

**Защита резервуаров от коррозии: перспективные решения
с использованием композитных материалов**

П. В. Чепур*, Н. А. Чипурной, К. А. Шеметов, А. М. Ефремова, А. А. Конев

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
*chepur_p_v@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается перспективный метод защиты от коррозии резервуара. Представлены предпосылки исследования, связанные с угрозой коррозии для инфраструктуры хранения жидкостей, а также с необходимостью поиска более долговечных и эффективных методов защиты резервуаров. Цель статьи — оценка эффективности применения композитных материалов для защиты от коррозии и выявление потенциальных преимуществ такого подхода. Анализируются необходимые приведенные характеристики конструкций резервуаров и проблемы склонности к коррозии при контакте металла с газовой средой. В статье описывается современный и перспективный метод борьбы с коррозией, а также ряд преимуществ, входящих в предлагаемое решение.

В работе применены методы анализа физико-химических свойств материалов, испытаний на прочность и коррозионной стойкости с целью оценки перспективности использования композитных материалов. Предлагается эффективное стратегическое решение, способствующее повышению параметров использования резервуаров.

Основные результаты исследования показывают, что применение композитных материалов для защиты резервуаров от коррозии демонстрирует значительное увеличение срока службы и уменьшение затрат на регулярное обслуживание и восстановительные работы. Статья содержит формулы, которые описывают процессы, зависящие от показаний плотности, давления, толщины стенок и т. д. Представлена зависимость влияния нарастания коррозионных поражений с течением времени без использования средств защиты. Показаны зависимость нефтепоглощения от плотности предлагаемого метода и влияние нефтегазовоздушной среды на нефтеустойчивость и газопоглощение. Графически представлены и проанализированы зависимости коррозионного воздействия до и после использования новых средств защиты, скорости коррозии от температурных условий.

Практическая значимость работы заключается в накоплении сведений, которые могут быть использованы проектировщиками, инженерами и эксплуатирующими организациями для принятия обоснованных решений по выбору защитных материалов и технологий для резервуаров, что, в конечном итоге, приведет к сокращению затрат на обслуживание и повышению надежности инфраструктуры хранения.

Ключевые слова: композитные материалы, защита резервуаров, коррозия металла

Для цитирования: Защита резервуаров от коррозии: перспективные решения с использованием композитных материалов / П. В. Чепур, Н. А. Чипурной, К. А. Шеметов [и др.]. — DOI 10.31660/0445-0108-2025-1-89-99 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2025. — № 1. — С.89–99.

Corrosion protection of tanks: promising solutions using composite materials

Petr V. Chepur*, Nikita A. Chipurnoy, Kirill A. Shemetov, Anna M. Efremova, Alexey A. Konev

Abstract. The article deals with a promising method of protection against re-liquefaction corrosion. It discusses the background of the research, highlighting the corrosion threats to liquid storage infrastructure and the necessity for more durable and efficient corrosion protection methods. The main purpose of the article is to evaluate the effectiveness of using composite materials for corrosion protection and to identify the potential advantages of this approach. The article considers the essential design parameters of tank structures and the problems of corrosion when metals are exposed to gas-air environments. It describes a modern and promising method for tackling corrosion. In addition, it is a question of a range of benefits associated with the proposed solution.

To assess the prospects of composite materials, the study employs methods for analyzing physicochemical properties, conducting strength tests, and evaluating corrosion resistance. An effective strategic solution for the use of storage tanks is proposed, aims at increasing its parameters.

The main results of the study show that applying composite materials for corrosion protection significantly extends the service life of tanks and reduces costs related to regular maintenance and repairs. The article includes formulas describing processes dependent on parameters such as density, pressure, wall thickness, etc. Also, it reflects dependence of the influence of corrosion lesion growth over time without the use of protection means. The dependence of oil absorption on the density of the proposed material is demonstrated, along with the effects of oil-gas-air environments on oil resistance and gas absorption. Furthermore, the article graphically represents and analyzes the corrosion impact before and after implementing the new protective solutions, as well as the relationship between the corrosion rate and temperature conditions.

The practical significance of this work lies in the compilation of data that can be utilized by designers, engineers, and operational organizations to make informed decisions regarding the selection of protective materials and technologies for tanks. Ultimately, this will lead to reduced maintenance costs and increased reliability of storage infrastructure.

