

Научная статья / Original research article
УДК 528.721.221.6
DOI:10.31660/0445-0108-2025-4-115-125
EDN: QAUPLG



Исследование состояния стенок резервуара при помощи технологии наземного лазерного сканирования

Т. А. Ганиев, Т. Б. Миннихметов, С. Л. Сабанов, А. В. Малышева*

Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»,
Альметьевск, Россия

*nastyamalysheva9566@gmail.com

Аннотация. Вертикальные стальные резервуары широко применяются в нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности, обеспечивая надежное хранение нефти и нефтепродуктов. Однако эксплуатация данных конструкций сопряжена с рисками, такими как: коррозия, механические повреждения и неравномерные деформации, способными привести к авариям с тяжелыми экологическими и экономическими последствиями. В связи с этим особое значение приобретает мониторинг технического состояния резервуаров, позволяющий своевременно выявлять отклонения от проектных параметров и предотвращать аварийные ситуации. В статье рассматривается применение наземного лазерного сканирования как метода диагностики стенок вертикальных стальных резервуаров. Методика включает создание трехмерной цифровой модели резервуара, анализ его напряженно-деформированного состояния и выявление отклонений от проектной геометрии. Использование 3D-сканера позволило достичь высокой точности измерений и автоматизировать процесс сбора данных. Результаты исследования продемонстрировали эффективность наземного лазерного сканирования в выявлении деформаций стенок резервуара и их динамики во времени. Метод обеспечивает более полную оценку технического состояния по сравнению с традиционными методами визуально-измерительного контроля, снижая затраты на диагностику и повышая надежность эксплуатации. Практическая значимость исследования заключается в возможности внедрения данной технологии в систему мониторинга резервуарных парков, что способствует повышению безопасности и продлению срока службы нефтехранилищ.

Ключевые слова: вертикальные стальные резервуары, контроль технического состояния, наземное лазерное сканирование, напряженно-деформированное состояние, трехмерная точечная модель

Для цитирования: Исследование состояния стенок резервуара при помощи технологии наземного лазерного сканирования / Т. А. Ганиев, Т. Б. Миннихметов, С. Л. Сабанов, А. В. Малышева. – DOI 10.31660/0445-0108-2025-4-115-125 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 4. – С. 115–125. – EDN: QAUPLG

Study of tank wall state using surface laser scanning

Tair A. Ganiev, Timur B. Minniakhmetov, Sergey L. Sabanov,
Anastasia V. Malysheva*

Almetyevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almetyevsk, Russia

*nastyamalysheva9566@gmail.com

Abstract. The oil and oil refining industries commonly use vertical steel tanks for the safe storage of crude oil and petroleum products. However, the operation of these tanks comes with risks such as: corrosion, mechanical damage, and non-uniform deformation can result in significant failures with serious environmental and economic consequences. For this reason, regular monitoring of tank technical state is especially important. Early detection of deviations from design parameters, which is possible thanks to monitoring, can help prevent accidents. This paper examines the use of surface laser scanning technology as a method for inspecting tank walls. This method involves creating a 3D digital model of the tank, analyzing its stress-strain state, and identifying deviations from its original geometry. The use of a 3D scanner ensures high measurement accuracy and automates the data collection process. The study's results indicate that surface laser scanning is an effective tool for detecting deformations in tank walls and for monitoring their progression over time. Compared to traditional visual and dimensional inspection methods, this technology provides a more comprehensive assessment of the technical condition of the tanks. This approach reduces diagnostic costs and improves the safety and reliability of tank operations. The practical value of this study lies in the potential integration of surface laser scanning technology into the routine monitoring system of tank farms. This integration can enhance safety and extend the service life of oil storage facilities.

