

**М. Х. Сабитов****МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ С НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ ФОРМЫ КОРПУСА**

*Ключевые слова:* резервуар для нефти и нефтепродуктов, несовершенство формы, интерполяционный алгоритм, устойчивость формы, метод конечных элементов.

Вертикальные цилиндрические резервуары для нефти и нефтепродуктов являются типовым оборудованием предприятий по добыче, транспортировке, переработке нефти, также широко применяются на предприятиях химической промышленности для хранения больших объемов жидких продуктов. От эксплуатационной надежности резервуаров зависит безопасность производств и выполнение высоких производственных показателей. Обеспечение надежности резервуаров требует строгого выполнения требований нормативных документов, регламентирующих деятельность персонала на всех стадиях жизненного цикла резервуаров. При этом специалистам самих предприятий и сторонних организаций приходится решать задачи, выходящие за рамки нормативных документов. Одной из таких задач является необходимость оценки работоспособности резервуара при наличии геометрических отклонений корпуса от проектной формы. В статье предлагается практический способ моделирования корпуса, учитывающий изменение проектной формы корпуса вследствие нарушения технологии монтажа и осадки основания резервуара в ходе эксплуатации. Исходные данные для моделирования принимаются из анализа результатов инструментального обследования корпуса резервуара, проведенного специалистами экспертной организации в целях диагностики технического состояния и определения остаточного ресурса резервуара. Результаты инструментального обследования представлены в виде таблиц отклонений точек отдельных контрольных образующих корпуса от вертикали и горизонтальных отклонений наружного контура днища в нижних точках контрольных образующих. Для моделирования замкнутых линий поверхности корпуса резервуара используется алгоритм, основанный на сочетании интерполяционных многочленов Лагранжа и Фурье. Разработка интерполяционного алгоритма осуществляется с целью моделирования процесса волнообразования замкнутой поверхности корпуса резервуара в задачах оценки устойчивости формы корпуса. Рассмотрены примеры оценки устойчивости корпуса резервуаров РВС-400 и РВС-3000.

**M. Kh. Sabitov****MODELING OF VERTICAL CYLINDRICAL PETROLIUM TANKS WITH BODY FORM IMPERFECTIONS**

*Keywords:* petroleum tank, form imperfection, interpolation algorithm, buckling, finite element method.

Vertical cylindrical petroleum tanks are typical equipment of enterprises for oil production, transportation, refining, also used in the chemical industry to store large volumes of liquid products. The operational reliability of tanks determines the safety of enterprises and ensuring high production performance. Ensuring tank reliability requires strict compliance with the requirements of regulatory documents governing the operations performed by personnel at all stages of the tank life cycle. At the same time, engineers of enterprises and engineers of third-party organizations have to solve tasks that go beyond the normative documents. One of these tasks is the need to assess the performance of a tank with geometric deviations of the body from the design shape. The paper proposes a practical method of modeling the tank body, which takes into account the change in the design shape of the body due to the violation of rigging-up technology and subsidence of the tank base during operation. Initial data for modeling are taken from the analysis of the results of instrumental inspection of the tank body, conducted by engineers of the expert organization for the purpose of diagnostics of the technical condition and determination of the residual life of the tank. The results of the instrumental survey are presented in the form of tables, which contain deviations of the points of the control vertical lines of the body from the vertical and horizontal deviations of the external contour of the tank bottom at the lower points of the control vertical lines. An algorithm based on a combination of Lagrange and Fourier interpolation polynomials is used to model the closed lines of the tank shell surface. An interpolation algorithm is developed to model the wave formation process of the closed surface of the tank shell in the problems of evaluating the stability of the shell shape. Examples of stability assessment of the body of RVS-400 and RVS-3000 tanks are considered.

