

Research Article

Received: April 21, 2022

Accepted: April 27, 2022

Published: April 28, 2022

ISSN 2304-6295

Modeling of the Stress-Strain State of Steel Tank with Geometric Imperfections

Konopatskiy, Evgeniy Viktorovich^{1*} 
Shevchuk, Oksana Aleksandrovna¹ 
Krysko, Aleksandra Anatolievna¹ 

¹ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Donetsk People's Republic; e.v.konopatskiy@mail.ru (K.E.V.); o.a.shevchuk@donnasa.ru (S.O.A.); a.a.krysko@donnasa.ru (K.A.A.)

Correspondence:* email e.v.konopatskiy@mail.ru contact phone [+380713228686](tel:+380713228686)

Keywords:

Computer modeling; Geometric interpolant; Superelement; Stress-strain state; Steel cylindrical tank; Geometric imperfections

Abstract:

The object of research is steel vertical cylindrical tanks for the storage of petroleum products with imperfect geometric shapes. The purpose of this work is to develop and test a new method of numerical solution of differential equations on the example of computer modeling of the stress-strain state of the tank from the hydrostatic load; taking into account geometric and structural nonlinearity. **The method** of numerical solution of the differential equations is based on the geometrical theory of multidimensional interpolation implemented in the point calculus. Computer methods of calculation and visualization of modeling results were performed with the help of the computer algebra system Maple. To compare the modeling results; a reference solution was obtained in the software package of finite element analysis SCAD. The calculations were carried out following the strength theory of octahedral tangential stresses or specific energy of deformation (Huber-Hencki-Mieser energy theory). **Results.** The differential stress modeling equation for an elastic cylindrical shell under axisymmetric loading has been improved for the numerical analysis of the stress-strain state of a cylindrical tank with geometric imperfections. A new method of numerical solution of differential equations using geometrical interpolants has shown a high level of accuracy and higher speed as compared to the existing methods. A numerical solution of the stress-strain state of the tank wall with geometric imperfections in the form of a 6th-degree polynomial was obtained. A new engineering methodology for the examination of the technical condition of operating tanks for the storage of petroleum products with geometric imperfections has been proposed.

1 Introduction / Введение

В инженерной практике широкое распространение получили стальные тонкостенные оболочки вращения; которые включают: газгольдеры для хранения и распределения газов; бункеры и силосы для хранения и перегрузки сыпучих материалов; трубопроводы больших диаметров; дымовые и вентиляционные трубы; водонапорные башни; градирни; специальные конструкции металлургической; химической и других отраслей промышленности; различные баки и контейнеры для транспортировки жидких и газообразных веществ; в том числе и вагоны-цистерны. К таким сооружениям относятся и стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефтепродуктов. Имеющиеся случаи разрушения приведенных выше инженерных сооружений привели к необходимости периодического мониторинга их технического состояния в течение всего периода эксплуатации.

Основным конструктивным элементом вертикального цилиндрического резервуара для хранения нефтепродуктов является цилиндрическая стенка. Она представляет собой



тонкостенную оболочку; на которую воздействуют объективные и субъективные факторы; изменяя её первоначальную геометрическую форму. К объективным факторам можно отнести целый комплекс нагрузок: собственный вес конструкций; гидростатическое давление жидкости в резервуаре; вакуум; ветровая и снеговая нагрузки. К субъективным факторам относятся погрешности; связанные с изготовлением; транспортировкой и монтажом стенки резервуара; а также нарушение условий его эксплуатации.

Среди методов диагностики технического состояния цилиндрических резервуаров с учётом несовершенств геометрической формы наибольшее распространение получили методы на основе моделирования как общих; так и местных несовершенств геометрической формы [1-5]. В работах [6; 7] предложена методика; в соответствии с которой выполняется интерполяция поверхности резервуара с помощью замкнутых и незамкнутых обводов первого порядка гладкости с последующим расчётом напряженно-деформированного состояния в системе конечно-элементного анализа. Такой подход обладает рядом преимуществ и открывает новые возможности для анализа технического состояния тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом геометрической и конструктивной нелинейности; а также для прогнозирования влияния развития несовершенств геометрической формы на прочность и устойчивость исследуемой оболочки. Однако; предложенная в работах [6; 7] методика содержит ряд особенностей. Во-первых; расчёт напряженно-деформированного состояния резервуара для хранения нефтепродуктов; содержащий 65854 конечных элементов в виде прямоугольных пластин; в нелинейной постановке (с учётом геометрической и конструктивной нелинейности) занял более 25 часов на компьютере под управлением процессора Intel Core i5-2400 (4-ядерный процессор с максимальной тактовой частотой 3,40 GHz); что для выполнения инженерных изысканий достаточно долго. Во-вторых; это сложности учёта конструктивной нелинейности; приводящей к необходимости реализации особой схемы поэтапного нагружения; предложенной в работе [7].

Всё это приводит к необходимости усовершенствования существующих методик оценки технического состояния эксплуатируемых стальных тонкостенных оболочек инженерных сооружений; в том числе и резервуаров для хранения нефтепродуктов; для разработки эффективных мер по увеличению срока их безопасной эксплуатации; которые основаны на численном моделировании напряженно-деформированного состояния.

Объектом исследования являются эксплуатируемые стальные вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической формы.

Целью данной работы является разработка и апробация нового метода численного решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов на примере компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния резервуара с геометрическими несовершенствами от действия гидростатической нагрузки с учётом геометрической и конструктивной нелинейности.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Усовершенствовать дифференциальное уравнение моделирования напряжений для упругой цилиндрической оболочки при осесимметричном нагружении для численного анализа напряженно-деформированного состояния стального цилиндрического резервуара с несовершенствами геометрической формы.

2. Разработать и апробировать новый метод численного решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов для компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния резервуара с несовершенствами геометрической формы от действия гидростатической нагрузки с учётом геометрической и конструктивной нелинейности.

3. Предложить новую инженерную методику обследования технического состояния резервуара для хранения нефтепродуктов с несовершенствами геометрической формы на основе численного решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов.

