УДК 621.929
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_212

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ НИТЕЙ

MODEL OF PROCESS OF MIXING POLYMER COMPONENTS IN PRODUCTION OF SYNTHETIC THREADS

В.А. ОГУРЦОВ, Л.А. ОПАРИНА, Ю.В. ХОХЛОВА, М.В. ТАНИЧЕВ, А.В. ШЕНБЕРЕВА

V.A. OGURTZOV, L.A. OPARINA, Yu.V. KHOKHLOVA, M.V. TANICHEV, A.V. SHENBEREVA

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru, L.A.Oparina@gmail.com, hohjul@mail.ru, maxt_ivanovo@mail.ru, sshenbereva@gmail.com

Процесс смешивания суперконцентрата красителя и модифицирующих добавок с полимером является важным этапом при производстве окрашенных полимерных нитей. Качество смешивания зависит от однородности смеси компонентов. Преобладание случайностей в движении частиц компонентов в смесителе обуславливает применение вероятностного подхода к описанию закономерностей их расположения друг относительно друга. Предлагается математическая модель процесса смешивания полимерных компонентов при производстве синтетических нитей на основе теории цепей Маркова. Рабочий объем смесителя представлен упорядоченным набором ячеек идеального смешивания. Вероятности выхода частиц из ячеек учитывают диффузионный и сегрегационный механизмы процесса, а также скорость перемещения дисперсной среды по аппарату. Стохастические параметры ячеечной модели позволяют учитывать особенности физико-механических свойств дисперсных материалов, а также структуру потока материала в смесителе и режимные параметры процесса. Проведены экспериментальные исследования смешивания двухкомпонентной смеси полимеров – полипропилена и политетрафторэтилена, который рассматривался как ключевой компонент. Полученные экспериментальные данные соответствуют кривым распределения времени пребывания ключевого компонента в смесителе, построенным с помощью математической модели. Предложенная модель процесса смешивания полимерных компонентов позволяет осуществлять выбор рациональных условий работы смесительного аппарата, обеспечивающих требуемую однородность смеси.

The process of blending dye superconcentrate and modifying additives with polymer is a crucial stage in the production of dyed polymer filaments. The quality of blending depends on the uniformity of the mixture of components. The predominance of randomness in the movement of particles in the mixture results in the application of a probabilistic approach to describe the patterns of their arrangement relative to each other. A mathematical model of the polymer component blending process in synthetic filament production based on Markov chain theory is proposed. The working volume of the mixer is represented by an ordered set of ideal mixing cells. The probabilities of particle exit from the cells take into account the diffusion

and segregation mechanisms of the process, as well as the speed of dispersion medium movement through the apparatus. The stochastic parameters of the cell model allow accounting for the peculiarities of the physicochemical properties of dispersed materials, as well as the material flow structure in the mixer and process operating parameters. Experimental studies of mixing a two-component polymer mixture – polypropylene and polytetrafluoroethylene, which was considered as the key component – were conducted. The obtained experimental data correspond to the residence time distribution curves of the key component in the mixer, constructed using a mathematical model. The proposed model of the polymer component mixing process allows for selecting rational operating conditions for the mixing apparatus, ensuring the required mixture homogeneity.

Ключевые слова: синтетические нити, математическая модель, смешивание, сегрегация, диффузия, вектор состояния, матрица переходных вероятностей, однородная смесь, лопастной смеситель.

Keywords: synthetic threads, mathematical model, mixing, segregation, diffusion, state vector, transition probability matrix, homogeneous mixture, paddle mixer.

Введение

Высококачественные полимерные текстильные материалы с заданными техническими характеристиками, включая синтетические волокна, занимают важное место в мировом производстве [1, 2].

Одна из технологий получения синтетических волокон заключается в формировании нитей из расплава смеси полимерных порошков. Согласно этому методу смесь подают в цилиндр экструдера, где она транспортируется шнеком к выходному отверстию. При этом за счет внешнего обогрева гранулы плавятся, и расплав подают шнеком к фильерам. Струйки расплава, выходящие из фильер, охлаждают, для предотвращения слипания на свежесформованные нити наносят замасливатель и наматывают их на бобину, а затем подвергают вытягиванию и термофиксации [3].