**Введение**

Вертикальные цилиндрические резервуары для нефти и нефтепродуктов относятся к ответственным производственным объектам с высоким уровнем потенциальной опасности. В настоящее время разработана и постоянно совершенствуется база нормативных документов, содержащих требования к конструктивному оформлению, изготовлению, монтажу, эксплуатации и ремонту резервуаров. Не смотря на наличие нормативных методик, специалистам, занятым эксплуатацией, ремонтом резервуарных парков на предприятиях, а также специалистам экспертных организаций,

выполняющим работы по диагностике технического состояния резервуаров, приходится сталкиваться с решением задач, вызванных отклонениями конструкции резервуара от проектной формы. Такие отклонения являются следствием погрешностей на этапах изготовления и монтажа резервуара, нарушения режимов эксплуатации и превышения допустимых нагрузок. Чаще всего изменение проектной формы вызвано неравномерной осадкой основания резервуара.

Оценка работоспособности резервуара при наличии геометрических отклонений и определение срока дальнейшей безопасной эксплуатации

проводится в ходе экспертизы промышленной безопасности после проведения диагностики технического состояния. Сроки проведения диагностики определены в рекомендациях Ростехнадзора [1]. Протоколы и акты измерений, оформляемые в ходе диагностики технического состояния, включаются в итоговое заключение по экспертизе промышленной безопасности. В ходе проведения экспертизы промышленной безопасности также исследуются заключения прежних экспертиз и техническая документация, оформляемая в ходе проведения ремонтов и испытаний резервуара.

Для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации резервуара с геометрическими отклонениями, в ходе экспертизы промышленной безопасности требуется проведение проверочных расчетов резервуара на прочность и устойчивость. Расчеты требуется проводить с использованием полученных в ходе диагностики значений остаточных толщин стенок и геометрических отклонений. Для проведения таких расчетов допускается использование сертифицированных программ трехмерного моделирования, использующих метод конечных элементов [1].

### Разработка модели

Решение задачи моделирования корпуса резервуара с геометрическими отклонениями рассмотрим на примере резервуара РВС-3000. Резервуар изготовлен в 1980 году по типовому проекту [2]. Внутренний диаметр корпуса 18.98 м, высота корпуса 11.92 м. Проектная толщина стенки нижнего пояса и листов наружного контура днища 7 мм, проектная толщина стенки остальных поясов стенки 6 мм. Используются результаты технической диагностики, проведенной в 2019 году.

На рис. 1 представлена геометрическая модель корпуса резервуара РВС-3000. Резервуар имеет восемь поясов, отмеченных римскими цифрами. На схеме также приведены номера образующих, в которых проводились измерения отклонений от вертикали и измерение осадки наружного контура днища.

По требованиям [1] измерения необходимо проводить в наиболее деформированных местах стенки, определяемых визуальным осмотром. Образующие, в которых проводятся измерения, располагаются по окружности резервуара с шагом не реже 6 м, образующие нумеруются по часовой стрелке начиная с патрубков для присоединения подающих и отводящих трубопроводов. Измерения отклонений от вертикали проводятся в контрольных точках образующих, расположенных на уровне 50 мм от верха каждого пояса.

Величины геометрических отклонений корпуса и наружного контура окрайка днища резервуара, измеренные в ходе диагностики технического состояния, приведены в таблицах 1 и 2. Положительные значения отклонений в таблице 1 указывают на смещение контрольных точек в

направлении от оси резервуара, отрицательные – в направлении к оси.

