов. – Красноярск : ИВМ СО РАН, 2004. – 24 с.
 15. Andrianov, I. V. Buckling of Cylindrical Shell of Variable Thickness, Loaded by External Uniform Pressure [Текст] / I. V. Andrianov, B. G. Ismagulov and analysis of safety. (Methodical instructions). Moscow, 2009. 288 p. (in Russian)
 6. Egorov, E. A. The complex analysis, assessment and management of reliability of steel tanks for storage of oil products: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Doctor of Engineering: 05.23.01. Dnipropetrovsk, 2004. 337 p. (in Russian)
 7. Balyuba, I. G. Constructive geometry of varieties in dot calculation: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Doctor of Engineering: 05.01.01. Makeevka, 1995. 227 p. (in Russian)
 8. Balyuba, I. G.; Naidysh, V. M.; Edited by Vereshchaga, V. M. Dot calculation: Textbook. Melitopol: MSPU named after B. Khelnitskiy, 2015. 236 p. (in Russian)
 9. Konopatskiy, E. V. Geometric simulation of algebraic curves and their application at surface detailing in Balyuba-Naidysh dot calculation: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering: 05.01.01. Melitopol, 2012. 164 p. (in Ukrainian)
 10. Davydenko, I. P. Constructing of surfaces of spatial forms by the method of mobile simplex: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering: 05.01.01. Makeevka, 2012. 186 p. (in Russian)
 11. Krysko, A.; Konopatskiy, E.; Churakov, A. Geometric design basics of one-dimensional contours by k prescribed points in BN-calculation. In: *Modern problems of modeling*, 2015, Issue 4, pp. 76–81. (in Russian)
 12. Krysko, A. Processing of data got a surface laser scan-out for creation of geometrical model actual surface of the thin-walled shells technical forms. In: *Modern problems of modeling*, 2014, Issue 2, pp. 51–56. (in Ukrainian)
 13. Krysko, A. A. Computational algorithm of forming of geometrical models of actual surface of the thin-walled shells of technical forms by methods of BN-calculation. In: *Naukovi notatky*, 2015, Issue 48, pp. 125–129. (in Russian)
 14. Alifanov, L. A. Normalization shape defects and resource in vertical storage tank: Author's Abstract thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Krasnoyarsk: ICM SB RAS, 2004. 24 p. (in Russian)
 15. Andrianov, I. V.; Ismagulov, B. G.; Matyash, M. V. Buckling of Cylindrical Shell of Variable Thickness, Loaded by External Uniform Pressure. In: *Technicalne Mechanik*, 2000, Vol. 20, No. 4, pp. 349–354.
 16. Yegorov, Y. A.; Ismagulov, B. G.; Fedoryaka, Y. V. Stability Estimate of Vertical Cylinder-Shaped Tanks in service. In: *Design, inspection, maintenance and operation of cylindrical steel tanks and pipelines: Proceedings of the International Conference / Edited by V. Krupka*. Prague, 2003, pp. 336–341.
 17. CEN/TC 250/SC3/PT4. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–6: General Rules: Supplementary Rules for Shell Structures. Brussels: Centr. Secr., 1999. 83 p.

- M. V. Matyash // *Technische Mechanik*. 2000. Vol. 20, No. 4. P. 349–354.
16. Yegorov, Y. A. Stability Estimate of Vertical Cylinder-Shaped Tanks in service [Текст] / Y. A. Yegorov, B. G. Ismagulov, Y. V. Fedoryaka // Design, inspection, maintenance and operation of cylindrical steel tanks and pipelines : Proceedings of the International Conference / Edited by V. Krupka. – Prague : [s. n.], 2003. – P. 336–341.
 17. CEN/TC 250/SC3/PT4. Eurocode 3: Design of steel structures [Текст]. Part 1-6: General Rules: Supplementary Rules for Shell Structures. – Brussels : Centr. Secr., 1999. – 83 p.
 18. Hornung, Uwe. Buckling loads of tank shells with imperfections [Текст] / Uwe Hornung, Helmut Saal // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2002. Vol. 37, No. 4–5. P. 605–621.
 19. Prabu, B. 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. P. 639–649.
 20. Stress/strain state investigations for extreme points of thin wall cylindrical tanks [Текст] / Konstantin Rasiulis, Antanas Šapalas, Romualdas Vadlūga, Michail Samofalov // *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62, No. 12. P. 1232–1237.
 18. Hornung, Uwe; Saal, Helmut. Buckling loads of tank shells with imperfections. In: *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2002, Vol. 37, No. 4–5, pp. 605–621.
 19. Prabu, B.; Raviprakash, A. V.; Venkatraman, A. Parametric study on buckling behaviour of dented short carbon steel cylindrical shell subjected to uniform axial compression. In: *Thin-Walled Structures*, 2010, 48, pp. 639–649.
 20. Rasiulis, Konstantin; Šapalas, Antanas; Vadlūga, Romualdas; Samofalov, Michail. Stress/strain state investigations for extreme points of thin wall cylindrical tanks. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, Vol. 62, No. 12, pp. 1232–1237.