Keywords: vertical steel tanks, monitoring of technical state, surface laser scanning, stress-strain state, three-dimensional point model

For citation: Ganiev, T. A., Minniakhmetov, T. B., Sabanov, S. L. & Malysheva, A. V. (2025). Study of tank wall state using surface laser scanning. *Oil and Gas Studies*, (4), pp. 115-125. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-4-115-125

Введение

Вертикальные стальные резервуары широко используются для хранения сырой нефти и нефтепродуктов. Однако эксплуатация таких объектов сопряжена с повышенными рисками, связанными с пожарной опасностью, коррозийным износом, механическими повреждениями и усталостью металла.

Нарушение целостности стенки резервуара может привести к катастрофическим последствиям, таким как полное или частичное разрушение не только резервуара, но и соседних резервуаров, зданий и сооружений. Особую опасность представляют загрязнение земли и водных ресурсов нефтью или нефтепродуктами, выброс в атмосферу токсичных продуктов горения, получение травм или гибель сотрудников, обслуживающих объект.

Анализ статистики свидетельствует, что в критических ситуациях финансовые потери от аварий резервуаров могут более чем в 500 раз превысить первоначальную стоимость их строительства. В связи с этим обеспечение надежности и безопасности эксплуатации резервуаров приобретает первостепенное значение.

Оценка технического состояния резервуара играет ключевую роль в процессе его эксплуатации, так как именно на основе этих данных принимается решение о необходимости проведения технического обслуживания и ремонтных работ. Один из важнейших показателей надежности конструкции — ее напряженно-деформированное состояние. Исследование причин аварий вертикальных стальных резервуаров позволяет выявить основные факторы, влияющие на формирование напряжений и деформаций в их элементах, что способствует повышению безопасности и продлению срока службы оборудования [1].

На процесс эксплуатации вертикальных стальных резервуаров влияют различные внешние и внутренние факторы: циклические гидростатические нагрузки, ветровые и снеговые воздействия, температурные деформации, вакуум и избыточное давление. Эти нагрузки приводят к тому, что конструктивные элементы резервуара испытывают сложные напряженно-деформированные состояния [2].

В последние годы большое внимание уделяется увеличению эксплуатационного ресурса резервуаров, многие из которых уже превысили установленный срок службы. Это обуславливает необходимость проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на оценку прочности и устойчивости конструктивных элементов, а также разработку современных методов анализа их реального напряженно-деформированного состояния.

Все существующие методы определения напряженно-деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров, неравномерно расположенных по контуру дна, предполагают использование данных традиционной геодезической съемки. Однако эти методы имеют такие недостатки, как неполная информация о пространственном положении и фактической геометрии стенок резервуара [3].

Современные методы контроля технического состояния резервуаров включают визуальный осмотр, ультразвуковую дефектоскопию, рентгенографию и традиционные геодезические измерения. Однако эти методы имеют ряд ограничений, связанных с низкой пространственной точностью, высокой трудоемкостью и необходимостью временной приостановки эксплуатации.

Наземное лазерное сканирование является перспективным методом диагностики состояния стенки вертикальных стальных резервуаров (РВС), так как обладает следующими преимуществами:

- *Высокая точность измерений*

Точность, достигаемая наземным лазерным сканированием, значительно превосходит результаты традиционных методов, обеспечивая более детальное представление о форме и параметрах стенок резервуаров.

- *Бесконтактность*

Отсутствие прямого контакта с объектом обследования минимизирует возможные искажения данных и обеспечивает сохранность интегритета резервуара.

- *Скорость проведения обследования*

Наземное лазерное сканирование позволяет существенно сократить время проведения обследования по сравнению с традиционными методами, что особенно актуально при больших по размерам сооружениях [4].

- *Полный охват контролируемого объекта*

Замеряются не только контрольные точки, как при традиционных методах визуально-измерительного и акустически-эмиссионного контроля, а вся поверхность стенок резервуара.

Объект и методы исследования

Разработана методика трехмерного наземного лазерного сканирования вертикальных стальных резервуаров, направленная на выявление отклонений их фактического пространственного положения и геометрии стенок от проектных параметров. Это особенно важно для диагностики состояния РВС, подверженных деформационным изменениям в ходе эксплуатации.