Keywords: composite materials, tank protection, metal corrosion

For citation: Chepur, P. V., Chepurnoy, N. A. Shemetov, K. A. Efremova, A. M. & Konev A. A. (2025). Corrosion protection of tanks: promising solutions using composite materials. *Oil and Gas Studies*, (1), pp. 89-99. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-1-89-99

Введение

Современное производство немыслимо без резервуаров для хранения различных веществ, от нефти и газа до химических жидкостей. Однако коррозия — одна из главных угроз, с которой сталкиваются инженеры, эксплуатирующие организации и производители этих резервуаров. Коррозия может привести к разрушению резервуаров, утечкам опасных веществ и серьезным экологическим проблемам [1]. Поэтому вопрос защиты резервуаров от коррозии остается чрезвычайно актуальным и требует постоянного изучения и поиска новых технологических решений.

В научной литературе подробно описаны различные методы защиты резервуаров от коррозии от лакокрасочных покрытий до катодной защиты. Однако использование композитных материалов в качестве защиты от коррозии является одним из наиболее перспективных направлений в этой области. Многочисленные исследования и практические примеры подтверждают высокую эффективность и долговечность композитных материалов при защите резервуаров [2].

Объект и методы исследования

Анализируя проблемное поле вопросов по коррозии конструкций резервуаров, можно сделать вывод о необходимости применения новых методов защиты от коррозии для улучшения защиты элементов резервуаров. Коррозия может привести к ухудшению товарных показателей качества хранимых продуктов, утечкам и даже разрушению резервуаров, поэтому важно применять эффективные методы защиты для обеспечения долговечности и надежности резервуаров. На рисунке 1 представлена зависимость лавинообразного прироста величины коррозионного поражения от времени в случае полного отсутствия защиты металлоконструкций.

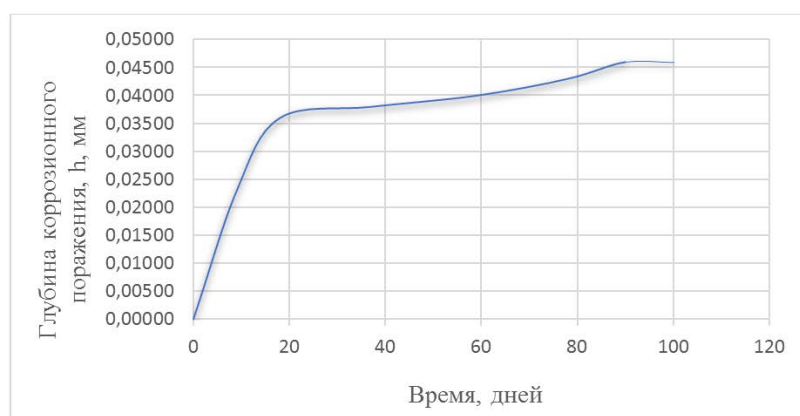


Рис. 1. Зависимость глубины коррозионного поражения от времени коррозии

Наиболее современным и перспективным методом является использование композитных материалов. Композиты — это материалы, состоящие из двух или более компонентов, которые вместе образуют новый материал с улучшенными свойствами. Композитные материалы предлагают ряд преимуществ для защиты резервуаров от коррозии, положительно влияющих на весь период эксплуатации. Преимущества композитных материалов:

- 1) высокая стойкость к коррозии;
- 2) легкость, прочность к механическим воздействиям;
- 3) низкая ломкость;
- 4) способность принимать различные формы и размеры;
- 5) хорошая термическая и химическая стойкость.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что композитные материалы обеспечивают устойчивость к коррозии, облегчают обслуживание и покраску, снижают риск проведения плановых работ по техническому осмотру и ремонту резервуаров, а также позволяют выдерживать широкий диапазон температур и химических веществ, что делает их идеальным выбором для применения.

Процессы протекания коррозии могут быть описаны с применением математических зависимостей, которые помогают более глубоко проанализировать различные физические процессы. Одной из основных базовых характеристик коррозионных процессов является скорость коррозии металла.

