Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 109–116. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 6, P. 109–116. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 620.194.22

doi: 10.17122/ngdelo-2021-6-109-116

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ НА ФРАГМЕНТЕ ГАЗОПРОВОДА С ТРЕЩИНОЙ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ

Влада Николаевна Ильина¹, Виктория Александровна Гафарова¹,
Степан Викторович Ильин^{1,2}, Дарья Николаевна Московкина¹,
Искандер Рустемович Кузеев¹, Дмитрий Ефимович Бугай¹,
Резеда Рафисовна Тляшева¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²ООО НПФ «Пакер», Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку

Влада Николаевна Ильина, moskovkina.vlada@mail.ru

Аннотация. По статистике количество аварий магистральных газопроводов составляет более 30 в год, и половина из них происходит по причине наружной коррозии, в том числе коррозионного растрескивания под напряжением. Огромная протяженность трубопроводных сетей и необходимость больших денежных вложений не позволяют осуществить капитальный ремонт и реконструкцию всех устаревших газопроводов. Однако эксплуатация трубопроводов с трещинами повышает риски аварий, и в связи с этим предлагается использовать композиционные материалы для заполнения полости трещин. Если длина обнаруженной трещины меньше критической длины, то такая трещина называется докритической. Она находится в латентном состоянии и может увеличиваться только за счет сверхкритической нагрузки. Такие трещины можно заполнить композитным материалом, укрепить ее берега и продолжать эксплуатировать оборудование. Актуальность такого подхода возрастает в связи с принятием нормативных документов в ряде промышленно развитых стран, в том числе и в России, регламентирующих работу трубопроводных систем с трещинами. При заполнении трещин важно, чтобы когезионная прочность композиционного материала была соизмерима с адгезионной прочностью контакта с металлической поверхностью. Для расчета адгезионной прочности необходимо знать распределение поверхностной энергии в металле реальных конструкций. Поэтому изучение распределения поверхностной энергии на поверхности трубных образцов является актуальной задачей. В данной работе проводилось исследование распределения поверхностной энергии на фрагменте реального трубопровода с расположением трещин в области продольного сварного шва. Показано, что сварное соединение обладает минимальной поверхностной составляющей энергии, поскольку в объеме сварного шва концентрация энергии высокая, на что указывает более сложное строение металла, наличие дендритных структур, микропор. Чем дальше от сварного шва, тем больше значение поверхностной энергии. Предполагается, что при образовании трещины появляется дополнительная поверхность и энергия перераспределяется.

Для цитирования

Ильина В.Н., Гафарова В.А., Ильин С.В., Московкина Д.Н., Кузеев И.Р., Бугай Д.Е., Тляшева Р.Р. Распределение поверхностной энергии на фрагменте газопровода с трещиной в сварном соединении // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 109–116. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-109-116>.

© Ильина В.Н., Гафарова В.А., Ильин С.В., Московкина Д.Н., Кузеев И.Р., Бугай Д.Е., Тляшева Р.Р., 2021

Ключевые слова

трещины,
композиционный материал,
прочность, долговечность,
живучесть,
поверхностная энергия,
коррозионное растрескивание
под напряжением

Original article

SURFACE ENERGY PARTITION IN A GAS PIPELINE FRAGMENT WITH A CRACK IN THE WELDED JOINT

Vlada N. Ilyina¹, Victoria A. Gafarova¹, Stepan V. Ilyin^{1,2}, Daria N. Moskovkina¹, Iskander R. Kuzeev¹, Dmitriy E. Bugai¹, Rezeda R. Tlyasheva¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²SPF «Paker» LLC, Ufa, Russia