Данная методика разработана с целью снижения влияния внешних факторов, способных исказить результаты сканирования. К ключевым параметрам, воздействующим на точность измерений, относятся метрологические характеристики объекта, погодные условия во время проведения работ, устойчивость размещения сканирующего оборудования, а также его корректная калибровка. Для устранения возможных погрешностей предусмотрены специализированные методы обработки данных, которые позволяют компенсировать воздействие окружающей среды на точность измерений. Еще одним важным преимуществом разработанной методики является сокращение времени выполнения обследования резервуаров всех типоразмеров. Благодаря использованию современных лазерных сканеров, оснащенных высокоскоростными системами сбора и обработки данных, получение пространственной информации значительно ускоряется.

Процесс обследования резервуара по данной методике состоит из нескольких ключевых этапов. В первую очередь проводится подготовка к сканированию: выбор оптимальных точек установки сканеров, настройка оборудования и калибровка приборов. Затем осуществляется непосредственное сканирование объекта, в ходе которого лазерный луч сканера последовательно движется по всей поверхности резервуара, формируя облако точек с высокой плотностью. Затем данные проходят этап обработки, включающий фильтрацию, устранение шумов, выравнивание и приведение к единой системе координат. Итоговый результат представляется в виде трехмерной модели резервуара, которая может быть использована для детального анализа состояния стенки и выявления отклонений от проектных параметров.

Объектом исследования выступает вертикальный стальной резервуар типа РВС-5000, эксплуатируемый на нефтеперерабатывающих предприятиях.

В таблице 1 содержатся ключевые параметры данного резервуара, которые предоставляют основу для дальнейших аналитических рассмотрений, обеспечивая важную информацию для оценки технического состояния и напряженно-деформированного состояния указанного сооружения.

Для проведения исследований использовался 3D-сканер FARO FOCUS S150, который обладает диапазоном измерений от 60 см до 150 м. Это позволяет захватывать большие пространства или объекты без частой смены станций. Точность линейных измерений составляет ± 1 мм, угловых – 19.

Краткая характеристика резервуара

Параметр	Значение
Тип резервуара	РВС
Внутренний диаметр резервуара, м	23,78
Высота стенки резервуара, м	11,92
Объем номинальный, м ³	5000

Процесс выполнения работ по наземному лазерному сканированию имеет следующие условия:

- *Выбор местоположений станций*

Для получения полной картины резервуара необходимо установить несколько станций вокруг объекта. Количество станций зависит от размера резервуара и требований к детализации. Обычно используется от 4 до 8 станций.

- *Расстояние от объекта*

Лазерный сканер должен находиться на таком расстоянии от резервуара, которое обеспечивает оптимальное покрытие и минимизирует искажения. Рекомендуемое расстояние составляет от 5 до 20 м в зависимости от модели сканера и размеров резервуара.

- *Сканирование*

Лазерный луч будет посылаться во все направления, фиксируя координаты точек на поверхности резервуара. Важно учитывать угол отражения лазерного луча, так как он влияет на качество получаемых данных. При слишком острых углах отражения могут возникать искажения, что затрудняет получение точных измерений. Поэтому процесс сканирования выполняется с нескольких станций, чтобы минимизировать влияние углов и обеспечить более равномерное покрытие объекта.

Процедура лазерного сканирования осуществлялась с оптимально подобранным шагом, обеспечивающим высокую плотность распределения измерительных точек на поверхности РВС. Это позволило с достаточной точностью и достоверностью определить геометрию резервуара, учитывая деформацию стенок при заполнении на каждом ракурсах для формирования единой трехмерной точечной модели (рис. 1).

В процессе моделирования внешней поверхности резервуара (рис. 2) активно использовались цилиндры с различными диаметрами, соответствующими толщине стенок исследуемых сегментов.