Скорость коррозии листового элемента конструкции резервуара $V_{i \text{ корр}}$, мм/год, [3] определяется по следующей формуле (1):

$$V_{i \text{ корр}} = \frac{t - t_i}{T_{i \text{ корр}}}, \quad (1)$$

где t — фактическая толщина листового элемента конструкции резервуара на момент начала эксплуатации, мм; t_i — толщина элемента, определенная по результатам технического диагностирования (как правило, ультразвуковая толщинометрия), мм; $T_{i \text{ корр}}$ — промежуток времени между вводом элемента конструкции в эксплуатацию (после строительства, ремонта) и последним техническим диагностированием, год.

В случае отсутствия данных значение параметра t принимается равным толщине элемента, приведенной в проектной документации.

Предлагаемый авторами статьи подход по применению комбинированной защиты резервуаров с использованием композитных добавок позволит повысить устойчивость металлоконструкций к коррозионному воздействию элементов. Однако несмотря на преимущества композитных составов, необходимо подтвердить устойчивость соответствующих композитных материалов к воздействию нефти.

Минимально допустимая толщина днища резервуара в зоне коррозионного воздействия составляет (2):

$$h_{\text{доп}} = \frac{P_{\text{доп}}}{\rho \cdot h}, \quad (2)$$

где $P_{\text{доп}}$ — допустимое давление на днище резервуара, Па; h — максимальная высота продукта в резервуаре, м; ρ — плотность хранимого продукта, кг/м³.

После нахождения минимально допустимой толщины днища резервуара определяется предельная глубина коррозионной каверны $\delta_{\text{доп}}$, при которой гарантируется безаварийная эксплуатация резервуара согласно формуле (3):

$$\delta_{\text{доп}} = h_{\text{нач}} - h_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{нач}}$ — начальная толщина днища резервуара.

Особое внимание следует уделить свойствам металлических конструкций крыш резервуаров, которые проявляются в процессе эксплуатации [4–7]. Проблемы могут возникать из-за склонности конструктивных элементов к коррозионным повреждениям при контакте с атмосферой хранимого продукта. Это обусловлено наличием каркаса на внутренней по-

верхности крыш и наличием источников щелевой коррозии. Могут образовываться пиррофорные отложения, а также происходить падение и осаждение продуктов коррозии на днище и стенки резервуара. Появление проникающих коррозионных повреждений может нарушить герметичность крыши.

Далее рассмотрим технологические аспекты предлагаемой защиты резервуаров от коррозии на основе композитных составов.

По окончании строительно-монтажных работ и гидроиспытаний резервуара необходимо проведение процедуры антикоррозионной защиты внутренней поверхности и крыши резервуара. Процесс изоляции осуществляется путем нанесения пенообразной пенополиуретановой смеси на все элементы крыши резервуара (процесс нанесения представлен на рисунке 2). Плотность материала составляет $50\text{--}60\text{ кг/м}^3$, а толщина слоя пены должна быть равна 50 мм, что соответствует 100 мм минераловатной изоляции [8].

Рис. 2.
**Нанесение пенополиуретана
на конструктивные
элементы крыши**



Пенополиуретан (ППУ) обладает достаточной плотностью и пластичностью, а также отличной адгезией к металлу, благодаря полиуретановому покрытию марки Stelpant PU — MICA UV. Это повышает несущую способность кровли за счет увеличения ее жесткости при передвижении людей по поверхности настила.

На верхний слой ППУ наносится полиуретановое покрытие Stelpant, устойчивое к воздействию масел и летучих углеводородов, толщиной не менее 200 нм.

Пенополиуретановый состав заполняет швы и пазы внахлестку, а также закрывает элементы каркаса крыши. Завершающий слой полиуретанового покрытия защищает основной (базовый слой) ППУ от воздействия газовой среды.

Срок службы изоляции и антикоррозионной защиты соответствует расчетному сроку службы резервуара, который согласно проекту должен составлять не менее 30 лет.

Результаты исследования

Stelpant-PU-Mica UV — это высококачественная, устойчивая к свету и атмосферным воздействиям эмаль на основе однокомпонентных полиуретанов, подтверждающихся за счет влаги атмосферного воздуха. Материал содержит железную слюдку и образует плотную износостойкую пленку. Специальный подбор пленкообразующих веществ позволяет применять материал в температурном диапазоне от минус 5 до плюс 50 °С и при влажности воздуха до 98 %. Основные технические характеристики материала представлены в таблице.