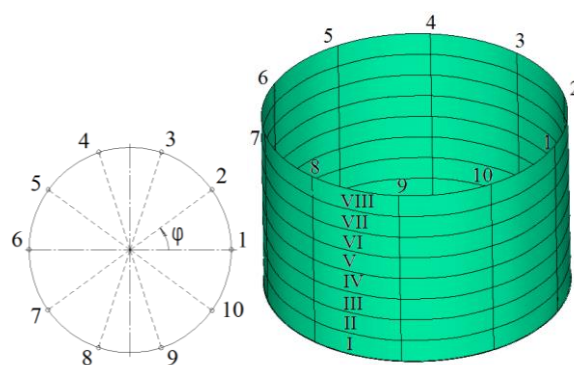


Рис. 1 – Схема расположения контрольных образующих и поясов резервуара РВС-3000

Fig. 1 – Layout of control elements and belts of the RBC-3000 tank

Таблица 1 – Отклонения от вертикали контрольных точек образующих корпуса, мм

Table 1 – Deviations from the vertical of control points forming the hull, mm

№ образующей	№ пояса								
	угор	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	0	-10	-20	-30	-40	-50	-65	-85	-90
2	0	0	0	0	0	-5	-5	-10	-15
3	0	-5	-10	-15	-20	-30	-40	-50	-55
4	0	0	0	0	0	-5	-5	-5	-5
5	0	5	10	15	20	20	25	25	30
6	0	0	0	5	10	15	20	20	25
7	0	5	10	15	20	30	40	50	55
8	0	10	20	30	40	50	60	70	85
9	0	15	30	45	60	85	90	100	105
10	0	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35

Таблица 2 – Отклонения отметок наружного контура днища от горизонтали

Table 2 – Deviations of the outer contour marks of the bottom from the horizontal

№ точки замера (номер образующей)	Расстояние между точками, м	Отклонение $\Delta z$ , мм	Отклонение смежных точек, мм
1	-	0	-
2	6	-15	-15
3	6	-7	8
4	6	-27	-20
5	6	-35	-8
6	6	-33	2
7	6	-39	-6
8	6	-42	-3
9	6	-55	-13
10	6	-23	32
1	6	0	23

Допустимые значения геометрических отклонений для вновь возводимых и

эксплуатируемых резервуаров регламентированы в нормативных документах [1, 3].

В результате в качестве исходных данных для моделирования имеется ограниченное число контрольных точек, приведенных в таблицах. Для получения замкнутых линий поперечного сечения резервуара, соединяющих контрольные точки, необходимо реализовать численный алгоритм построения таких линий, который, во-первых, должен обеспечить выполнение условий гладкости сопряжения линий в контрольных точках. Во-вторых, контрольные точки не должны выступать точками экстремумов сопрягаемых линий, что требуется для исключения появления дополнительных изгибных напряжений в точках соединения. Анализ результатов пробного моделирования с использованием стандартных инструментов CAD-модулей программных комплексов, реализующих метод конечных элементов, и анализ публикаций в рассматриваемой области, показывает, что задача программирования гладких замкнутых кривых является достаточно сложной в части математического описания [4, 5].

Для упрощения решения можно ограничиться рассмотрением задачи построения замкнутой линии поперечного сечения в плоскости. Для реализации такого алгоритма рациональнее всего использовать интерполяцию, основанную на использовании периодических функций, с периодом равным  $2\pi$  и более всего для этой цели подходит тригонометрическая интерполяция с использованием многочлена Фурье [6]. В таком случае отклонения замкнутой линии поперечного сечения от идеальной окружности могут быть описаны выражением

$$\omega(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{m-1} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi), \quad (1)$$

где коэффициенты  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  - коэффициенты Фурье:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \omega(\varphi) d\varphi, \quad a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \omega(\varphi) \cos(k\varphi) d\varphi, \\ b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \omega(\varphi) \sin(k\varphi) d\varphi. \quad (2)$$

Суммирование во втором слагаемом правой части выражения (1) или число используемых коэффициентов  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  будет ограничено количеством контрольных точек  $m$  вдоль замкнутой линии поперечного сечения. Здесь становится очевидным, что число контрольных точек в таблицах 1 и 2 может быть недостаточным для получения требуемого числа коэффициентов интерполяционного выражения (1). Недостающее число промежуточных точек может быть получено с использованием интерполяционного многочлена Лагранжа [7], рассматривая последовательно отрезки линии поперечного сечения между каждой парой контрольных точек и дополнительно концевые точки примыкающих отрезков, то есть проводя локальную интерполяцию по четырем