Corresponding author

Vlada N. Ilyina, moskovkina.vlada@mail.ru

Abstract. The statistics says, the number of emergencies in the main gas pipelines is over 30 annually. A half of them is caused by external corrosion, including stress corrosion cracking. The pipeline network is long, and it is costly to conduct a major repair on it and restore all the outdated gas pipelines. However, operation of cracked pipelines may increase the risk of emergencies, therefore, it is suggested to use composite materials to fill in the crack cavities with. If the length of the detected crack is shorter than the critical value, such a crack is called undercritical. It is in a latent state and can expand only due to supercritical stress. These cracks can be filled with a composite material; the material seals the edges of the crack and allows further operation of the equipment. Such an approach is increasingly relevant due to adopted regulatory documents in a number of industrially developed states including Russia. These documents outline the standards for operation of cracked systems. When filling in the cracks, it is vital to make sure that the cohesion strength of the composite material is comparable with the adhesion strength of the contact with the metal surface. To define the adhesion strength, it is necessary to know the surface energy partition in the metal of the real structures. Therefore, it is urgent to study the surface energy partition on the surface of pipe samples. This thesis included a research of the surface energy partition in a fragment of a real pipeline with cracks around the longitudinal welded joint. It is shown that the welded joint has a minimum surface energy, because the energy concentration is high in the welded joint. This indicates a more complicated structure of the metal and that there are dendritic structure and micropores. The farther from the welded joint, the higher the surface energy value is. It is assumed that when cracks occur, additional surfaces appear and the energy is redistributed upon them.

Keywords

cracks, composite material, strength, longevity, durability, surface energy, stress corrosion cracking

For citation

Ilyina V.N., Gafarova V.A., Ilyin S.V., Moskovkina D.N., Kuzeev I.R., Bugai D.E., Tlyasheva R.R. Raspredelenie poverkhnostnoi energii na fragmente gazoprovoda s treshchinoi v svarnom soedinenii [Surface Energy Partition in a Gas Pipeline Fragment with a Crack in the Welded Joint]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 6, pp. 109–116. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-109-116>.

В работе [1] представлены сведения о том, что удельный показатель аварийности на линейной части газопроводов в настоящее время составляет 0,02 % аварий в год на 100 км труб. С учетом общей длины газопроводов, которая превышает 170×10^3 км, это более 30 аварий. Количество аварий увеличивается, поскольку возраст газопроводов увеличивается, и половина их проработала уже более 30 лет. Одной из основных причин отказов магистральных газопроводов является наружная коррозия, в том числе коррозионное растрескивание под

напряжением [2, 3]. Более 50 % аварий происходит именно из-за этой причины [4].

Большой износ газопроводов требует осуществления капитального ремонта и реконструкции всех устаревших стальных трубопроводов. Однако это практически невозможно по причине огромной протяженности трубопроводных сетей и необходимости привлечения больших капитальных вложений, что снижает рентабельность системы транспорта. С другой стороны, работа трубопроводов с трещинами повышает риски аварий, и в связи

с этим предлагается использовать композиционные материалы для заполнения полости трещин [5–7]. При заполнении трещин важно соблюсти соотношения некоторых факторов: композиционный материал должен обладать текучестью после формования, достаточной для течения в узких щелях, а после затвердевания прочностные и пластические свойства материала должны обеспечить скрепление берегов трещины. И, наконец, когезионная прочность композиционного материала должна быть одного порядка величины с адгезионной прочностью контакта с металлической поверхностью. Для расчета адгезионной прочности необходимо знать распределение поверхностной энергии в металле реальных конструкций. Поэтому изучения распределения поверхностной энергии на поверхности трубных образцов является актуальной задачей.

В работе [8] установлено, что:

— с повышением уровня накопленных усталостных повреждений в стальных образцах поверхностная энергия увеличивается;

— уменьшение толщины стальной пластины приводит к уменьшению поверхностной энергии.

Аналогичные данные опубликованы в работах [9, 10], где указывается на связь между объемными и поверхностными свойствами стальных объектов при определении удельной работы разрушения.

Поскольку газопроводы работают в условиях нестационарности рабочих параметров и внешних условий, накопленные повреждения могут носить усталостный характер.

Экспериментальная часть

В данной работе проводилось исследование распределения поверхностной энергии на фрагменте реального трубопровода с расположением трещин в области продольного сварного шва.

Термин «поверхностная энергия» означает удельную свободную энергию, избыточную по сравнению с энергией в объеме, на границе раздела фаз [8].

В объемной форме материала атомы, как правило, стабильны и имеют сбалансированный набор связей и взаимодействий. Напротив, поверхностные атомы будут иметь неполный, несбалансированный набор взаимодействий и, следовательно, иметь нереализованную энергию связи. Поверхностная энергия — это относительное измерение энер-

гии на поверхности, которая является результатом этой неполной связи. Она положительно коррелирует с силой объемных взаимодействий и уровнем поверхностного воздействия. Следовательно, поверхностная энергия будет выше, если объемные взаимодействия сильнее или если воздействие на поверхность больше.