Олександра Анатоліївна Крысько – магістр технічних наук, асистент кафедри спеціалізованих інформаційних технологій і систем Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: геометричне і комп'ютерне моделювання експлуатованих конструкцій тонкостінних оболонок інженерних споруд з урахуванням недосконалості геометричної форми.

Конопацький Євгеній Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих інформаційних технологій і систем Донбасівської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: визначення геометричних багатovidів за допомогою багатокуткових і багаторадіальних параметризацій методом узагальнених тригонометричних функцій в точковому численні Балюби–Найдиша; розробка інструментів багатовимірної геометрії в точковому численні Балюби–Найдиша для геометричного моделювання багато-параметричних процесів і явищ.

Муцанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки, проректор з наукової роботи Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «Просторові конструкції», академік Академії будівництва України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Миронов Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: сталезалізобетонні конструкції (трубобетонні конструкції); напружено-деформований стан рамних вузлів трубобетонних конструкцій, концентрація напружень в трубобетонних вузлах, втомна міцність трубобетонних конструкцій.

Крысько Александра Анатольевна – магістр технічних наук, асистент кафедри спеціалізованих інформаційних технологій і систем Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: геометричне і комп'ютерне моделювання експлуатованих конструкцій тонкостінних оболонок інженерних споруд з урахуванням недосконалості геометричної форми.

Конопацький Євгеній Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих інформаційних технологій і систем Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: визначення геометричних багатovidів за допомогою багатокуткових і багаторадіальних параметризацій методом узагальнених тригонометричних функцій в точковому численні Балюби–Найдиша; розробка інструментів багатовимірної геометрії в точковому численні Балюби–Найдиша для геометричного моделювання багато-параметричних процесів і явищ.

учные интересы: определение геометрических многообразий с помощью многоугольных и многорадиальных параметризаций методом обобщенных тригонометрических функций в точечном исчислении Балюбы–Найдыша; разработка инструментов многомерной геометрии в точечном исчислении Балюбы–Найдыша для геометрического моделирования многопараметрических процессов и явлений.

Миронов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: сталежелезобетонные конструкции (трубобетонные конструкции); напряженно-деформированное состояние рамных узлов трубобетонных конструкций, концентрация напряжений в трубобетонных узлах, усталостная прочность трубобетонных конструкций.

Муцанов Владимир Филиппович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», академик Академии строительства Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Krysko Alexandra – master of engineering science; assistant of Specialized Information Technologies and Systems Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: geometrical and computer design of on-the-road constructions of the thin-walled shells of engineering building taking into account the defects of geometrical form.

Konopatskiy Yevgeniy – PhD (Engineering), Associate Professor; Specialized Information Technologies and Systems Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: the definition of geometric manifolds using multiangle and multiradial parametrizations by generalized trigonometric functions in a dot calculation by Balyuba-Naydysh; development tools multidimensional geometry in a dot calculation by Balyuba-Naydysh for geometric modeling multiparametric processes and phenomena's.

Myronov Andrey – PhD (Engineering), Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: steel and reinforced concrete structures (concrete tube structures); stress and strain state of the frame joints of the concrete chimney structures, stress concentration in concrete chimney joints, fatigue strength concrete chimney structures.

Mushchanov Volodymyr – DSc (Engineering), Professor, Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures», the academician of the Civil Engineering Academy in Ukraine. Scientific interests: the reliability theory, analyze, designing and engineering diagnostics of spatial metallic structures.