2 Materials and Methods / Материалы и методы

2.1 Differential equation of equilibrium of a cylindrical tank element with geometric imperfections / Дифференциальное уравнение равновесия элемента цилиндрического резервуара с несовершенствами геометрической формы

В отечественной литературе широкое распространение получила модель определения напряжённо-деформированного состояния упругой цилиндрической оболочки при осесимметричном нагружении [8; 9]. При этом получается дифференциальное уравнение; которое имеет точное математическое решение с учётом граничных условий [9]:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Ehw}{r^2(1-\alpha\mu)} = p, \quad (1)$$

где w – искомые перемещения от действия гидростатической нагрузки;

x – координата стенки по высоте; отсчитывая от уторного шва резервуара;

r – радиус цилиндрического резервуара;

h – толщина стенки цилиндрического резервуара;

p – равномерно распределённая нагрузка;

$E = 2,1 \cdot 10^{11}$ – модуль Юнга для стали;

$\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

α – параметр; который в соответствии с [8] при одноосном напряжённом состоянии принимается равным 0 (гидростатическое давление в открытом цилиндрическом сосуде); а при внутреннем газовом давлении в замкнутом цилиндрическом сосуде принимается равным 0,5.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \text{ – цилиндрическая жесткость.}$$

Вместе с тем; наличие даже незначительных несовершенств геометрической формы; которые выражаются в виде отклонений стенки резервуара от вертикали; приводит к тому; что нагружение оболочки становится не осесимметричным. К тому же наличие геометрической нелинейности приводит в данном случае к необходимости учитывать ещё и конструктивную нелинейность; возникающую в процессе заполнения резервуара жидкостью [6]. Поэтому возникает необходимость уточнения исходного дифференциального уравнения с учётом начальных отклонений поверхности цилиндрической оболочки от вертикали.

В соответствии со схемой (Рис. 1) получено дифференциальное уравнение равновесия элемента цилиндрического резервуара с неизвестной функцией перемещений $w = w(x)$:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{kEh(w+\delta)}{r^2 \left(1 - \frac{\alpha\mu}{2}\right)} = p, \quad (2)$$

где $\delta = \delta(x)$ – функция исходных отклонений цилиндрического резервуара от вертикали;

k – поправочный коэффициент; учитывающий при расчёте геометрическую и конструктивную нелинейность [6]; а также напряжения; возникающие в верхнем поясе оболочки за счёт её взаимодействия с крышей резервуара.

Определим равномерно распределённую гидростатическую нагрузку p линейным соотношением: $p = -\gamma g(d-x)$; где γ – плотность хранимой жидкости; g – ускорение свободного падения (принимается $9,81 \text{ м/с}^2$); d – высота уровня жидкости в резервуаре.

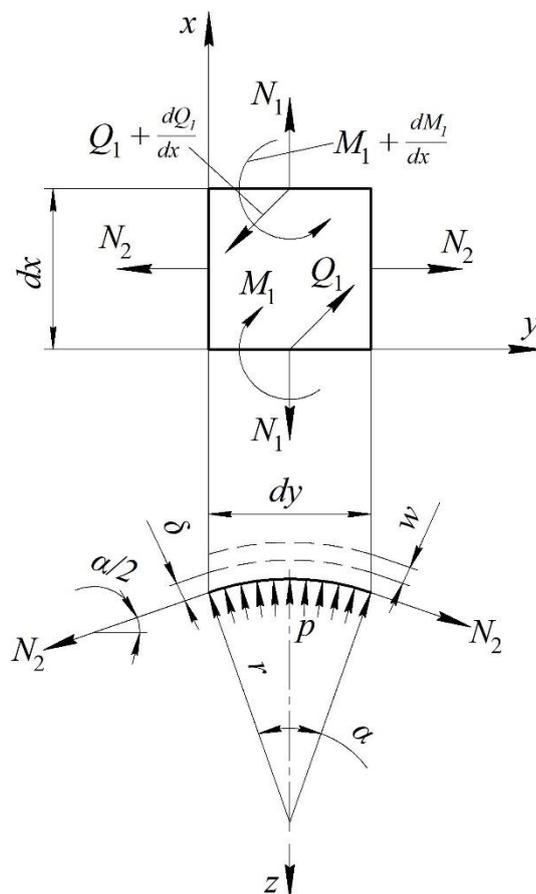


Рис. 1 – Схема для составления дифференциального уравнения равновесия элемента цилиндрического резервуара с несовершенствами геометрической формы
Fig. 1 – Scheme for the differential equilibrium equation of the element of a cylindrical tank with geometric imperfections

Итоговое дифференциальное уравнение принимает следующий вид:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{kEh(w + \delta)}{r^2 \left(1 - \frac{\alpha\mu}{2}\right)} = \gamma g (x - d). \tag{3}$$

Учитывая; что исходные отклонения δ и искомые перемещения w являются функциями от переменной x ; предложенное в работе [9] математически точное решение даёт значительные погрешности (Рис. 2); что приводит к необходимости его решения численным методом.

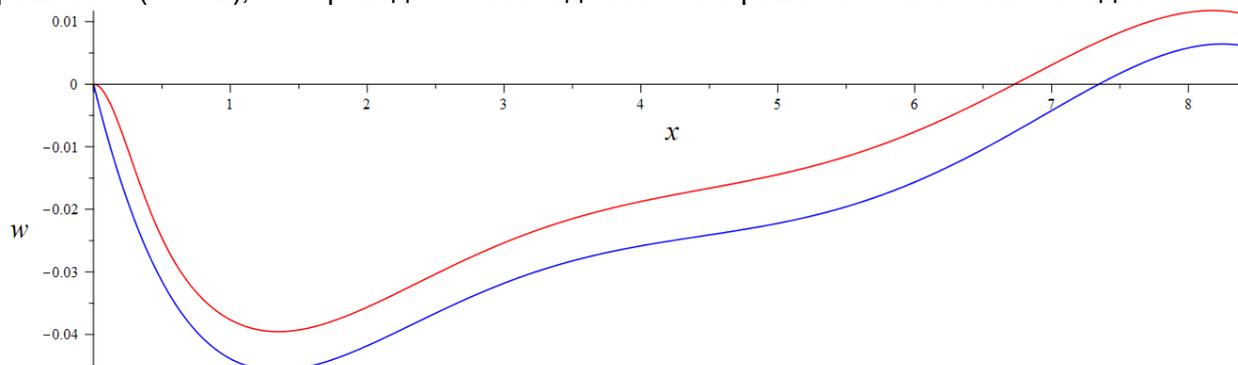


Рис. 2 – Сравнение результатов решения дифференциального уравнения (3): синяя линия – эталонное решение; красная линия – математически точное решение; предложенное в [9]
Fig. 2 – Comparison of the results of the solution of the differential equation (3): the blue line is the reference solution; the red line is the mathematically exact solution proposed in [9]



Эталонное решение было получено путём аппроксимации значений перемещений от действия гидростатической нагрузки с учётом геометрической и конструктивной нелинейности [6] при моделировании напряжённо-деформированного состояния в программном пакете конечно-элементного анализа SCAD. Расчёты были проведены в соответствии с прочностной теорией октаэдрических касательных напряжений или удельной энергии формоизменения (энергетическая теория Губера-Хенки-Мизера).