Предварительное смешивание, когда суперконцентрат красителя смешивается с полимером в миксере, а затем подается в экструдер, также является одним из важных этапов процесса изготовления окрашенных полимерных нитей. Суперконцентраты красителей для полимеров и модифицирующие добавки должны обладать хорошим равномерным распределением красящего или модифицирующего агента в матрице полимера [4]. От качества смешивания зависит однородность смеси полимеров, загружаемых в бункер экструдера, что доказывает важность более детального изучения процесса смешивания как самостоятельного процесса, являющегося звеном технологической цепочки по производству полимерных нитей.

В целях повышения эффективности работы смесительных устройств и определения условий их функционирования, обеспечивающих высокое качество смеси, необходимо разработать математическую модель, максимально достоверно описывающую данный процесс.

Методы

Известно, что процесс смешивания носит вероятностный характер и заключается в перераспределении компонентов смеси, которые случайно расположены друг относительно друга [5]. Основываясь на этом положении, целесообразно для математического описания процесса перемешивания сухих компонентов использовать вероятностный подход, опирающийся на математический аппарат теории цепей Маркова, который широко применяется для описания процессов в дискретных средах многими авторами [6…10].

В работе построена матричная модель процесса, рабочий объем смесителя представлен в виде упорядоченного набора из n×m ячеек идеального смешивания одинаковой высоты. Схема модели процесса перемешивания с возможными направлениями выхода компонентов из ячейки приведена на рис. 1.

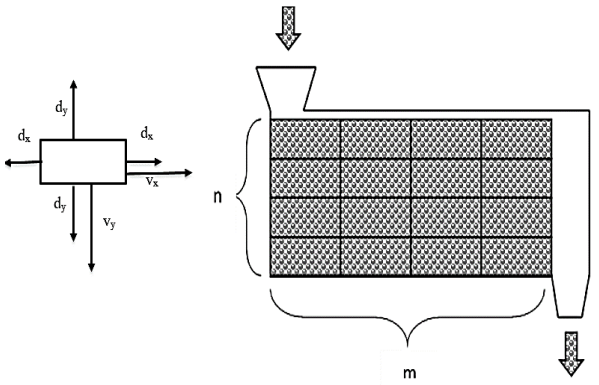

Рис. 1

Вероятности d_x и d_y относятся к чистой диффузии, вероятность v_x связана с перемещением компонентов вдоль смесителя, а вероятность v_y отвечает за сегрегацию ключевого компонента. Вероятность перехода v_x прямо пропорциональна скорости перемещения частиц в смесителе. Формулы, связывающие v_x и параметры процесса, приведены в работах [10…13]. Поток материала в аппарате неоднороден – ядро потока движется медленнее, чем материал в области, ометаемой лопатками смесителя, характер распределения скоростей ступенчатый. Из экспериментальной зависимости загрузки смесителя от производительности можно легко определить распределение скоростей v_{xi} движения материала в нем [10…12].

Каждую вероятность можно интерпретировать как долю частиц, которые перемещаются из данной ячейки в соседнюю за один временной переход. Текущее состояние процесса удобно представить в виде матрицы состояний S_m размером n × m, элементами которой являются содержания ключевого компонента в ячейках. Для дальнейших математических операций эту матрицу преобразуем в вектор состояний S так, что столбцы матрицы S_m будут расположены один под другим.

Эволюцию вектора состояния можно описать матричным равенством:

$$S^{k+1} = PS^k, \qquad (1)$$

где k – это время перехода; P – матрица переходных вероятностей.

Пример эволюции вектора состояния показан на рис. 2…4 (m=5, n=4; А – начальный момент времени, Б – спустя 10 переходов, В – спустя 50 переходов).