Технические характеристики материала Stelpant-PU-Mica UV

Техническая характеристика	Значение
Плотность	$1,49 \pm 0,05 \text{ г/см}^3$
Сухой остаток по объему	$57,0 \pm 2 \%$
Толщина сухого слоя	$50 - 80 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
Летучие органические соединения	406 г/л
Термостойкость	120 °С при сухом и 60 °С при влажном нагреве
Температура основания	от - 5 °С до + 50°С
Влажность воздуха	от 30 до 98 %

Полиуретан Stelpant-PU-Mica UV обладает высокой устойчивостью к влаге, поэтому его можно наносить на увлажненную поверхность без образования видимых капель воды. Все поверхности, на которые будет наноситься покрытие, должны быть очищены от загрязнений, солей, масел и жиров.

По результатам лабораторных испытаний, а также комплекса проведенных расчетов установлено, что при использовании вышеприведенного комбинированного состава несущая способность таких крыш увеличивается более чем на 50 %.

Следует отметить, что конструктивные элементы кровли в наибольшей степени подвержены коррозии в резервуарах [9] и в условиях эксплуатации несут максимальные нагрузки в зависимости от климатического цикла (периода). Например, снеговые нагрузки, связанные с образованием льда зимой, и тепловой поток солнца летом нагревают кровельный настил до 60 °С.

Это объясняется температурной зависимостью скорости химических реакций окисления. Чем выше температура, тем быстрее идет процесс коррозии металла. Ниже представлен график зависимости скорости коррозии от температуры (рис. 3).

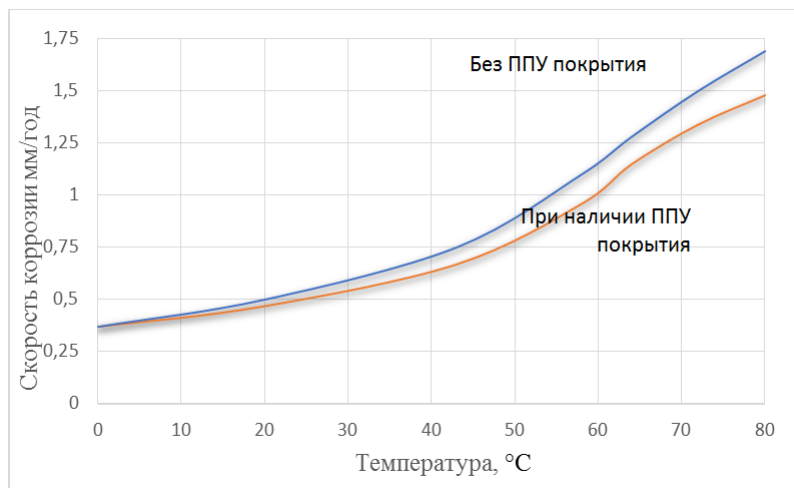


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии от температуры с применением комбинированной защиты

Далее авторами статьи были проанализированы параметры нефтестойкости и газопоглощения полиуретановых материалов, используемых в качестве изоляции. На рисунке 4 представлен график зависимости нефтепоглощения от плотности пенополиуретана.

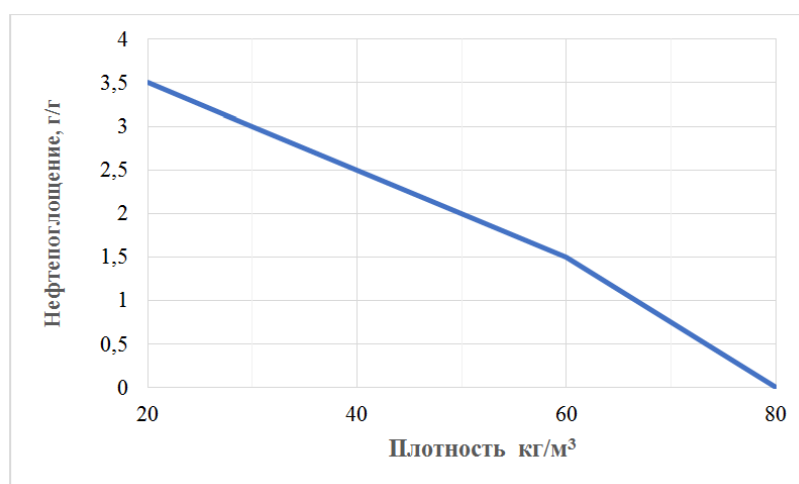


Рис. 4. Зависимость нефтепоглощения от плотности пенополиуретана

Характерной чертой данного графика является близкая к линейной функция снижения уровня нефтепоглощения материала ППУ при увеличении плотности изолирующего покрытия.