Рис. 1. Вид облака точек РВС

Это позволило более точно учитывать геометрические параметры и характеристики конструкции, что является важным аспектом для дальнейшего анализа. Результатом этой работы стало формирование облака точек — детализированное лазерное представление поверхности резервуара, представляющее собой массив высокоточных данных, полученных методом лазерного сканирования [5].



Рис. 2. Вид облака точек внешней поверхности стенки РВС

В ходе обработки данных наземного лазерного сканирования с применением специализированного программного обеспечения была создана цифровая трехмерная модель образующих стенок резервуара в соответствии с проектными параметрами. Это позволило воссоздать максимально точное представление о конструкции.

Далее проведено совмещение полученной проектной модели с фактической векторной трехмерной моделью, отражающей реальное состояние стенок резервуара. Этот этап анализа позволил определить отклонения образующих стенок резервуара от вертикали, что является ключевым для оценки состояния конструкции [6].

На следующем этапе проводился детальный анализ отклонения стенки резервуара от вертикали, что дает возможность выявить потенциальные проблемы и недостатки в конструкции.

В контексте исследования напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных резервуаров была приведена краткая характеристика резервуара типа РВС-5000. Это описание позволило более глубоко понять его особенности, конструктивные элементы и поведение под воздействием различных факторов, что в свою очередь способствовало более точной оценке его надежности и долговечности в эксплуатации.

Результаты

На рисунке 3 представлена схема развертки стенки резервуара, осуществлявшейся от вертикальной оси люка-лаза в указанном направлении.

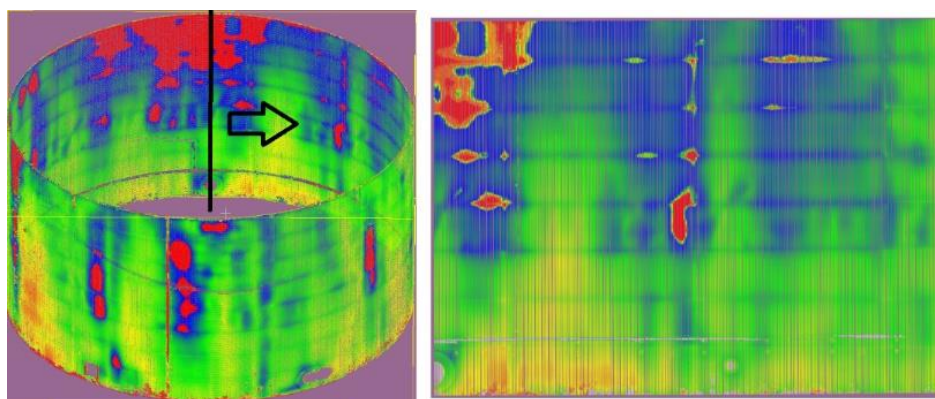


Рис. 3. *Схема развертки*

Справа от среза первого пояса резервуара представлена шкала отклонений с цветовой дифференциацией (рис. 4). Каждый цвет в градиенте соответствует определенному уровню толщины:

- *синий* указывает на сдвиг стенки РВС внутрь, что может свидетельствовать о проблемах с давлением или коррозией, требующих внимания;

- *зеленый* обозначает промежуточный уровень, где состояние стенки считается относительно стабильным, но все равно требует мониторинга;
- *желтый* также представляет промежуточный результат, но может указывать на более заметные изменения, которые стоит учитывать для предотвращения дальнейших проблем;
- *красный* показывает сдвиг стенки наружу, что может указывать на избыточное давление или другие серьезные проблемы, требующие немедленного вмешательства.

