

УДК 621.793.7

Х. А. Бабаханова¹, А. А. Саодатов², И. Г. Громыко³¹Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности (Республика Узбекистан)²Наманганский государственный технический университет (Республика Узбекистан)³Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НОЖЕВОЙ ГАРНИТУРЫ РАЗМАЛЫВАЮЩИХ МАШИН

В статье исследовано применение дробеструйной обработки для повышения эксплуатационных характеристик ножевой гарнитуры размалывающих машин. Твердость рабочих поверхностей ножевой гарнитуры является важным параметром, определяющим ее износостойкость и эффективность при размоле волокнистых материалов, срок службы которых в зависимости от условий эксплуатации варьируется от двух недель до полутора лет и определяется износостойкостью. По мере износа кромки затупляются, глубина канавок уменьшается, что снижает эффективность размола и производительность мельницы. Износ приводит к изменению геометрии ножей и уменьшению их динамического воздействия на волокнистый материал. В этом контексте актуальным представляется использование дробеструйной обработки для упрочнения ножевой гарнитуры размалывающих машин. Исследованы изменения твердости поверхности гарнитуры до и после дробеструйной обработки с применением мобильного твердомера. Установлено, что в результате дробеструйного упрочнения средняя твердость никель-алюминиевого сплава увеличивается на 33%, достигая значения HRC 54. Выявлено, что формирование наклепанного слоя способствует повышению износостойкости и увеличению срока службы рабочих элементов. В результате обоснована перспективность использования данного метода для повышения надежности и долговечности оборудования без существенного усложнения технологии изготовления.

Ключевые слова: дробеструйная обработка, упрочнение, ножевые диски, размалывающая машина, твердость, износостойкость, эксплуатационные характеристики.

Для цитирования: Бабаханова Х. А., Саодатов А. А., Громыко И. Г. Применение дробеструйной обработки для повышения эксплуатационных характеристик ножевой гарнитуры размалывающих машин // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт-и медиатехнологии. 2026. № 1 (303). С. 16–22.

DOI: 10.52065/2520-6729-2026-303-2.

Kh. A. Babakhanova¹, A. A. Saodatov², I. G. Gromyko³¹Tashkent Institute of Textile and Light Industry (Republic of Uzbekistan)²Namangan State Technical University (Republic of Uzbekistan)³Belarusian State Technological University

APPLICATION OF SHOT BLASTING TO IMPROVE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF KNIFE ASSEMBLIES IN CRUSHING MACHINES

The article examines the use of shot blasting to improve the operational characteristics of the knife assemblies of grinding machines. The hardness of the working surfaces of the knife assembly is an important parameter that determines its wear resistance and efficiency in grinding fibrous materials. Their service life, depending on operating conditions, ranges from two weeks to one and a half years and is determined by wear resistance. As the edges wear down, the grooves become shallower, which reduces grinding efficiency and mill productivity. Wear leads to changes in the geometry of the knives and decreases their dynamic impact on the fibrous material. In this context, the use of shot blasting to strengthen the knife assemblies of grinding machines seems relevant. The changes in surface hardness of the assemblies before and after shot blasting were studied using a portable hardness tester. It has been established that as a result of shot peening, the average hardness of the nickel-aluminum alloy increases by 33%, reaching a value of HRC 54. It has been found that the formation of a work-hardened layer contributes to increased wear resistance and extends the service life of working components. As a result, the feasibility of using this method to enhance the reliability and durability of equipment without significantly complicating the manufacturing technology has been substantiated.

Keywords: shot blasting, strengthening, knife discs, grinding machine, hardness, wear resistance, performance characteristics.

For citation: Babakhanova Kh. A., Saodatov A. A., Gromyko I. G. Application of shot blasting to improve the performance characteristics of knife assemblies in crushing machines. *Proceedings of BSTU, issue 4, Print- and Mediatechnologies*, 2026, no. 1 (303), pp. 16–22 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6729-2026-303-2.