Обсуждение

Коррозия является серьезной проблемой для резервуаров, которые используются для хранения нефти, газа и других химических веществ. Коррозия может привести к утечкам, пожарам и взрывам, что представляет угрозу для безопасности и окружающей среды.

Традиционные методы защиты резервуаров от коррозии включают использование защитных покрытий, катодной защиты и ингибиторов коррозии. Однако эти методы имеют свои ограничения и могут быть неэффективны в определенных условиях.

Композитные материалы представляют собой перспективное решение для защиты резервуаров от коррозии. Композиты сочетают в себе прочность и легкость металлов с химической стойкостью и изоляционными свойствами полимеров.

Композитные материалы могут использоваться для изготовления облицовок резервуаров, трубопроводов и другого оборудования, подверженного коррозии.

Композитные покрытия можно однозначно рекомендовать для защиты резервуаров для хранения нефти и газа, химических веществ.

В целом, в статье подчеркивается потенциал композитных материалов в качестве перспективного решения для защиты резервуаров от коррозии. Композитные материалы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами защиты, включая высокую устойчивость к коррозии, малый вес и высокую прочность, отличные изоляционные свойства, простоту монтажа и обслуживания.

По мере дальнейшего развития и совершенствования композитных материалов они, вероятно, будут играть все более важную роль в защите от коррозии резервуаров и другого оборудования.

Выводы

Была проанализирована стойкость к нефтепродуктам и устойчивость к воздействию газовой среды композитных защитных покрытий из пенополиуретана марки ППУ-17Н и фирмы Stelpant-PU.

1. Установлено отсутствие видимых внешних изменений, таких как набухание, отслаивание или размягчение. Внешний вид образцов после контакта с нефтью не изменился.

2. Исследовалось, как плотность пенополиуретана влияет на его способность впитывать нефть: чем выше плотность, тем больше количество закрытых ячеек, что ведет к меньшему влагопоглощению. Таким образом, при плотности ППУ 50–60 кг/м³ необходимо либо создать верхний слой с плотностью 80 кг/м³ или выше, либо нанести защитную эмаль или лак, чтобы предотвратить впитывание нефти.

3. Одна из характеристик ППУ заключается в его способности снижать теплопроводность вместе с уменьшением температуры окружающей среды, так как газ внутри ячеек охлаждается и становится менее плот-

ным. Мелкоячеистый пенополиуретан с коэффициентом теплопроводности 0,025 Вт/м · К при снижении температуры значительно улучшает свои теплоизоляционные характеристики. Это важное свойство для климатических условий Тюменского региона, поскольку при снижении температурных показателей ППУ становится более эффективным.

4. В испытанных образцах в лабораторной газовой среде не было зафиксировано увеличение массы. Это свидетельствует о том, что применение пенополиуретана для изоляции крыши резервуара способно предотвратить коррозию, образование экзотермических отложений, а также образование льда и снега в зимний период.

5. Мембрана Stelpant-PU обладает свойством быть нерастворимой в нефти при любой температуре продукта и эффективно препятствует проникновению нефтепродукта в поры пенополиуретана. Внешний вид образцов не изменился после контакта с нефтью.

6. Использование внутренней изоляции для всех резервуаров типа РВС практически исключает формирование малых дыхательных пространств, что значительно улучшает экологическую обстановку и снижает риск возникновения пожаров в резервуарном парке.