точкам. Отклонения от линии окружности в этом случае в пределах каждого рассматриваемого отрезка могут быть описаны выражением

$$\omega(\varphi) = \sum_{i=1}^4 \omega_i l_i(\varphi), \quad (3)$$

где  $\omega_i$  - значение отклонений в контрольной точке  $i$ ;  $\varphi$  - угловая координата;  $l_i(\varphi)$  - базисные полиномы, определяемые по выражению

$$l_i(\varphi) = \prod_{j=1, j \neq i}^4 \frac{\varphi - \varphi_j}{\varphi_i - \varphi_j}. \quad (4)$$

Вычислив значения отклонений в требуемом числе недостающих промежуточных контрольных точек с помощью локальной интерполяции Лагранжа, значения коэффициентов  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  выражения (1) далее определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений при известных значениях функции  $\omega(\varphi)$  в массиве контрольных точек, так как интерполяционная функция должна проходить через эти точки. Число уравнений будет равно общему конечному числу  $m$  контрольных точек.

Вычислив значения коэффициентов  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  выражения (1) для каждого отдельного сечения резервуара, задаваясь постоянным малым шагом изменения углового параметра  $\varphi$ , заполняются массивы координат точек замкнутых линий поперечных сечений в цилиндрической системе координат  $(R + \omega_i, \varphi_i, H_i + \Delta z_i)$ , здесь  $R$  - радиус срединной поверхности цилиндрического корпуса;  $H_i$  - высота рассматриваемого сечения от поверхности земли по проекту;  $\Delta z_i$  - отклонения точек замкнутой линии поперечного сечения от вертикали, вычисляемые аналогично с использованием интерполяционного выражения Фурье

$$\Delta z(\varphi) = \frac{a_0^*}{2} + \sum_{k=1}^{m-1} (a_k^* \cos k\varphi + b_k^* \sin k\varphi). \quad (5)$$

Значения коэффициентов  $a_0^*$ ,  $a_k^*$ ,  $b_k^*$  в выражении (5) определяются по такому же алгоритму, что и отклонения  $\omega_i$ , относительно значений контрольных точек, приведенных в третьем столбце таблицы 2.

В ранее опубликованных работах [8, 9] была рассмотрена задача моделирования поперечного сечения цилиндрической обечайки на начальной стадии потери устойчивости. Потеря устойчивости цилиндрической обечайки, нагруженной внешним давлением, происходит с образованием волн в поперечном сечении, количество волн зависит от размеров и физических свойств материала обечайки. Для расчетного определения значения критического внешнего давления методом конечных элементов, в изначальное круглое поперечное сечение модели цилиндрической обечайки вводились дополнительные радиальные отклонения, не превышающие величин допускаемых отклонений

при изготовлении цилиндрических оболочек. Это позволяет смоделировать начальную стадию волнообразования при потере устойчивости. Для описания радиальных отклонений  $\omega^*$ , моделирующих начальную стадию образования волн в поперечном сечении, по аналогии с работой [10] использовалась периодическая функция  $\omega^* = \omega_0^* \cos(n\varphi)$ , где  $\omega_0^*$  – величина максимального радиального отклонения;  $n$  – задаваемое число волн.

Применительно к корпусу резервуара, когда координаты точек замкнутых линий поперечных сечений сохранены в виде массивов, для решения задачи потери устойчивости корпуса радиальные координаты точек геометрической модели необходимо дополнительно скорректировать на величину  $\omega^*$ , то есть  $(R + \omega_i + \omega_i^*, \varphi_i, H_i + \Delta z_i)$ .

Рассмотренный алгоритм построения модели дает возможность получить геометрическую модель корпуса резервуара с задаваемым расчетным числом волн  $n$  на начальной стадии потери устойчивости. Алгоритм был применен для решения задачи оценки устойчивости рассмотренного выше резервуара РВС-3000, ранее в работе [11] такая же задача была решена для резервуара РВС-400.

Для проведения численных расчетов на основе разработанной геометрической модели резервуара получается сеточная конечно-элементная модель с использованием оболочечных конечных элементов. Граничные условия задаются в форме шарнирных заделок верхнего и нижнего торцов корпуса.