Введение. В современном целлюлозно-бумажном производстве изменяются технологии приготовления бумажной массы и предъявляются более высокие требования к сырью и готовой продукции. Ключевым этапом остается размол волокнистых материалов, от которого зависят основные свойства бумаги. Наиболее эффективны на этом этапе ножевые размалывающие машины, обеспечивающие необходимое механическое воздействие на волокна [1–3].

Волокнистая масса в виде водной суспензии в ножевых размалывающих машинах подвергается силовому воздействию при прохождении между ножами, одна из них неподвижная (статор), другая – подвижная, закреплена на вращающем диске (роторе). В результате волокна вытягиваются, расщепляются (фибриллируются) и частично укорачиваются.

Основная часть. Длина и доля срезанного (рубленного) волокна регулируются рядом технологических параметров, таких как продолжительность обработки, тип исходного волокнистого материала, концентрация суспензии, величина зазора между ножами и удельное давление в зоне размола. Однако одним из ключевых факторов, определяющих качество помола в ножевых размалывающих машинах, помимо вышеуказанных параметров, является характер распределения усилия, возникающего как на режущих кромках ножевой гарнитуры, так и на поверхностях сопряжения при пересечении ножей ротора и статора в процессе их относительного движения. Распределение этих усилий в значительной степени определяется взаимным расположением ножей ротора и статора. Согласно данным источника [4], наибольшая интенсивность механического воздействия достигается в условиях, когда угол скрещивания между рабочими поверхностями ножей при их контакте стремится к нулю, т. е. при максимально близком к параллельному направлению пересечения режущих кромок.

Эффективность процесса размола волокнистого материала во многом определяется величиной зазора между рабочими поверхностями ротора и статора, который, как правило, составляет десятые доли миллиметра и варьируется в зависимости от ряда факторов: концентрации волокнистой массы, окружной скорости вращения ротора, а также деформаций элементов размалывающей системы. Так, например, при размолу волокнистой суспензии с низкой концентрацией (5–6%) оптимальный рабочий зазор между ротором и статором составляет до 0,5 мм [5–7].

Наиболее значимыми конструктивными параметрами ножевой гарнитуры, оказывающими влияние на эффективность процесса размола, являются толщина ножей, расстояние между ними, углы наклона ножей относительно радиуса диска, а также наличие и конфигурация перегородок в канале между ножами. Эти элементы определяют характер механического воздействия на волокнистый материал и, соответственно, степень фибриллизации и диспергирования волокон. В качестве материала для изготовления ножевой гарнитуры применяются коррозионностойкие и износостойкие сплавы – нержавеющая сталь или специальный чугун с добавками хрома, что обусловлено агрессивной средой водной волокнистой суспензии.

Твердость рабочих поверхностей ножевой гарнитуры является важным параметром, определяющим ее износостойкость и эффективность при размолу волокнистых материалов. Так, для стальной гарнитуры твердость составляет HRC 45–52, а для элементов, изготовленных из отбеленного чугуна, – в пределах HB 380–420. При этом материал ротора должен иметь твердость, превышающую твердость материала статора на 5–10 единиц по

шкале Роквелла (HRC), что обеспечивает преимущество в износостойкости вращающихся элементов. Твердость и марка инструментального материала варьируются в зависимости от характеристик размалываемого волокнистого сырья. Например, для обработки прочной сульфатной целлюлозы применяются ножи из твердой хромоникелевой стали с твердостью HB 350–370. Для менее прочных волокнистых материалов используют стальные ножи с твердостью HB 225–275. Ножи из марганцовистой стали и фосфористой бронзы с твердостью HB 180–225 применяются, как правило, для рафинирующего и фибриллирующего размола, когда требуется минимальное укорочение волокон [8].

Для сопоставления твердости инструментальных материалов, измеренной различными методами (по Бринеллю и Роквеллу), используется соотношение: $1 \text{ HRC} \approx 10 \text{ HB}$ [9].