2.2 Description of a method for numerical solution of a differential equation using a single-parameter geometric interpolant / Описание метода численного решения дифференциального уравнения с помощью однопараметрического геометрического интерполянта

Метод численного решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов был рассмотрен в работах [10]. Его можно отнести к категории методов суперэлементов [11-15]; применяемых для решения широкого круга инженерных и прикладных задач. Особенностью предложенного в работах [10] метода является то; что в качестве аппроксимирующей функции используется геометрический интерполянт – геометрический объект; проходящий через наперёд заданные точки – узлы интерполяции. Таким образом; многомерный геометрический интерполянт представляет собой суперэлемент; включающий информацию как о геометрических; так и о физических параметрах его состояния. Только в данном случае узлы интерполяции заранее неизвестны. Они вычисляются из условия соответствия исходному дифференциальному уравнению. Соответствие промежуточных точек исходному дифференциальному уравнению обеспечивается за счёт интерполяции. Соответственно; чем больше узлов интерполяции; тем ближе геометрический интерполянт к искомому численному решению дифференциального уравнения. Такой подход по аналогии с изогометрическим методом [16-20]; предложенным Томом Хьюзом; позволяет исключить необходимость согласования геометрической информации в процессе взаимодействия между CAD и FEA системами.

В данном случае решением дифференциального уравнения (3) является функция перемещений $w = w(x)$; которая представляет собой однопараметрическое множество – кривую линию. Определим функцию перемещений с помощью алгебраической кривой; проходящей через наперёд заданные точки; как однопараметрический геометрический интерполянт [10; 21]. Исходя из условий дифференцирования функции перемещений в уравнении (3) кривая должна быть не ниже 5 порядка.

В качестве проверки результатов моделирования каждая из эталонных кривых должна проходить через 7 точек. Следовательно; для их описания необходима кривая 6-го порядка. Исходя из вышеизложенного примем в качестве аппроксимирующей функции полином 6-й степени; который описывает алгебраическую кривую 6-го порядка. В соответствии с геометрической теорией многомерной интерполяции [21] такая кривая определяется следующим точечным уравнением [22; 23]:

$$M = M_1 p_1 + M_2 p_2 + M_3 p_3 + M_4 p_4 + M_5 p_5 + M_6 p_6 + M_7 p_7, \quad (4)$$

где M – текущая точка дуги алгебраической кривой 6-го порядка;

M_i – точки – узлы интерполяции;

$$p_1 = \bar{t}^6 - 8,7\bar{t}^5 t + 22,7\bar{t}^4 t^2 - 22,7\bar{t}^3 t^3 + 8,7\bar{t}^2 t^4 - \bar{t} t^5;$$

$$p_2 = 36\bar{t}^5 t - 133,2\bar{t}^4 t^2 + 151,2\bar{t}^3 t^3 - 61,2\bar{t}^2 t^4 + 7,2\bar{t} t^5;$$

$$p_3 = -45\bar{t}^5 t + 301,5\bar{t}^4 t^2 - 418,5\bar{t}^3 t^3 + 184,5\bar{t}^2 t^4 - 22,5\bar{t} t^5;$$

$$p_4 = 40\bar{t}^5 t - 308\bar{t}^4 t^2 + 600\bar{t}^3 t^3 - 308\bar{t}^2 t^4 + 40\bar{t} t^5;$$

$$p_5 = -22,5\bar{t}^5 t + 184,5\bar{t}^4 t^2 - 418,5\bar{t}^3 t^3 + 301,5\bar{t}^2 t^4 - 45\bar{t} t^5;$$

$$p_6 = 7,2\bar{t}^5 t - 61,2\bar{t}^4 t^2 + 151,2\bar{t}^3 t^3 - 133,2\bar{t}^2 t^4 + 36\bar{t} t^5;$$



$$p_7 = -\bar{t}^5 t + 8,7\bar{t}^4 t^2 - 22,7\bar{t}^3 t^3 + 22,7\bar{t}^2 t^4 - 8,7\bar{t} t^5 + t^6;$$

t – текущий параметр; который изменяется от 0 до 1;

$\bar{t} = 1 - t$ – дополнение параметра t до 1.

Далее необходимо перейти от точечного уравнения к системе параметрических уравнений посредством покоординатного расчёта:

$$\begin{cases} x = x_1 p_1 + x_2 p_2 + x_3 p_3 + x_4 p_4 + x_5 p_5 + x_6 p_6 + x_7 p_7 \\ w = w_1 p_1 + w_2 p_2 + w_3 p_3 + w_4 p_4 + w_5 p_5 + w_6 p_6 + w_7 p_7 \end{cases} \quad (5)$$

Учитывая особые свойства алгебраических кривых; проходящих через наперёд заданные точки; полученные на основе полиномов Бернштейна [21]; первое уравнение системы принимает линейную зависимость в случае равномерного распределения координат узлов интерполяции по оси Ox : $x = td$. Тогда для определения геометрического интерполянта в явном виде достаточно выполнить замену переменных во втором уравнении системы: $t = \frac{x}{d}$; где d – высота уровня жидкости в резервуаре.

Далее необходимо разбить кривую на 7 равных по оси Ox частей и поочередно подставить в исходное дифференциальное уравнение (3) полученные значения x_j ; где j изменяется от 0 до 7. Таким образом формируется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с 7-ю неизвестными w_j . Полученные в результате решения СЛАУ значения w_j необходимо подставить во второе уравнение системы (5); что в конечном итоге и является численным решением дифференциального уравнения (3) на интервале изменения переменной x от 0 до d .

Отдельным аспектом является использование граничных условий для уточнения численного решения дифференциального уравнения (3). Традиционно граничные условия используются для определения постоянных интегрирования [9]. В данном случае получается численное решение; которое соответствует в узловых точках интерполяции исходному дифференциальному уравнению; но это решение является общим и потому полученная кривая находится произвольно в плоскости. Чтобы удовлетворить граничное условие $w(0) = 0$; необходимо перенести полученную кривую линию в начало координат. Для этого нужно из полученного численного решения вычесть свободный член w_1 аппроксимирующей полиномиальной функции $w = w(x)$.

3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

3.1 Input data for computational experiments / Исходные данные для проведения вычислительных экспериментов

В качестве примера рассмотрим вертикальный цилиндрический стальной резервуар №1 для хранения бензина объемом 1000 м³ КСП «Бешенский» (Рис. 3).