Поверхностная энергия обычно измеряется косвенно с помощью измерения угла смачивания по методике Е.Д. Щукина:

$$F_s = \sigma_{\text{тж}} \cdot S, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{тж}}$ — поверхностное натяжение «твердое тело — жидкость», Дж/м²;

S — площадь контакта с твердой поверхностью, м².

$$\sigma_{\text{тж}} = \sigma_{\text{тг}} - \sigma_{\text{жг}} \cos \theta, \quad (2)$$

где θ — краевой угол смачивания;

$\sigma_{\text{тг}}$ — поверхностное натяжение «твердое тело — газ», Дж/м²;

$\sigma_{\text{жг}}$ — поверхностное натяжение «жидкость — газ», Дж/м².

Для проведения исследований был взят фрагмент трубы (Харцизская труба марки Х70) диаметром $D = 1420$ мм, который был вырезан с 17 до 19 ч с нижней образующей трубы.

Для наглядного представления дефектов на поверхности образца была проведена цветная дефектоскопия, методика проведения которой состоит из следующих пунктов.

1. Все загрязняющие вещества (масла, ржавчина) должны быть удалены с контролируемого участка. Для лучшего проникновения пенетранта в полости дефектов ее очищают водой или очистителем. После этого поверхность высушивается, чтобы внутри дефекта не оставалось воды или очистителя (рисунок 1, а).

2. Пенетрант наносится на поверхность путем распыления на расстоянии 30 см от поверхности образца (рисунок 1, б).

3. Избыток пенетранта удаляется протиркой салфеткой, промыванием водой или тем же очистителем, который используется на стадии предварительной очистки поверхности. При этом пенетрант должен быть удален только с поверхности контроля, но никак не из полости дефекта. Затем поверхность высушивается салфеткой без ворса или струей воздуха (рисунок 1, в).

4. Сразу же после просушки на поверхность контроля тонким ровным слоем наносится проявитель, который вытягивает краси-

тель из полости дефекта на поверхность (рисунок 1, *d*).

5. Выявление имеющихся дефектов происходит непосредственно после окончания процесса проявки. При контроле выявляются и регистрируются индикаторные следы. Интенсивность окраски говорит о глубине и ширине раскрытия дефекта — чем бледнее

окраска, тем дефект мельче. Интенсивную окраску имеют глубокие трещины. После проведения контроля проявитель удаляется водой или очистителем.

В результате проведенной цветной дефектоскопии была выявлена трещина, изображенная на рисунке 2.

Рисунок 1. Этапы проведения цветной дефектоскопии

Figure 1. Stages of color flaw detection

Рисунок 2. Выявление дефектов

Figure 2. Defect detection

После проведения цветной дефектоскопии на образец с внешней стороны была нанесена разметка, разделяющая образец на клетки размером 2×2 см, для исследования поверхностной энергии, в результате чего была получена сетка из 240 квадратов. На рисунке 3 показан общий вид фрагмента трубы.

Рисунок 3. Общий вид фрагмента трубы после деления его на области для исследования размером 2×2 см

Figure 3. General view of a pipe fragment after dividing it into areas 2×2 cm for research

В каждой клетке методом стоячей капли измерено значение поверхностной энергии. Камера была зафиксирована напротив пластины на уровне капли и перемещалась с продвижением пипетки.

Для точного дозирования капля дистиллированной воды использовалась одноканальная автоматическая пипетка Ленпипет, объем капли составлял 15 мг.

Эксперимент проводился по следующему алгоритму:

1. Клетка протирается спиртом и высушивается;
2. Пипеткой с точной дозировкой всасывается необходимое количество дистиллированной воды;
3. Находясь над клеткой, капля дистиллированной воды выталкивается нажатием кнопки;
4. Проводится фотосъемка полученной капли на поверхности образца.

В результате были получены 720 фотографий. Далее проводилась обработка фотографий в программе Компас 3D для получения геометрических параметров капли, необходимых для расчета поверхностной энергии: высоты капли — H , диаметра капли — d и сантиметра на линейке — $h_{\text{факт}}$ (рисунок 4).

Рисунок 4. Обработанная фотография капли

Figure 4. Processed photograph of a drop

Так как измерения производились в программе Компас 3D, значения геометрических размеров капли и исходного 1 см линейки ($h_{исх}$) были получены с точностью $\pm 0,01$. Поверхностная энергия определялась в зависимости от этих данных, следовательно, ее точность также равна $\pm 0,01$.

По полученным размерам капли с учетом масштабного коэффициента ($K_y = h_{исх}/h_{факт}$) определялась поверхностная энергия F_s (измеряемая в микроджоулях) по методике Е.Д. Щукина.