Ножи размалывающих машин должны обладать высокой твердостью, прочностью, износостойкостью и ударной прочностью. Срок их службы в зависимости от условий эксплуатации варьируется от двух недель до полутора лет и определяется износостойкостью. По мере износа кромки затупляются, глубина канавок уменьшается, что снижает эффективность размола и производительность мельницы. Износ приводит к изменению геометрии ножей и уменьшению их динамического воздействия на волокнистый материал. Для поддержания режущих кромок иногда применяют реверс вращения дисков, а при сильном износе углубляют канавки проточкой или заменяют сегменты [10].

В настоящее время для повышения прочности и износостойкости деталей и конструкций используются различные методы ударного поверхностного пластического деформирования, такие как чеканка, обработка дробью, виброударная, ультразвуковая и центробежно-ударная обработка.

Обработка дробью представляет собой технологический процесс, направленный на увеличение срока службы узлов и деталей, работающих в условиях интенсивных нагрузок. Этот метод эффективно предотвращает развитие трещин, возникающих под воздействием циклических напряжений, вибраций, износа и коррозии. Дробеструйная обработка (наклеп) осуществляется за счет кинетической энергии потока дроби (чугунной, стальной или иной), направляемого, например, с помощью роторного дробемета (рис. 1).

В механических дробеметах дробь выбрасывается вращающимся с высокой скоростью барабаном, тогда как в пневматических установках – струей сжатого воздуха под давлением 0,5–0,6 МПа. Как показано на рис. 1, а, дробь 2 поступает во входящий поток воздуха, вытекающего из сопла 1, захватывается им и смешивается в зоне сопла-смесителя 3, где происходит ускорение и формирование направленного потока. Сформированный поток дроби далее перемещается вместе с воздушным потоком на расстояние L до обрабатываемой поверхности 4, обеспечивая воздействие на материал. Рекомендуемые параметры дробеструйной обработки: скорость полета дроби 60–100 м/с, продолжительность обработки 3–10 мин. К числу основных преимуществ данного метода относятся увеличение микротвердости поверхностного слоя до 30% без существенного изменения шероховатости, формирование наклепанного слоя глубиной до 1 мм с деформацией 20–40%, генерация сжимающих остаточных напряжений, достигающих 900 МПа [11].

При дробеструйной обработке деталей в качестве абразивного материала используется стальная или чугунная дробь диаметром 0,5–1,5 мм. Основными управляемыми параметрами процесса выступают скорость потока дроби (в пределах 7–80 м/с), диаметр частиц, угол атаки, расстояние до обрабатываемой поверхности и продолжительность воздействия.

Исследованию дробеструйной обработки посвящен ряд научных работ [12–15], в которых подробно рассматриваются физическая природа процесса, его основные закономерности, а также области рационального применения, в частности как эффективного средства повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин. В этом контексте актуальным представляется использование дробеструйной обработки для упрочнения ножевой гарнитуры размалывающих машин.