К потере устойчивости корпуса резервуара могут привести внешние нагрузки, вызывающие сжатие материала корпуса. В случае резервуара это внешнее распределенное давление, вызванное разряжением в резервуаре, и осевое сжимающее усилие. Осевое сжимающее усилие определяется суммарным весом корпуса выше расчетного сечения, весом покрытия, весом каркаса и дополнительного оборудования, снеговой нагрузкой на покрытие.

Разряжение в резервуаре может возникать при операциях слива продукта и из-за колебаний температуры окружающей среды, так как резервуар размещается на открытой площадке. Кроме того, внешнее давление вызывается воздействием ветра на часть корпуса резервуара с наветренной стороны.

Величина ветрового давления определяется согласно [12] и для рассматриваемых резервуаров принята 0.37 кПа. Допустимое значение разряжения в резервуаре приводится в типовом проекте [2] и составляет 0.25 кПа.

Осевое сжимающее усилие в расчете принимается постоянным, усилие прикладывается к верхнему торцу сеточной модели корпуса на первом этапе конечно-элементного расчета. На втором этапе расчета к сеточной модели корпуса резервуара прикладывается распределенное внешнее давление.

Решение на каждом этапе расчета проводится в упругопластической постановке с заданным шагом увеличения нагрузки. Поведение материала задается диаграммой идеального упруго-пластичного материала. Достижение предельного состояния в

ходе нелинейного расчета на втором этапе расчета определяется в расчетном шаге приложения нагрузки, в котором перестает выполняться условие равенства суммарной работы внешних сил и внутренней энергии деформации модели. Более подробное описание способов расчетного определения предельной нагрузки методом конечных элементов можно найти в работах [13, 14].

## Результаты и обсуждение

Нахождение величины критического наружного давления  $p_{cr}$  по разработанной модели проводилось по той же схеме, что и в ранее опубликованных работах [8-9]. Порядок расчета совпадает с последовательностью расчета критического наружного давления коротких цилиндрических оболочек аналитическим методом, описанным в работе [15]. Вычисление значений  $p_{cr}$  методом конечных элементов проводится последовательно при различных значениях числа волн  $n$ . То значение  $n$ , при котором получается минимальное значение  $p_{cr}$  является искомым решением. Итоговые результаты расчета для резервуара РВС-3000 представлены на рис. 2 в виде графиков зависимости  $p_{cr}$  от числа волн  $n$ . Для сравнения на рис. 3 приведен результат расчета резервуара РВС-400 работы [11].

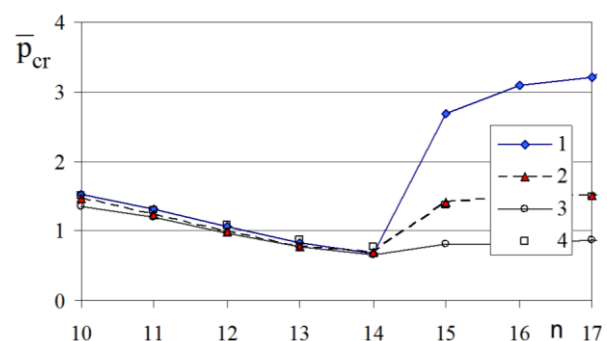


Рис. 2 – Зависимость критического наружного давления от числа волн  $n$ , резервуар РВС-3000

Fig. 2 – Dependence of critical external pressure on the number of waves  $n$ , РВС-3000 tank

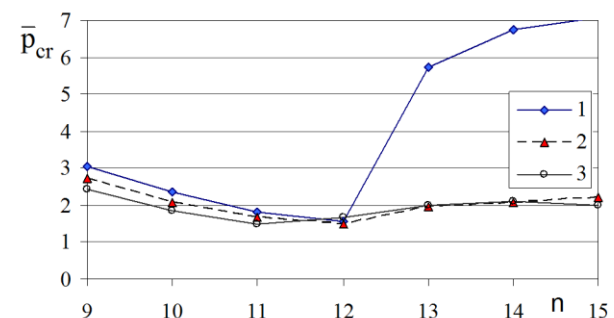


Рис. 3 – Зависимость критического наружного давления от числа волн  $n$ , резервуар РВС-400