Список источников

1. Духанин, Г. П. Коррозия и защита металлов : учебное пособие / Г. П. Духанин, А. Б. Кочнов. – Волгоград : Волгоградский гос. технический ун-т, 2012. – 95 с. – Текст : непосредственный.
2. Хохлачёва, Н. М. Коррозия металлов и средства защиты от коррозии : учебное пособие / Н. М. Хохлачёва, Е. В. Ряховская, Т. Г. Романова. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 118 с. – Текст : непосредственный.
3. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П. И. Тугунов, В. Ф. Новосёлов, А. А. Коршак, А. М. Шаммазов. – 2 изд., перераб. – Уфа : ООО ДизайнПолиграфСервис, 2002. – 658 с. – Текст : непосредственный.
4. Тарасенко, А. А. Напряженно-деформированное состояние верхнего опорного кольца резервуара при неосесимметричных деформациях корпуса / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 525–529.
5. Тарасенко, А. А. Закономерности деформирования металлоконструкций крупногабаритного вертикального сварного резервуара при наличии зон проседания основания / А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2016. – № 1 (53). – С. 32–37.
6. Семин, Е. Е. Использование программных комплексов при оценке технического состояния и проектирование ремонтов вертикальных стальных резервуаров / Е. Е. Семин, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт : теория и практика. – 2006. – № 4 (6). – С. 85–87.

7. Тарасенко, А. А. Оценка работоспособности крупногабаритного резервуара РВСПК-100000 при образовании зоны неоднородности грунтового основания / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, Ю. Гуань. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 134–136.
8. Свод правил. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов: СП 61.13330.2012 : утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27 декабря 2011 г. № 608 : введ. в действие 01.01.2013. – Москва : Минрегион России, 2012. – 52 с. – Текст : непосредственный.
9. Коррозия и защита металлических конструкций и оборудования : учебное пособие / И. М. Жарский, Н. П. Иванова, Д. В. Куис, Н. А. Свидунович. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 320 с. – Текст : непосредственный.

Reference

1. Dukhanin, G. P. & Kochnov, A. B. (2012). Korroziya i zashchita metallov. Volgograd, Volgograd State Technical University Publ., 95 p. (In Russian).
2. Khokhlacheva, N. M., Ryakhovskaya, E. V., & Romanova, T. G. (2020). Korroziya metallov i sredstva zashchity ot korrozii. Moscow, INFRA-M Publ., 118 p. (In Russian).
3. Tugunov, P. I., Novosyolov, V. F., Korshak, A. A., & Shammazov, A. M. (2002). Tipovye raschety pri proektirovanii i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov. Ufa, DesignPoligrafService Publ., 658 p. (In Russian).
4. Tarasenko, A. A., & Chepur, P. V. (2014). Stress-strain state of the upper support ring with non-axisymmetric deformation. Fundamental research, (11-3), pp. 525-529. (In Russian).
5. Tarasenko, A. A., Gruchenkova, A. A., & Chepur, P. V. (2016). The regularities of large vertical tank's metal structures deformations in the presence of subsidence foundation zones. Pipeline transport: theory and practice, (1 (53)), pp. 32-37. (In Russian).
6. Semin, E. E., & Tarasenko, A. A. (2006). The use of software systems in assessing the technical condition and designing repairs of vertical steel tanks. Pipeline transport: theory and practice, (4 (6)), pp. 85-87. (In Russian).
7. Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., & Guan, Yu. (2016). Performance evaluation of large tank rvspk-100000 in development of differential settlement area. Oil industry, (4), pp. 134-136. (In Russian).
8. SP 61.13330.2012 (2012). Designing of thermal insulation of equipment and pipe lines. Moscow, Minregion of Russia Publ., 52 p. (In Russian).
9. Zharskiy, I. M., Ivanova, N. P., Kuis, D. V., & Svidunovich, N. A. (2012). Korroziya i zashchita metallicheskih konstruktsiy i oborudovaniya. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 320 p. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Чепур Петр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, chepur_p_v@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6722-459X>

Чипурной Никита Александрович, студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8012-6731>

Шеметов Кирилл Александрович, студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3472-4548>

Ефремова Анна Михайловна, студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1524-3459>

Конов Алексей Алексеевич, студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8289-4978>

Petr V. Chepur, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, chepur_p_v@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6722-459X>

Nikita A. Chipurnoy, Student, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8012-6731>

Kirill A. Shemetov, Student, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1524-3459>

Anna M. Efremova, Student, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1524-3459>

Alexey A. Konev, Student, Industrial University of Tyumen, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1524-3459>

Статья поступила в редакцию 25.04.2024; одобрена после рецензирования 10.05.2024; принята к публикации 20.06.2024.

The article was submitted 25.04.2024; approved after reviewing 10.05.2024; accepted for publication 20.06.2024.