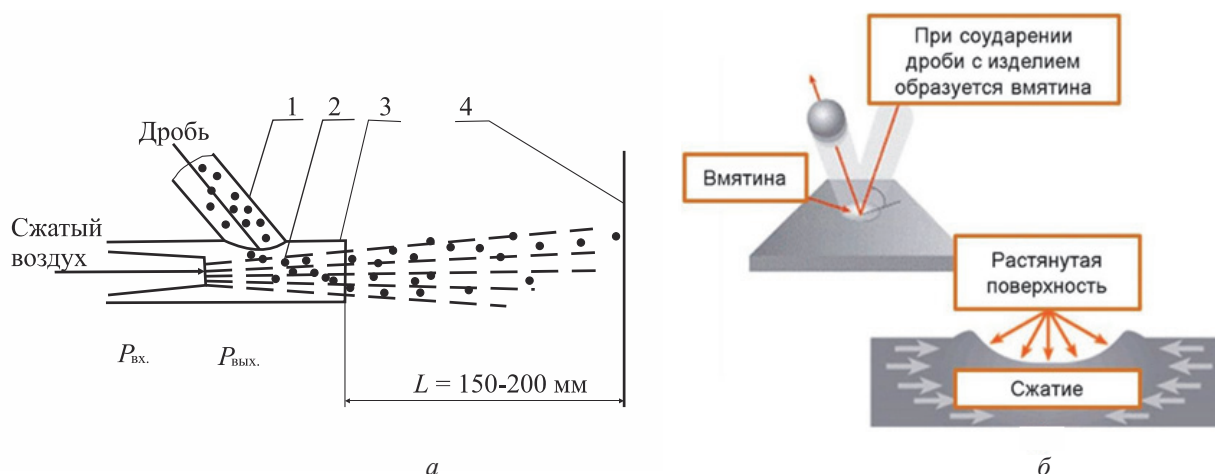


Рис. 1. Технологический процесс обработки дробью:

a – дробеструйная обработка:

1 – сопло; 2 – дробь; 3 – сопло-смеситель; 4 – обрабатываемая поверхность;

б – процесс формирования упрочняющего слоя

Целью настоящей работы является исследование влияния метода дробеструйной обработки на поверхностные и прочностные характеристики ножевой гарнитуры размалывающей машины.

Объектом исследования выбрана гарнитура диаметром 450 мм с прямолинейными ножами шириной 5 мм и равномерным их распределением по рабочей поверхности (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид гарнитуры с прямолинейными ножами и равномерным распределением

Для проведения механической обработки ножевой гарнитуры из никель-алюминиевого сплава применялась стандартная дробеструйная камера, предназначенная для легкой абразивной обработки: очистки поверхностей, матирования стекла, удаления лакокрасочных покрытий и др. Оборудование функционирует после подключения к источнику сжатого воздуха и электропитания, установки параметров давления абразивной струи и управляющего давления, а также активации работы через главный переключатель и ножную педаль.

Ножевая гарнитура размещалась внутри камеры на съемной ручной поворотной платформе. Оператор, используя встроенные защитные резиновые перчатки и осуществляя визуальный контроль через смотровое окно, выполнял обработку с помощью дробеструйного пистолета.

В качестве упрочняющего материала использовалась шарообразная металлическая дробь марки WS 170 с номинальным диаметром 0,5 мм (производства АО «Завод Стальной дробы», Россия). Подача дроби на поверхность ножевой гарнитуры осуществлялась через сопло под давлением сжатого воздуха.

Твердость поверхности ножевой гарнитуры до и после проведения механической обработки была измерена с применением мобильного твердомера. До обработки в десяти контрольных точках ножевой гарнитуры из никель-алюминиевого сплава были зафиксированы значения твердости в диапазоне HRC 33,5–46 при среднем значении HRC 40,8. Повторные измерения твердости в десяти контрольных точках ножевой гарнитуры показали, что твердость поверхности после дробеструйного упрочнения увеличилась на 33% и составила HRC 54. Такой рост указывает на эффективность применения дробеструйной обработки в качестве метода повышения износостойкости рабочих элементов размалывающего оборудования.

Выводы. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности использования дробеструйной обработки в качестве метода повышения эксплуатационных характеристик ножевой гарнитуры размалывающих машин. За счет формирования наклепанного поверхностного слоя, обладающего повышенной микротвердостью и сжимающими остаточными напряжениями, достигается существенное увеличение твердости материала: в среднем на 33%, с HRC 40,8 до HRC 54. Кроме того, дробеструйная обработка не оказывает негативного влияния на геометрию режущих элементов и сохраняет требуемую шероховатость поверхности, что особенно важно для прецизионных узлов. Повышение твердости способствует увеличению износостойкости ножей, снижению частоты обслуживания и, как следствие, повышению надежности и долговечности оборудования. Таким образом, дробеструйная обработка представляет собой перспективное технологическое решение для упрочнения ножевой гарнитуры, обеспечивая увеличение срока ее службы без необходимости изменения конструкции или применения более дорогостоящих материалов.