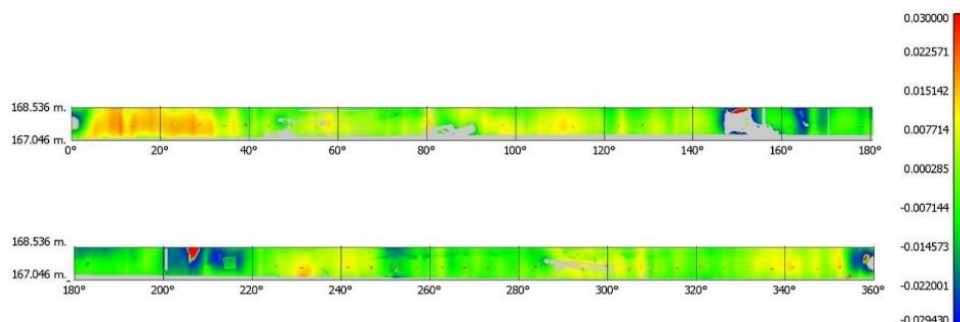


Рис. 4. Шкала геометрических отклонений внутренней поверхности первого пояса резервуара

Предельные значения отклонений для каждого пояса, приведенные в таблице 2, увеличиваются по мере роста номера пояса, поскольку верхние пояса резервуара менее устойчивы к деформации из-за меньшей жесткости конструкции и большей восприимчивости к внешним нагрузкам.

Таблица 2

Предельные значения отклонений для каждого пояса резервуара

№ пояса	Предельные отклонения от вертикали образующих стенки с учетом срока эксплуатации, м	Максимальное отклонение участка наружной поверхности на шкале, м
1	0,03	0,034
2	0,05	0,046
3	0,07	0,034
4	0,09	0,043
5	0,11	0,052
6	0,12	0,048
7	0,13	0,053
8	0,14	0,046

Анализ предельных отклонений, полученных в результате наземного лазерного сканирования PBC-5000, показывает, что в большинстве случаев максимальные отклонения находятся ниже предельных значений, что свидетельствует о достаточной прочности и стабильности конструкции. Однако первый пояс показывает максимальное отклонение 0,034 м при предельном 0,03 м, что указывает на превышение допустимой нормы.

В целом, резервуар находится в удовлетворительном состоянии. Тем не менее первый пояс требует внимательного мониторинга и возможной коррекции в целях поддержания высоких стандартов безопасности и надежности, так как фактическое отклонение превышает допустимые пределы.

Разработанная методика наземного лазерного сканирования резервуаров обеспечивает оперативное и малозатратное проведение измерений, позволяя точно определить их фактическое пространственное положение и геометрические параметры. Она позволяет выявить отклонения стенки от вертикали, а также провести детальный анализ высотных отметок днища.

Результаты эксперимента демонстрируют высокую степень соответствия с ранее разработанной теоретической моделью. Однако ряд наблюдаемых эффектов требует дополнительного анализа. В частности, выявленные отклонения на предельных значениях параметров могут быть связаны с несовершенством используемого оборудования или наличием внешних факторов, влияющих на систему.

Одним из ключевых аспектов является точность измерений. Несмотря на предпринятые меры по калибровке сенсоров, не исключено наличие незначительных систематических погрешностей, обусловленных как конструктивными особенностями приборов, так и влиянием внешней среды.

Выводы

Применение передовых технологий в области диагностики промышленных объектов позволяет значительно повысить уровень безопасности и надежности эксплуатации.

Проведенное исследование показало, что наземное лазерное сканирование (НЛС) является эффективным инструментом оценки технического состояния стенки стального резервуара.

Наземное лазерное сканирование представляет собой перспективный и переходный этап в области исследования вертикальных стальных резервуаров. Данный метод не только преодолевает недостатки традиционных подходов, но и предоставляет более полные и точные данные, необходимые для достоверной оценки технических и напряженно-деформированных состояний этих конструкций.

Методика позволяет всесторонне оценить совокупное влияние отклонений геометрии и положения стенки резервуара в процессе исследова-

ния на всей поверхности, в отличие от измерений только контрольных точек, используемых в стандартном подходе.

Использование НЛС целесообразно внедрять в практику мониторинга состояния резервуарных парков на промышленных объектах, особенно в условиях повышенных рисков эксплуатации.