Исходными данными для моделирования являются геометрические размеры эксплуатируемого резервуара (радиус резервуара $r = 6,165$ м; толщина оболочки $h = 0,005$ м); высота уровня жидкости в резервуаре ($d = 8,44$ м); физические свойства хранимой жидкости (обычно резервуары испытывают водой; поэтому принимаем плотность воды $\gamma = 1000$ кг/м³) и исходные отклонения стенки резервуара от вертикали δ (Таблица 1).

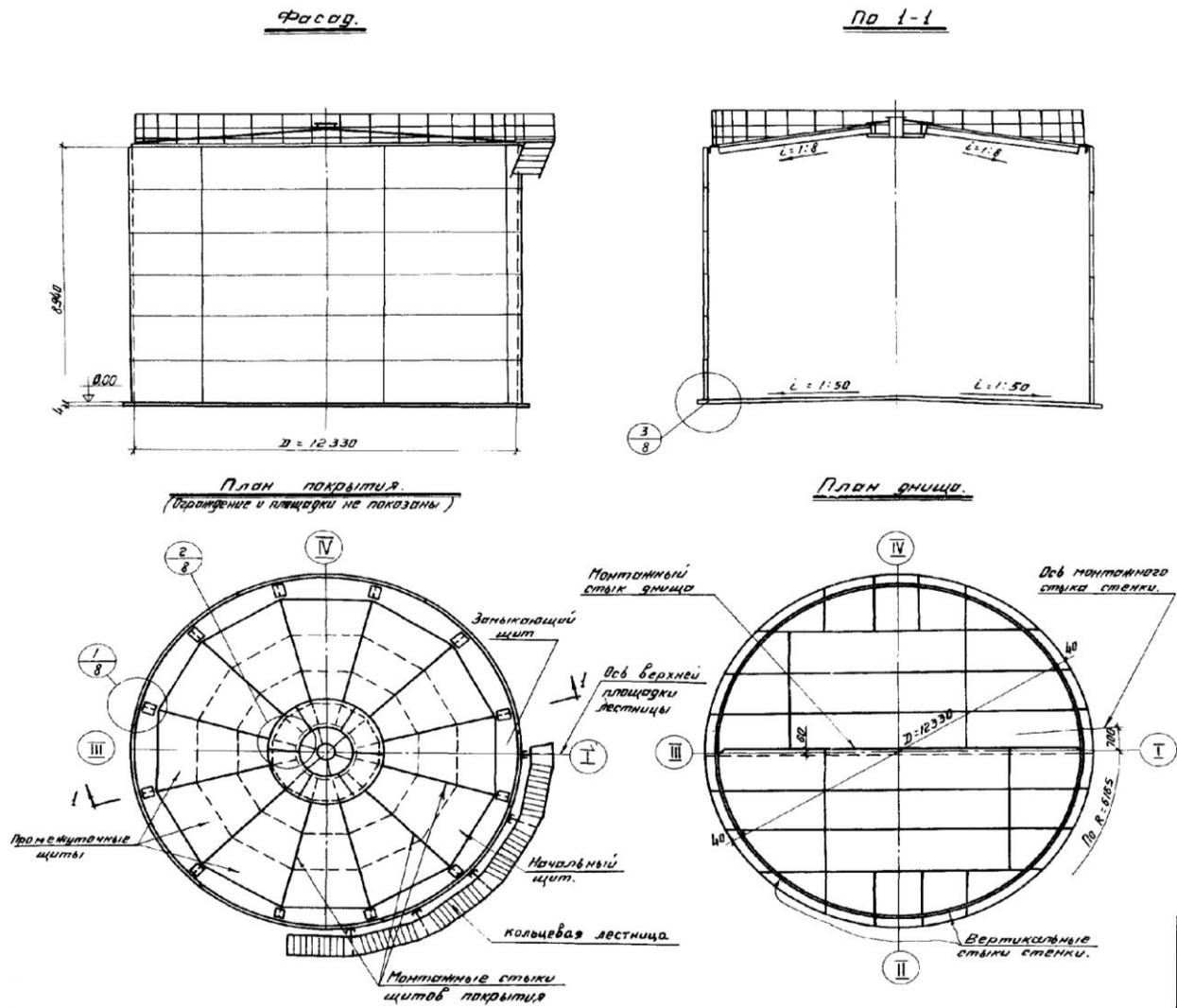


Рис. 3 – Общий вид резервуара объемом 1000 м³ по [24]
 Fig. 3 – General view of the tank volume of 1000 m³ according to [24]

Таблица 1. Исходные отклонения стенки резервуара от вертикали
 Table 1. Initial deviations of the tank wall from the vertical

Высота пояса; мм	Отклонения стенки от вертикали в опорных точках по окружности резервуара; мм											
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
8940	5;00	0;00	-5;00	-10;00	23;33	56;67	90;00	66;67	43;33	20;00	15;00	10;00
7450	7;00	-1;00	-9;00	-17;00	10;33	37;67	65;00	50;00	35;00	20;00	15;67	11;33
5960	-10;00	-13;33	-16;67	-20;00	10;67	41;33	72;00	61;33	50;67	40;00	23;33	6;67
4470	-20;00	-20;00	-20;00	-20;00	7;67	35;33	63;00	62;00	61;00	60;00	33;33	6;67
2980	-30;00	-23;33	-16;67	-10;00	18;67	47;33	76;00	80;67	85;33	90;00	50;00	10;00
1490	-45;00	-34;67	-24;33	-14;00	9;00	32;00	55;00	66;67	78;33	90;00	45;00	0;00
0	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00	0;00

Для определения функций исходных отклонений цилиндрического резервуара от вертикали в опорных точках по окружности резервуара $\delta_i = \delta_i(x)$; где $i = 0, 30, 60, \dots, 330$; воспользуемся инструментом аппроксимации Fit из пакета Statistics системы компьютерной алгебры Maple. Таким образом получено 12 уравнений; характеризующих функции исходных отклонений цилиндрического резервуара от вертикали в 12 опорных точках по окружности резервуара. В качестве примера приведём одно из уравнений (в точке 0°) с учётом округления полиномиальных коэффициентов:

$$\delta_0 = 4,188 \cdot 10^{-6} x^6 - 0,00017 x^5 + 0,0025 x^4 - 0,018 x^3 + 0,061 x^2 - 0,089 x. \quad (6)$$

Аналогичным образом были получены 12 уравнений характеризующих функции перемещений цилиндрического резервуара; которые были использованы в качестве эталонных кривых для проверки результатов моделирования. В качестве примера приведём эталонное уравнение в точке 0° с учётом округления полиномиальных коэффициентов:

$$\omega_0 = 3,71 \cdot 10^{-6} x^6 - 0,00016x^5 + 0,0024x^4 - 0,017x^3 + 0,06x^2 - 0,089x. \quad (7)$$