Fig. 3 – Dependence of critical external pressure on the number of waves  $n$ , РВС-400 tank

Расчетные точки 1 на графиках представляют решение, полученное для корпуса резервуара идеальной цилиндрической формы. Расчетные точки 2 получены для модели с геометрическими отклонениями, приведенными в таблицах. Расчетные точки 3 соответствуют решению, полученному при удвоенных значениях геометрических отклонений. Точки 4 на рис. 2 – решение с отклонениями формы, приведенными в таблицах, но без учета осевой составляющей внешней нагрузки.

Результаты расчета на графиках получены при действительных значениях толщин стенок поясов, которые принимались по результатам диагностики технического состояния. Остаточная толщина нижнего пояса резервуара принималась равной 6 мм, минимальная толщина остальных поясов 5.2 мм.

Критическое наружное давление приведено в относительной форме  $\bar{p}_{cr} = \frac{p_{cr}}{p_{доп}}$ , где  $p_{доп}$  – допускаемое наружное давление. Допускаемое наружное давление было условно принято равным сумме расчетного ветрового давления 0.37 кПа и допустимого разряжения в резервуаре 0.25 кПа.

Сравнительный анализ результатов расчета для двух резервуаров показал, что критическое давление корпуса резервуара РВС-3000 практически в два раза ниже чем у резервуара РВС-400. Можно было бы предположить, что это связано с большей величиной осевой сжимающей нагрузки из-за большего суммарного веса покрытия. Но расчеты, проведенные без учета осевого сжимающего усилия (точки 4 на рис. 2), это предположение не подтверждают, влияние на  $p_{cr}$  не столь существенное. Более того, как минимум одна третья часть веса покрытия обычно воспринимается центральной стойкой резервуара, что в стандартных расчетах не учитывается.

Основной нагрузкой, приводящей к потере устойчивости, является наружное давление, вызываемое разряжением в резервуаре. Контроль величины разряжения в резервуаре должно быть уделено основное внимание.

Расчет, проведенный при удвоенных значениях отклонений, приведенных в таблицах, не приводит к существенному снижению критического наружного давления. Основным условием обеспечения устойчивости формы корпуса резервуаров является сохранение остаточных толщин стенок поясов в пределах допускаемых значений, принятых в типовых проектах резервуаров.

Основное внимание при оценке работоспособности резервуаров с геометрическими отклонениями должно быть уделено соблюдению условия прочности корпуса, в первую очередь наиболее нагруженного нижнего пояса.

## Литература

1. Руководство по безопасности «Рекомендации по техническому диагностированию сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и

- нефтепродуктов», утв. Приказом Ростехнадзора от 23.08.2023 г. №305. 90 с.
2. Типовой проект 704-1-56. *Стальной вертикальный цилиндрический резервуар для нефти и нефтепродуктов емкостью 3000 м³*. А. И. ЦНИИПроектстальконструкция, Москва, 1969. 23 с.
3. ГОСТ 31385-2016. *Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия*. Стандартинформ, Москва, 2016. 90 с.
4. В.Н. Малозёмов, Н.В. Чашников, Доклады РАН, **429**, 1, 19-21 (2009).
5. В.Н. Малозёмов, Д.А. Хорохонов, Н.В. Чашников, В кн. *Избранные главы дискретного гармонического анализа и геометрического моделирования*. СПб., 2009. С. 371-381.
6. И.С. Березин, Н.П. Жидков, *Методы вычислений*. Т. 1. Физматлит, Москва, 1962. 464 с.
7. Г.В. Ващенко, *Вычислительная математика. Основы алгебраической и тригонометрической интерполяции*. Изд-во СибГТУ, Красноярск, 2008. 64 с.
8. М.Х. Сабитов, *X национальная научно-практическая конференция с междунар. участием «Моделирование энергоинформационных процессов»*. Воронеж, 2022, с. 139-147.
9. М.Х. Сабитов, *МНТК «ИМТОМ-2022»*. Казань, 2022, т. 2, с. 105-108.
10. С.П. Тимошенко, *Устойчивость упругих систем*. Гостехтеориздат, Москва, 1955. 567 с.
11. М.Х. Сабитов, *Вестник технологического университета*, **27**, 10, 96-100 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072\_2024\_27\_10\_96
12. СП 20.13330.2016. *Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\**. Стандартинформ, Москва, 2018. 95 с.
13. М.Х. Сабитов, С.И. Поникаров, *Прочность итуцнерных узлов сосудов, работающих под давлением: монография*. Изд-во АН РТ. Казань, 2019. 130 с.
14. V.N. Skopinskii, N.A. Berkov, A.D. Emelyanova, *Chemical and petroleum engineering*, **48**, 1-2, 15-21 (2012). DOI: 10.1007/s10556-012-9566-7
15. И.И. Поникаров, С.И. Поникаров, *Конструирование и расчет химического оборудования*. Альфа-М, Москва, 2010. 382 с.