На основе полученных значений поверхностной энергии была создана карта дефектов путем нанесения полученных значений поверх-

ностной энергии на фото образца после проведения цветной дефектоскопии (рисунок 5).

Сварной шов выделен на рисунке черным цветом, а область трещины — красным. Все значения поверхностной энергии, представленной на рисунке 5, измеряются в микроджоулях.

Анализ распределения поверхностной энергии с внешней стороны темплета с дефектом проводили исходя из концепции, по которой общая энергия, запасенная твердым телом, распределяется на объемную и поверхностную части. При этом изменение объемной энергии приводит к изменению поверхностной [11]. С этой точки зрения сварное соединение обладает минимальной поверхностной составляющей, поскольку в объеме сварного шва концентрация энергии высокая, на что указывает более сложное строение металла, наличие дендритных структур, микропор. Авторы считают, что при образовании трещины появляется дополнительная поверхность, и энергия перераспределяется. Чем дальше от сварного шва, тем больше значение поверхностной энергии.

На следующей стадии исследований будет изучена структура сварного соединения и основного металла, что позволит получить дополнительные сведения о распределении энергии в металле в области дефекта.

Рисунок 5. Распределение поверхностной энергии на внешней стороне фрагмента трубопровода

Figure 5. Distribution of surface energy on the outer side of a pipeline fragment

Вывод

Таким образом, показано, что сварное соединение обладает минимальной поверхностной составляющей энергии, поскольку в объеме сварного шва концентрация энергии высокая, на что указывает более сложное строение металла, наличие дендритных структур, микропор. Чем дальше от сварного шва, тем больше значение поверхностной энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колесников Д.А. Методика мониторинга пожаро-взрывобезопасности линейной части магистральных газопроводов дис. ... канд. техн. наук. СПб.: 2020. 169 с.
2. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Statistic Analyze of Stress-Corrosion Cracks on the Main Gas Pipeline Section // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. Chapter 3. Article Number 042009. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042009.
3. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Study of Possibility of Stress-Corrosion Cracks Group Resolution by Eddy-Current Flaw Detector // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. Chapter 3. Article Number 042010. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042010.
4. Сунагатов М.Ф., Климов П.В., Гумеров А.К., Шафиков Р.Р. Стресс-коррозия на магистральных газопроводах и человеческий фактор // Территория «Нефтегаз». 2010. № 8. С. 32-36.
5. Тляшева Р.Р., Гафарова В.А., Вагазова К.Р., Кузеев А.М. Композиционный материал для заполнения полости трещин и трещиноподобных дефектов // Башкирский химический журнал. 2016. Т. 23. № 3. С. 56-62.
6. Гафарова В.А. Применение композиционных материалов для сдерживания роста трещин в нефтегазовом оборудовании // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 5. С. 99-107. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-99-107.
7. Гафарова В.А. Материалы и способ заделки трещин в нефтегазовом оборудовании в межремонтный период эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. 145 с.
8. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Савичева Ю.Н., Попова С.В. Поверхность и поверхностные явления. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2008. 144 с.
9. Гафарова В.А., Хасанов Р.Н., Пивоваров В.Ю., Кузеев И.Р. Особенности разрушения тонких стальных образцов при растяжении // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 2. С. 94-111. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2019/ogbus_2_2019_p94-111.pdf (дата обращения: 16.09.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-94-111.
10. Гафарова В.А., Хасанов Р.Н., Пивоваров В.Ю., Кузеев И.Р. Использование компактных образцов при анализе причин разрушения компенсатора // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 3. С. 31-45. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2019/ogbus_3_2019_p31-45.pdf (дата обращения: 16.09.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2019-3-31-45.
11. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Gafarova V.A., Schipachev A.M., Sandakov V.A. The Methodology of the Determination of Accumulated Damage Level and Achievement of the Limit State in Ferromagnetic Steel Structures // Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research: Proceedings of the International Symposium (ISEES 2018). Grozny, Russia. 2018. Vol. 177. P. 189-197. DOI: 10.2991/isees-18.2018.37.