Также получено 12 уравнений характеризующих функции перемещений цилиндрического резервуара от вертикали в 12 опорных точках по окружности резервуара. Для сравнения приведём численное решение дифференциального уравнения (3) в точке 0° с учётом округления полиномиальных коэффициентов:

$$w_0 = 4,19 \cdot 10^{-6} x^6 - 0,00017x^5 + 0,0025x^4 - 0,018x^3 + 0,061x^2 - 0,09x. \quad (8)$$

3.2 Analysis of modeling results of the stress-strain state of the operating tank for petroleum products storage / Анализ результатов моделирования НДС эксплуатируемого резервуара для хранения нефтепродуктов

Как видно при сравнении уравнений (7) и (8); практически все полиномиальные коэффициенты попарно имеют очень близкие значения. Графическая визуализация результатов сравнения также показывает высокий уровень сходства алгебраических кривых (Рис. 3).

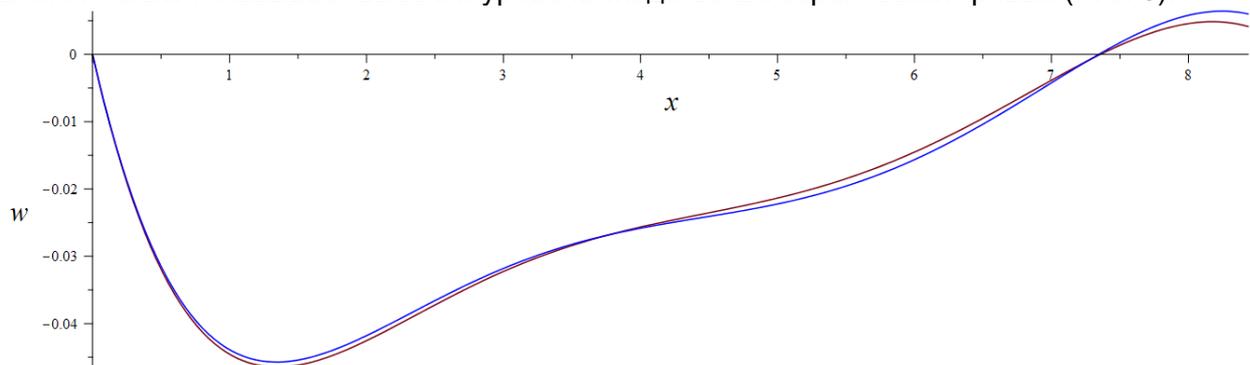


Рис. 3 – Сравнение результатов решения дифференциального уравнения (3): синяя линия – эталонное решение; коричневая линия – численное решение

Fig. 3 – Comparison of the results of solving differential equation (3): blue line is the reference solution; brown line is the numerical solution

Для численного определения степени родства эталонного и численного решений воспользуемся методом сравнения многомерных геометрических объектов с помощью коэффициента детерминации R^2 ; предложенным в работе [25]; для численного определения степени родства эталонного и численного решений. В результате при сравнении алгебраических кривых был достигнут коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$. Аналогичное сравнение было проведено для всех 12 опорных точек по окружности резервуара и получены высокие значения коэффициента детерминации; подтверждающие достоверность полученных результатов.

Отдельного внимания заслуживает поправочный коэффициент k ; учитывающий при расчёте геометрическую и конструктивную нелинейность [6]; а также напряжения; возникающие в верхнем поясе оболочки за счёт её взаимодействия с крышей резервуара. В процессе исследований были получены значения коэффициента k для всех 12 опорных точек по окружности резервуара. Изменение значений поправочного коэффициента k по окружности резервуара имеет характер близкий к симметричному; который позволяет установить зависимость между углом по окружности резервуара и коэффициентом k (Рис. 4).

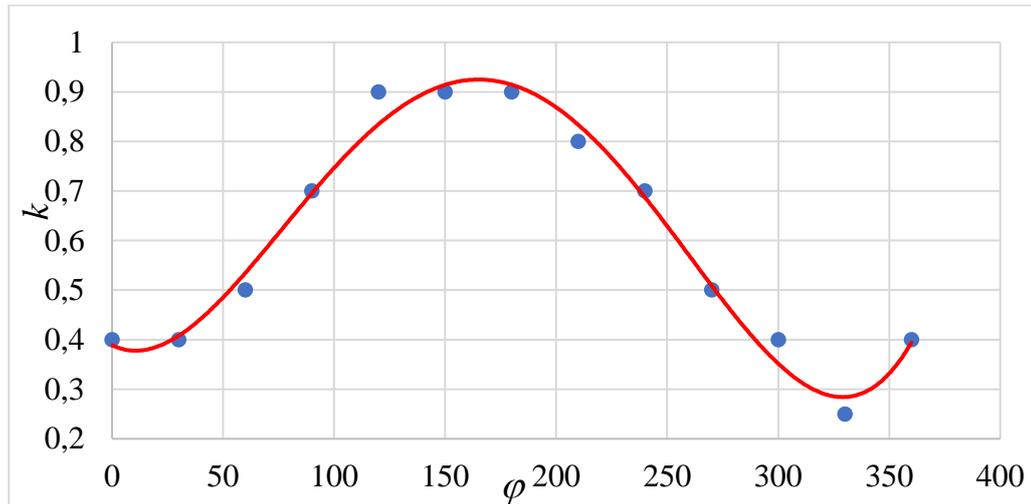


Рис. 4 – Зависимость поправочного коэффициента k от угла φ по окружности резервуара
Fig. 4 – Dependence of the correction factor k on the angle φ of the tank circumference

В результате построения линии тренда в программном пакете MS Excel было получено следующее уравнение с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,983$:

$$k = 9,215 \cdot 10^{-10} \varphi^4 - 6,203 \cdot 10^{-7} \varphi^3 + 0,0001 \varphi^2 - 0,0021 \varphi + 0,3888. \quad (9)$$

Уравнение (9) использовано для автоматизации процесса численного решения дифференциального уравнения (3) с учётом геометрической и конструктивной нелинейности.