Список литературы

1. Вихарев С. Н. Повышение эффективности ножевых размалывающих машин в целлюлозно-бумажной промышленности на основе исследования динамики: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03. Екатеринбург, 2020. 40 с.
2. Жирнов Д. Н. Оптимизация процессов подготовки бумажной массы с использованием ключевых показателей эффективности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Архангельск, 2019. 20 с.
3. Гончаров В. Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03. Ленинград, 1990. 31 с.
4. Размол волокнистых материалов высокой концентрации в дисковой мельнице / А. В. Ушаков [и др.] // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. XXXVII, № 6. С. 471–474.
5. Петрова А. А., Алашкевич Ю. Д., Воронин И. А. Влияние рисунка комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на отдельные бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готового продукта // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 429–435.
6. Гончаров В. Н. Силовые факторы в процессе размола в дисковой мельнице // Бумажная промышленность. 1971. № 5. С. 12–14.
7. Вихарев С. Н. Разработка методов и средств виброзащиты и вибрационной диагностики дисковых мельниц: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Санкт-Петербург, 1993. 16 с.
8. Пашинский В. Ф. Машины для размола волокнистой массы. М.: Лесная промышленность, 1972. 160 с.

9. Демин П. П. Стойкость гарнитуры дисковых мельниц. М.: ВНИПИЭлеспром, 1972. 236 с.
10. Корда И., Либнар З., Прокоп И. Размол бумажной массы. М.: Лесная пром-сть, 1967. 421 с.
11. Степанова Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
12. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиностроения // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 1. С. 52–56.
13. Бобровский Н. М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Тольятти: Тольят. гос. ун-т, 2008. 141 с.
14. Попова В. В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка. М.: Машиностроение, 2013. 99 с.
15. Тамаркин М. А, Тищенко Э. Э, Лебеденко В. Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // Вестник ДГТУ. 2009. Т. 9, № 3 (42). С. 213–223.

References

1. Vikharev S. N. *Povysheniye effektivnosti nozhevykh razmalyvayushchikh mashin v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti na osnove issledovaniya dinamiki. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Improving the efficiency of knife refiner machines in the pulp and paper industry based on dynamics research. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Yekaterinburg, 2020. 40 p. (In Russian).
2. Zhirnov D. N. *Optimizatsiya protsessov podgotovki bumazhnoy massy s ispol'zovaniyem klyuchevykh pokazateley effektivnosti. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Optimization of pulp preparation processes using key performance indicators. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Arkhangel'sk, 2019. 20 p. (In Russian).
3. Goncharov V. N. *Teoreticheskiye osnovy razmola voloknistykh materialov v nozhevykh mashinakh. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Theoretical Foundations of Grinding Fibrous Materials in Cutter Machines. Abstract of thesis DSc (Engineering)]. Leningrad, 1990. 40 p. (In Russian).
4. Ushakov A. V., Alashkevich Yu. D., Kozhuhov V. A., Marchenko R. A. Grinding of high-concentration fibrous materials in a disc mill. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Coniferous forests of the boreal zone], 2019, vol. XXXVII, no. 6, pp. 471–474 (In Russian).
5. Petrova A. A., Alashkevich Yu. D., Voronin I. A. Influence of the design of a combined disc mill on certain papermaking properties of fibrous semi-finished products and the physical and mechanical characteristics of the finished product. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant materials], 2023, no. 4, pp. 429–435 (In Russian).
6. Goncharov V. N. Forces involved in the grinding process in a disc mill. *Bumazhnaya promyshlennost'* [Paper industry], 1971, no. 5, pp. 12–14 (In Russian).
7. Viharev S. N. *Razrabotka metodov i sredstv vibrozashchity i vibratsionnoy diagnostiki diskovykh mel'nits. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Development of methods and means of vibration protection and vibration diagnostics for disc mills. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Saint Petersburg, 1993. 16 p. (In Russian).
8. Pashinskiy V. F. *Mashiny dlya razmola voloknistoy massy* [Machines for grinding fibrous mass]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1972. 160 p. (In Russian).
9. Demin P. P. *Stoykost' garnitury diskovykh mel'nits* [Durability of disc mill assemblies]. Moscow, VNIPIElesprom Publ., 1972. 236 p. (In Russian).
10. Korda I., Libnar Z., Prokop I. *Razmol bumazhnoy massy* [Pulping of paper mass]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 421 p. (In Russian).