REFERENCES

1. Kolesnikov D.A. *Metodika monitoringa požarovzryvobezопасnosti lineinoi chasti magistral'nykh gazoprovodov dis. kand. tekhn. nauk* [Methods for Monitoring Fire and Explosion Safety of the Linear Part of Main Gas Pipelines: Cand. Engin. Sci. Diss.]. St. Petersburg, 2020. 169 p. [in Russian].
2. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Statistic Analyze of Stress-Corrosion Cracks on the Main Gas Pipeline Section. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 459, Chapter 3, Article Number 042009. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042009.
3. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Study of Possibility of Stress-Corrosion Cracks Group Resolution by Eddy-Current Flaw Detector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 459, Chapter 3, Article Number 042010. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042010.
4. Sunagatov M.F., Klimov P.V., Gumerov A.K., Shafikov R.R. Stress-korroziya na magistral'nykh gazoprovodakh i chelovecheskii faktor [Stress Corrosion on Gas Pipelines and the Human Factor]. *Territoriya «Neftegaz» — Oil and Gas Territory*, 2010, No. 8, pp. 32-36. [in Russian].
5. Tlyasheva R.R., Gafarova V.A., Vagazova K.R., Kuzeev A.M. Kompozitsionnyi material dlya zapolneniya polosti treshchin i treshchinopodobnykh defektov [Composite Material for Filling Crack and Crack-Like Defects Cavities]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal — Bashkir Chemical Journal*, 2016, Vol. 23, No. 3, pp. 56-62. [in Russian].
6. Gafarova V.A. Primenenie kompozitsionnykh materialov dlya sderzhivaniya rosta treshchin v neftegazovom oborudovanii [Application of Composite Materials for Fracture Growth Control in Oil and Gas Equipment]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 5, pp. 99-107. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-99-107. [in Russian].
7. Gafarova V.A. *Materialy i sposob zadelki treshchin v neftegazovom oborudovanii v mezhremontnyi period ekspluatatsii: dis. kand. tekhn. nauk* [Materials and Method of Sealing Cracks in Oil and Gas Equipment During the Overhaul Period: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2019. 145 p. [in Russian].
8. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Savicheva Yu.N., Popova S.V. *Poverkhnost' i poverkhnostnye yavleniya* [Surface and Surface Phenomena]. Ufa, UGNTU Publ., 2008. 144 p. [in Russian].
9. Gafarova V.A., Khasanov R.N., Pivovarov V.Yu., Kuzeev I.R. Osobennosti razrusheniya tonkikh stal'nykh obraztsov pri rastyazhenii [Peculiarities of Thin Steel Specimens Fracture Under Tension]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» — Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 2, pp. 94-111. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2019/ogbus_2_2019_p94-111.pdf (accessed 16.09.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-94-111. [in Russian].

10. Gafarova V.A., Khasanov R.N., Pivovarov V.Yu., Kuzeev I.R. Ispol'zovanie kompaktnykh obraztsov pri analize prichin razrusheniya kompensatora [Compact Specimens Use in Compensator Destruction Causes Analysis]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» — Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 3, pp. 31-45. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2019/ogbus_3_2019_p31-45.pdf (accessed 16.09.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2019-3-31-45. [in Russian].

11. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Gafarova V.A., Schipachev A.M., Sandakov V.A. The Methodology of the Determination of Accumulated Damage Level and Achievement of the Limit State in Ferromagnetic Steel Structures. *Proceedings of the International Symposium (ISEES 2018) «Engineering and Earth Sciences Applied and Fundamental Research»*. Grozny, Russia, 2018, Vol. 177, pp. 189-197. DOI: 10.2991/isees-18.2018.37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ильина Влада Николаевна, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Vlada N. Ilyina, Post-Graduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia
moskovkina.vlada@mail.ru

Гафарова Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Victoria A. Gafarova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia
gafarova.vika@bk.ru

Ильин Степан Викторович, ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, инженер-конструктор ООО НПФ «Пакер», Уфа, Россия

Stepan V. Ilyin, Assistant of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Engineer-Constructor, SPF «Paker» LLC, Ufa, Russia
stephan91@mail.ru

Московкина Дарья Николаевна, студент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Daria N. Moskovkina, Student of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia

Кузеев Искандер Рустемович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia
kuzeev2002@mail.ru

Бугай Дмитрий Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и защита от коррозии», УГНТУ, Уфа, Россия

Dmitry E. Bugai, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Materials and Corrosion Protection Department, USPTU, Ufa, Russia
debugai@mail.ru

Тляшева Резеда Рафисовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Rezeda R. Tlyasheva, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia
mfugntu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.07.2021; одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 26.07.2021; approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.11.2021.