3.3 Determination of displacements of the cylindrical tank wall with imperfections from the hydrostatic load using two-dimensional interpolation / Определение перемещений стенки цилиндрического резервуара с несовершенствами от действия гидростатической нагрузки с помощью двумерной интерполяции

В процессе обследования технического состояния стальных цилиндрических резервуаров важной задачей является определение мест максимальных перемещений и; соответственно; максимальных напряжений в стенке резервуара. Для решения этой задачи можно воспользоваться методами двумерной интерполяции с последующим определением экстремальных точек поверхности отклика. Учитывая искажения геометрической формы действительной поверхности цилиндрического резервуара удобно строить поверхность отклика представив резервуар в развёрнутом виде. По оси абсцисс будем откладывать не длину дуги; которая будет постоянно меняться из-за искажений цилиндрической поверхности; а угловой размер φ ; который определяет положение каждой точки на поверхности резервуара. По оси ординат будем откладывать высоту резервуара d и по оси аппликат – искомые перемещения стенки резервуара w . Поскольку резервуар с несовершенствами представляет замкнутую оболочку; последняя функция перемещений соответствует первой $w_0 = w_{360}$.

Учитывая большое количество направляющих линий чтобы избежать незапланированных осцилляций; выполнена их интерполяция с помощью одномерного незамкнутого обвода 1-го порядка гладкости; геометрические алгоритмы построения которых представлены в [7].

В результате получена поверхность отклика; характеризующая перемещения в стенке стального цилиндрического резервуара с несовершенствами геометрической формы (Рис. 5).

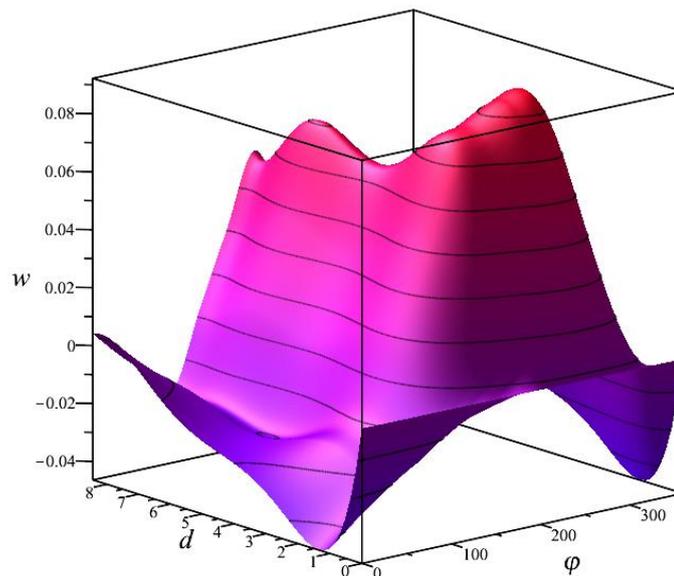


Рис. 5 – Визуализация поверхности отклика перемещений стенки резервуара с несовершенствами от действия гидростатической нагрузки
Fig. 5 – Visualization of the response surface of the tank wall displacements with imperfections from the hydrostatic load

Как видно из Рис. 5; максимальные перемещения возникают в нижней части резервуара на интервале от 150° до 300° по окружности резервуара. Методами математического анализа определены значения максимальных перемещений и точное их положение. Для этого решена система двух уравнений с частными производными. Таким образом; максимальные перемещения $92;2$ мм возникают на высоте $2;298$ м и $258;6^{\circ}$ по окружности резервуара.

Также можно определить максимальные перемещения стенки резервуара от действия гидростатической нагрузки для каждого пояса по его высоте. Для этого достаточно рассечь полученную поверхность отклика вертикальными плоскостями параллельными оси φ . Аналитически это определяется путём поэтапной фиксации значений высоты каждого пояса резервуара с определением максимальных перемещений на каждом этапе.

3.4 Methodology of inspection of the technical condition of the tank for storage of petroleum products; taking into account the imperfections of the geometric form / Методика обследования технического состояния резервуара для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической формы

В результате проведенных исследований предложена новая инженерная методика обследования технического состояния резервуара для хранения нефтепродуктов с учётом несовершенств геометрической формы от действия гидростатической нагрузки.

1. Техническое задание на обследование резервуара.

Работы по проведению технического диагностирования резервуаров проводятся согласно ряду нормативов на эксплуатацию и ремонт резервуаров; основными из которых являются:

- РД 08-95-95 «Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [26];
- «Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту» [27];
- РД 39-0147103-385-87 «Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных нефтепроводов» [28];
- СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» (СНиП 3.03.01-87. Актуализированная редакция - регламентирует требования к новым резервуарам) [29];
- СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» (СНиП II-23-81. Актуализированная редакция - регламентирует требования к проектированию резервуаров) [30].



Согласно [26] для резервуаров; находящихся в эксплуатации в пределах расчетного срока службы; проводится:

- частичное наружное техническое диагностирование не реже 1 раза в 5 лет;
- полное техническое диагностирование не реже 1 раза в 10 лет.

Для резервуара; отработавшего расчетный срок службы; проводится:

- частичное наружное техническое диагностирование не реже 1 раза в 4 года;
- полное техническое диагностирование не реже 1 раза в 8 лет.

Частичное техническое диагностирование проводится с наружной стороны без выведения его из эксплуатации. Полное – проводится с обеих сторон и требует выведения резервуара из эксплуатации; опорожнения; зачистки и дегазации. В [26] разработана структура алгоритма оценки технического состояния резервуаров в различных случаях.

Организация проведения работ по техническому диагностированию возлагается на владельца резервуаров. Он обязан предоставить организации; выполняющей обследование; всю необходимую техническую и технологическую документацию; а также обеспечить свободный доступ ко всем конструктивным элементам резервуара.

Диагностирование и заключение о техническом состоянии и о возможности дальнейшей эксплуатации резервуаров производятся специализированной организацией; имеющей разрешение (лицензию) на проведение таких работ; получаемое в органах Госгортехнадзора России в установленном порядке. Специалисты по техническому диагностированию резервуаров должны быть аттестованы по этому виду работ организацией; имеющей лицензию Госгортехнадзора России. Организация должна располагать необходимыми аппаратурой и средствами; применяемыми при техническом диагностировании резервуаров. Не допускается применение аппаратуры; подлежащей госповерке и не прошедшей ее.

При измерении геометрических параметров конструкций; определении толщин листовых конструкций и глубины коррозионных язв должны использоваться стандартные или специальные методы и средства измерения; позволяющие получить точность не менее +/- 1 мм.

Организация; выполняющая техническое диагностирование; должна фиксировать результаты работы в соответствующей документации (акты; протоколы; журналы; заключения и т.п.).

Для проведения обследования наружные и внутренние поверхности элементов резервуара; подлежащие техническому диагностированию; должны быть очищены от загрязнений. Качество подготовки поверхностей определяется требованиями применяемого метода контроля. При проведении полного технического диагностирования теплоизоляция; препятствующая контролю технического состояния; должна быть частично или полностью (в случае необходимости) удалена.