Список источников

1. Кандаков, Г. П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения / Г. П. Кандаков. – Москва : Промышленное и гражданское строительство, 1998. – 223 с. – Текст : непосредственный.
2. 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.
3. Сальников, А. П. Оценка напряженно-деформированного состояния резервуаров по результатам наземного лазерного сканирования : специальность: 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сальников Антон Павлович. – Москва, 2016. – 26 с. – Место защиты: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина. – Текст : непосредственный.
4. Кошан, Е. К. Возможности, преимущества и недостатки наземного лазерного сканирования / Е. К. Кошан. – Текст : электронный // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – № 1. – С. 27–30. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-preimuschestva-i-nedostatki-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniya>.
5. Пат. 2 597 958 С2 Российская Федерация, МПК G01C 1/00. Способ определения величины и направления крена резервуара вертикального цилиндрического: № 2014152427/28: заявл. 23.12.2014; опубл. 20.09.2016 / Середович В. А., Середович А. В., Иванов А. В., Ткачева Г. Н.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (ФГБОУ ВО «СГУГИТ»). – Текст : непосредственный.
6. Пат. 2 572 502 С1 Российская Федерация, МПК G01F 17/00 (2006.01). Способ определения величины отклонения образующих стенок резервуара вертикального цилиндрического от вертикали: № 2014142865/28 заявл. 23.10.2014, опубл. 10.01.2016 / Середович В. А., Середович А. В., Иванов А. В., Ткачева Г. Н.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (ФГБОУ ВО «СГУГИТ»). – Текст : непосредственный.

References

1. Kandakov, G. P. (1998). Problemy otechestvennogo rezervuarostroeniya i vozmozhnye puti ikh resheniya/ Moscow. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo Publ., p. 223. (In Russian).
2. 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).
3. Sal'nikov, A. P. (2016). Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya re-zervuarov po rezul'tatam nazemnogo lazernogo skanirovaniya. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 26 p. (In Russian).

4. Koshan, Ye. K. (2017). Possibilities, advantages and disadvantages of surface laser scanning. *Interesko Geo-Sibir*, 9 (1), pp. 27-30. (In Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-preimushchestva-i-nedostatki-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniya>.
5. Seredovich V. A., Seredovich A. V., Ivanov A. V., & Tkacheva G. N. Sposob opredeleniya velichiny i napravleniya krena rezervuara vertikal'nogo tsilindricheskogo. Pat. RF 2 597 958 C2. No 2014152427/28. Applied: 23.12.2014. Published: 20.09.2016. (In Russian).
6. Seredovich V. A., Seredovich A. V., Ivanov A. V., & Tkacheva G. N. Sposob opredeleniya velichiny otkloneniya obrazuyushchikh stenok rezervuara vertikal'nogo tsilindricheskogo ot vertikali. Pat. RF 2 572 502 C1. No 2014142865/28. Applied: 23.10.2014. Published: 10.01.2016. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Ганиев Таир Айратович, руководитель группы 3D-сканирования специального конструкторско-технологического бюро, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск, t.ganievt@agni-rt.ru

Миннихметов Тимур Булатович, инженер группы 3D-сканирования специального конструкторско-технологического бюро, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск

Сабанов Сергей Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск

Малышева Анастасия Владимировна, студент, член рабочей группы 3D-сканирования специального конструкторско-технологического бюро, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск

Tair A. Ganiev, Head of the 3D Scanning Group of the Special Design and Technology Bureau, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almet'yevsk, t.ganievt@agni-rt.ru

Timur B. Minniakhmetov, Engineer of the 3D Scanning Group of the Special Design and Technology Bureau, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almet'yevsk

Sergey L. Sabanov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Equipment and Mechanical Engineering Technology, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almet'yevsk

Anastasia V. Malysheva, Student, Member of the 3D Scanning Working Group of the Special Design and Technology Bureau, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Oil", Almet'yevsk

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 11.03.2025; принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 11.03.2025; accepted for publication 20.03.2025.