## References

1. *Safety Manual "Recommendations for Technical Diagnostics of Welded Vertical Cylindrical Tanks for Oil and Oil Products"*, approved by Order of Rostekhnadzor No. 305 dated August 23, 2023. 90 p.
2. Standard design 704-1-56. *Steel vertical cylindrical tank for oil and petroleum products with a capacity of 3000 m³*. A. I. TsNIIProektstalokonstruktziya, Moscow, 1969. 23 p.
3. GOST 31385-2016. Vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products. General technical conditions. Standardinform, Moscow, 2016. 90 p.
4. V.N. Malozyomov, N.V. Chashnikov, Reports of the Russian Academy of Sciences, 429, 1, 19-21 (2009).
5. V.N. Malozyomov, D.A. Khorokhonov, N.V. Chashnikov, In the book *Selected Chapters of Discrete Harmonic Analysis and Geometric Modeling*. St. Petersburg, 2009. P. 371-381.
6. I.S. Berezin, N.P. Zhidkov, *Methods of Calculation*. Vol. 1. Fizmatlit, Moscow, 1962. 464 pp.
7. G.V. Vashchenko, *Computational Mathematics. Fundamentals of Algebraic and Trigonometric Interpolation*. SibSTU Publishing House, Krasnoyarsk, 2008. 64 pp.
8. M.Kh. Sabitov, *X National Scientific and Practical Conference with International Participation "Modeling of*

- Energy Information Processes*". Voronezh, 2022, pp. 139-147.
9. M.Kh. Sabitov, *MNTK "IMTOM-2022"*. Kazan, 2022, vol. 2, pp. 105-108.
10. S.P. Timoshenko, *Stability of elastic systems*. Gostekhizdat, Moscow, 1955. 567 p.
11. M.Kh. Sabitov, *Herald of Technological University*, **27**, 10, 96-100 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072\_2024\_27\_10\_96
12. SP 20.13330.2016. *Code of Rules. Loads and Impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85\**. Standardinform, Moscow, 2018. 95 p.
13. M.Kh. Sabitov, S.I. Ponikarov, *Strength of Fittings in Pressure Vessels: Monograph*. Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan. Kazan, 2019. 130 p.
14. V.N. Skopinskii, N.A. Berkov, A.D. Emelyanova, *Chemical and petroleum engineering*, **48**, 1-2, 15-21 (2012). DOI: 10.1007/s10556-012-9566-7
15. I.I. Ponikarov, S.I. Ponikarov, *Design and calculation of chemical equipment*. Alfa-M, Moscow, 2010. 382 p.

---

© **М. Х. Сабитов** – кандидат технических наук, доцент кафедры Машины и аппараты химических производств, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, mh\_post@mail.ru.

© **М. Kh. Sabitov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor at the department of Chemical Production Machinery and Equipment, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, mh\_post@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 04.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 11.09.25.