2. Определение действительной поверхности стенки резервуара с учётом несовершенств геометрической формы.

Определение действительной поверхности стенки эксплуатируемого резервуара осуществляется путём измерения отклонений стенки от вертикали; как традиционными; так и инновационными техническими средствами и инструментами [7]. Например; проведение измерений с помощью наземного лазерного сканера позволяет:

- свести к минимуму нахождение исполнителя внутри резервуара; а иногда и исключить вовсе; опустив сканер с помощью специальных приспособлений в резервуар через верхнюю смотровую горловину;

- обеспечить несопоставимо с традиционными методами высокую скорость и точность измерений; а также детализацию конечного результата;

- учитывать точное расположение и геометрические параметры внутренних элементов резервуара (ребер жесткости; лестниц; переборок; труб и паропроводов);

- исключить человеческий фактор и субъективный подход к выбору точки замеров.

С другой стороны; использование наземного лазерного сканера приводит к необходимости использования трудоёмких алгоритмов обработки гиперколичественного множества точек.

В целях определения мест наибольших деформаций и выявления напряженно-деформированного состояния стенки под нагрузкой измерения целесообразно проводить дважды: на заполненном и пустом резервуаре в целях определения мест наибольших деформаций и выявления напряженно-деформированного состояния стенки под нагрузкой. При этом необходимо обращать особое внимание на местные выпучины и вмятины и проводить в этих местах дополнительные измерения. При проведении измерений в заполненном резервуаре для дальнейшей верификации модели действительной поверхности резервуара необходимо



зафиксировать разницу отклонений стенки резервуара от образующих при пустом и заполненном резервуаре.

3. Анализ исходных данных и построение действительной поверхности цилиндрического резервуара с несовершенствами.

В зависимости от способа получения исходных данных; к которым относится массив значений отклонений стенки резервуара от вертикали возможные различные вариации. Если количество исходных данных является достаточным для обеспечения требуемой точности решения; то можно переходить к следующему пункту методики. Вместе с тем; возможна ситуация; при которой количество исходных отклонений по окружности резервуара является недостаточным для проведения качественного анализа напряженно-деформированного состояния резервуара. В этом случае необходимо выполнить предварительную интерполяцию поверхности резервуара с последующим определением промежуточных значений исходных отклонений по высоте и окружности резервуара. Эта задача успешно решена с помощью двумерных обводов первого порядка гладкости в работе [7]. В случае использования инновационных технологий для измерения отклонений стенки резервуара от вертикали результатом дополнительной обработки может служить уже интерполированная поверхность резервуара; которую также можно использовать для формирования исходного в дальнейшем расчёте массива отклонений.

4. Составление и решение массива дифференциальных уравнений.

Вся поверхность резервуара разбивается на n частей по окружности основания резервуара; формируя тем самым n сечений параллельных вертикальной оси резервуара. Для каждого сечения формируется линия исходных отклонений стенки резервуара от вертикали $\delta_j = \delta_j(x)$; где j изменяется от 1 до n . Далее составляется массив дифференциальных уравнений; аналогичных уравнению (3):

$$D \frac{d^4 w_j}{dx^4} + \frac{k_j E h (w_j + \delta_j)}{r^2 \left(1 - \frac{\alpha \mu}{2}\right)} = \gamma g (x - d). \quad (10)$$

Поправочный коэффициент k_j вычисляется с помощью соотношения (9).

Решив поочередно массив дифференциальных уравнений численным методом с помощью однопараметрических геометрических интерполянтов; которые описываются полиномами 6-го порядка; получим массив перемещений $w_j = w_j(x)$.

5. Построение поверхности отклика и определение её экстремумов.

Дальнейший этап методики численного исследования технического состояния цилиндрического резервуара с несовершенствами предусматривает интерполяцию полученного массива перемещений с помощью одномерных обводов первого порядка гладкости для построения составной поверхности отклика и определения её экстремумов; как описано выше.

6. Разработка технических рекомендаций о возможности дальнейшей эксплуатации резервуара.

Последний этап предусматривает анализ и оценку результатов численных исследований; а также рекомендации о возможности дальнейшей эксплуатации резервуара или необходимости усовершенствования его конструкции. Также существует возможность прогнозирования поведения напряженно-деформированного состояния резервуара в случае использования рекомендаций по усилению резервуара.

4 Conclusions / Выводы

В качестве общих выводов и результатов выполненного исследования является следующее:

1. Усовершенствовано дифференциальное уравнение моделирования напряжений для упругой цилиндрической оболочки при осесимметричном нагружении для численного анализа напряженно-деформированного состояния стального цилиндрического резервуара с несовершенствами геометрической формы.

2. Разработан и апробирован новый метод численного решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов для компьютерного моделирования



напряженно-деформированного состояния резервуара с несовершенствами геометрической формы от действия гидростатической нагрузки с учётом геометрической и конструктивной нелинейности. Он обладает необходимой точностью и высоким быстродействием; что позволяет эффективно его использовать для численного исследования тонкостенных оболочек инженерных сооружений с учётом несовершенств геометрической формы или без них.

3. Предложена новая инженерная методика обследования технического состояния резервуара для хранения нефтепродуктов с несовершенствами геометрической формы на основе численного решения дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов. При этом в качестве функции отклика используются перемещения стенки резервуара от действия гидростатической нагрузки. В случае необходимости можно перейти от перемещений к напряжениям. Для этого в соответствии с [31] достаточно полученные перемещения умножить на частное от деления модуля Юнга на радиус резервуара. Но поскольку вследствие несовершенств геометрической формы радиус меняется по высоте резервуара; при переходе от перемещений к напряжениям необходимо учитывать функции исходных отклонений $\delta_j = \delta_j(x)$. Таким образом; модуль Юнга необходимо делить на $r + \delta_j$.