11. Stepanova T. Yu. *Tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniya detaley mashin* [Surface Hardening Technologies for Machine Parts]. Ivanovo, Ivanovskiy gosudarstvennyy khimiko-tekhnologicheskii universitet Publ., 2009. 64 p. (In Russian).

12. Rybakov G. M. Fundamental Principles of Quality Management in Shot Blasting of Machine Parts. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye* [News of Universities. Mechanical Engineering], 2006, no. 1, pp. 52–56 (In Russian).

13. Bobrovskiy N. M. *Razrabotka nauchnykh osnov protsessa obrabotki detaley poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniyem bez primeneniya smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostey* [Development of the scientific foundations of the process of machining parts by surface plastic deformation without the use of lubricants and cooling fluids]. Tolyatti, Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2008. 141 p. (In Russian).

14. Popova V. V. *Poverkhnostnoye plasticheskoye deformirovaniye i fiziko-khimicheskaya obrabotka* [Surface plastic deformation and physicochemical treatment]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2013. 99 p. (In Russian).

15. Tamarkin M. A, Tishchenko E. E, Lebeden'ko V. G. Improving the quality of the surface layer of parts through surface plastic deformation in flexible granular media. *Vestnik DGTU* [Bulletin of Dagestan State Technical University], 2009, vol. 9, no. 3 (42), pp. 213–223 (In Russian).

Информация об авторах

Бабаханова Халима Абишевна – доктор технических наук, профессор кафедры химической и полиграфической инженерии. Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности (ул. Шохжахон, 5, 100100, г. Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: halima300@inbox.ru. SPIN-код: 1132-6663. Scopus ID: 57201773008. ORCID: 0000-0002-6956-2824. ResearcherID: LZI-0942-2025.

Саодатов Азиз Азамжонович – докторант кафедры химической технологии. Наманганский государственный технический университет (ул. Касансай, 7, 160115, г. Наманган, Республика Узбекистан). E-mail: a.saodatov@mail.ru. Scopus ID: 58068239700.

Громыко Ирина Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полиграфических производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gromyko@belstu.by. SPIN-код: 3869-1433. ORCID: 0000-0002-0896-7262. ResearcherID: rid143948.

Information about the authors

Babakhanova Khalima Abishevna – DSc (Engineering), Professor, the Department of Chemical and Printing Engineering. Tashkent Institute of Textile and Light Industry (5 Shokhzakhon str., 100100, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: halima300@inbox.ru. SPIN code: 1132-6663. Scopus ID: 57201773008. ORCID: 0000-0002-6956-2824. ResearcherID: LZI-0942-2025

Saodatov Aziz Azamzhonovich – Post-doctoral student, the Department of Chemical Engineering. Namangan State Technical University (7 Kasansay str., 160115, Namangan, Republic of Uzbekistan). E-mail: a.saodatov@mail.ru. Scopus ID: 58068239700.

Gromyko Irina Grigor'yevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Printing Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gromyko@belstu.by. SPIN code: 3869-1433. ORCID: 0000-0002-0896-7262. ResearcherID: rid143948.

Поступила 15.01.2026