References

1. Aleshina; O.O.; Ivanov; V.N.; Cajamarca-Zuniga; D. Stress state analysis of an equal slope shell under uniformly distributed tangential load by different methods. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021. Vol. 17. No 1. Pp. 51-62. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-1-51-62.
2. Yegorov; E.A.; Ismagulov; B.G.; Fedoryaka; J.V. Problems of Stability of Steel Vertical Cylindrical Tanks in the Tasks of Technical Diagnostics. *Bulletin of the Pridneprovskaya State Academy of construction and architecture*. 2010. No. 11(152). Pp. 19-28.
3. Maraveas; C.; Balokas; G.A.; Tsavdaridis; K.D. Numerical evaluation on shell buckling of empty thin-walled steel tanks under wind load according to current american and european design codes. *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 95. Pp. 152-160. DOI: 10.1016/j.tws.2015.07.007.
4. Šapalas; A.; Šaučiuvėnas; G.; Rasiulis; K.; Griškevičius; M.; Gečys; T. Behaviour of vertical cylindrical tank with local wall imperfections. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2019. Vol. 25(3). Pp. 287-296. DOI:10.3846/jcem.2019.9629.
5. Gorban; N.N.; Vasiliev; G.G.; Salnikov; A.P. Accounting actual geometric shape of the tank shell when evaluating its fatigue life. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*. 2018. No. 8. Pp. 75-79. DOI:10.24887/0028-2448-2018-8-75-79.
6. Krysko; A.A.; Konopatskiy; Ye.V.; Myronov; A.N.; Mushchanov; V.P. Technique of numerical analysis of the intense deformed state of steel vertical cylindrical tanks with taking into account the defects of geometrical form. *Metal structures*. 2016. Vol. 22. No. 1. Pp. 45-57.
7. Krysko; A.A. Geometric and computer modeling of operating structures of thin-walled shells of engineering structures taking into account geometric form imperfections. *Makeyevka*. 2016. 191 p.
8. Lessig; E.N. Lileev; A.F.; Sokolov; A.G. *Sheet metal structures*. Moscow: Stroyizdat. 1970. 488 p.
9. Timoshenko; S.P.; Voinovsky-Krieger; S. *Plates and shells*. Moscow: Nauka. 1966. 636 p.
10. Konopatskiy; E.V.; Voronova; O.S.; Shevchuk; O.A.; Bezdityni; A.A. About one method of numeral decision of differential equalizations in partials using geometric interpolants. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2763. Pp. 213-219. DOI: 10.30987/conferencearticle_5fce27708eb353.92843700.
11. Postnov; V.A.; Dmitriev; S.A.; Eltyshv; B.K.; Radionov; A.A. *Method of superelements in calculations of engineering structures*. Leningrad: Shipbuilding. 1979. 288 p.
12. Belostotsky; A.M.; Potapenko; A.L.; Akimov; P.A. Universal Software System "STADYO" for the Numerical Solution of Linear and Nonlinear Problems of the Field Theory; Statics; Stability and Dynamics of Spatial Combined Systems: General Parameters and Super elemental Features. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol. 14. No. 3. Pp. 26-41.
13. Shamloofard; M.; Hosseinzadeh; A.; Movahhedy; M.R. Development of a shell super element for large deformation and free vibration analysis of composite spherical shells. *Engineering with Computers*. 2021. Vol. 37. No. 4. Pp. 3551-3567. DOI: 10.1007/s00366-020-01015-w.



14. Hughes; P.J.; Kuether; R.J. Nonlinear interface reduction for time-domain analysis of Hurty/Craig-bampton superelements with frictional contact. *Journal of Sound and Vibration*. 2021. Vol. 507. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116154.
15. Nielsen; M.B.; Sahin; E. A simple procedure for embedding seismic loads in foundation superelements for combined wind; wave and seismic analysis of offshore wind turbine structures. Paper presented at the COMPDYN Proceedings. 2019. Vol. 3. Pp. 4628-4640. DOI: 10.7712/120119.7255.19324.
16. Nguyen-Thanh; N.; Zhou; K.; Zhuang; X.; Areias; P.; Nguyen-Xuan; H.; Bazilevs; Y.; Rabczuk; T. Isogeometric analysis of large-deformation thin shells using RHT-splines for multiple-patch coupling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 316. Pp. 1157-1178. DOI: 10.1016/j.cma.2016.12.002.
17. Vu-Bac; N.; Duong; T.X.; Lahmer; T.; Zhuang; X.; Sauer; R.A.; Park; H.S.; Rabczuk; T. A NURBS-based inverse analysis for reconstruction of nonlinear deformations of thin shell structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018. Vol. 331. Pp. 427-455. DOI: 10.1016/j.cma.2017.09.034.
18. Leonetti; L.; Liguori; F.; Magisano; D.; Garcea; G. An efficient isogeometric solid-shell formulation for geometrically nonlinear analysis of elastic shells. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018. Vol. 331. Pp. 159-183. DOI: 10.1016/j.cma.2017.11.025.
19. Li; W.; Nguyen-Thanh; N.; Zhou; K. Geometrically nonlinear analysis of thin-shell structures based on an isogeometric-meshfree coupling approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018. Vol. 336. Pp. 111-134. DOI: 10.1016/j.cma.2018.02.018.
20. Tornabene; F.; Fantuzzi; N.; Bacciocchi; M. A new doubly-curved shell element for the free vibrations of arbitrarily shaped laminated structures based on weak formulation IsoGeometric analysis. *Composite Structures*. 2017. Vol. 171. Pp. 429-461. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.055.
21. Konopatskiy; E.V. Geometric theory of multidimensional interpolation. *Automation and modeling in design and management*. 2020. No. 1(7). Pp. 9-16. DOI: 10.30987/2658-6436-2020-1-9-16.
22. Balyuba; I.G. *Constructive Geometry of Varieties in the Point Calculus*. Makeyevka: MECI. 1995. 227 p.
23. Balyuba; I.G.; Naidysh; V.M. *Point calculus*. Melitopol: B. Khmel'nitsky MSPU. 2015. 234 p.
24. TP 704-1-54 "Steel vertical cylindrical tank for oil and petroleum products with a capacity of 1000 m³" (<https://meganorm.ru/Data2/1/4293782/4293782405.pdf>).
25. Seleznev I.V.; Konopatskiy E.V.; Voronova O.S.; Shevchuk O.A.; Bezditnyi A.A. An approach to comparing multidimensional geometric objects. *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2021) Nizhny Novgorod; Russia; September 27-30; 2021*. Vol. 3027. Pp. 682-688. DOI: 10.20948/graphicon-2021-3027-682-688.
26. RD 05-95-95 "Regulations on the system of technical diagnostics of welded vertical cylindrical tanks for petroleum and petroleum products" (<https://docs.cntd.ru/document/1200003534>).
27. "Rules of technical operation of tanks and instructions for their repair" (<https://docs.cntd.ru/document/1200007303>).
28. SP 343.1325800.2017 "Buildings of industrial enterprises" (<https://docs.cntd.ru/document/557662476>).
29. SP 70.13330.2012 "Bearing and enclosing structures" (<https://docs.cntd.ru/document/1200097510>).
30. SP 16.13330.2017 "Steel structures" (<https://docs.cntd.ru/document/456069588>).
31. Chepur; P.V. *Stress-strain state of a reservoir during the development of non-uniform settlements of its base*. Moscow. 2015. 181 p.