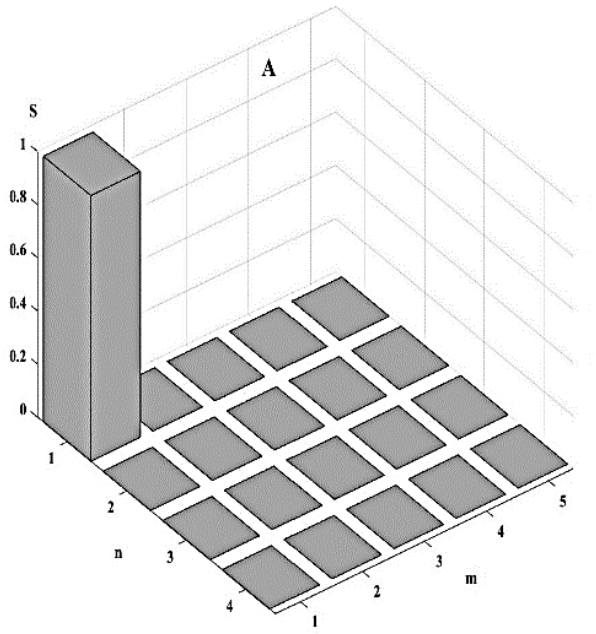

Рис. 2

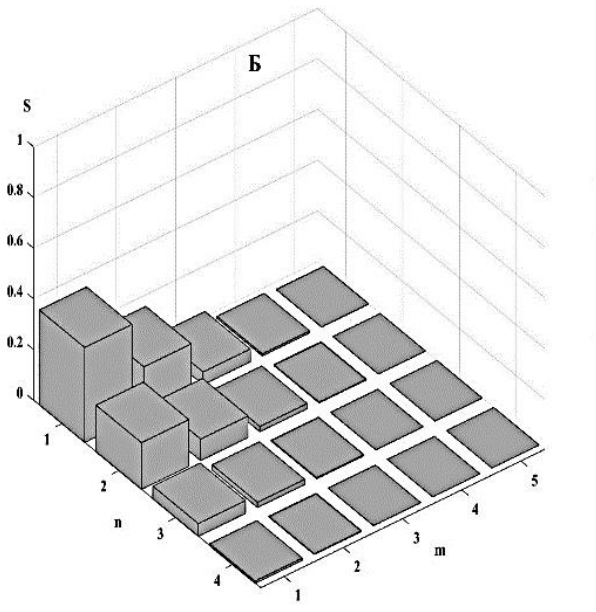

Рис. 3

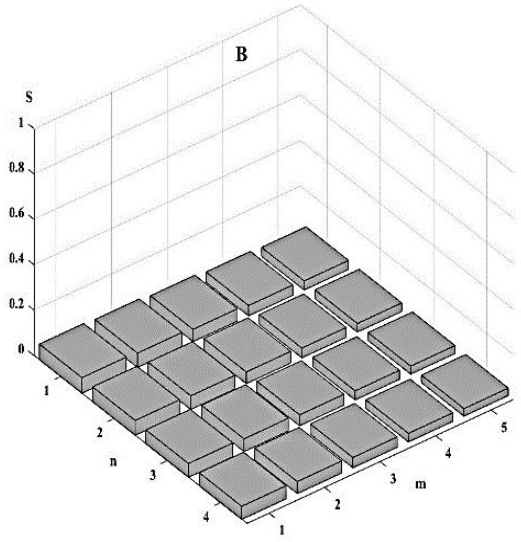

Рис. 4

Полный выход частиц ключевого компонента, то есть кривая распределения времени пребывания этих частиц в смесителе (РВП), рассчитывается по формуле:

$$q\,(k) = \sum_{(n-1)m+1}^{nm} S_i^k v_{xi} \qquad (2)$$

Матрица переходных вероятностей P имеет размер nm×nm, ее элементы определяются по следующему правилу:

переходы ключевого компонента из ячейки вверх

$$P_{(n(j-1)+i-1,n(j-1)+i)} = d_y, \quad i = \overline{2,n}, j = \overline{1,m}\,, \qquad (3)$$

переходы из ячейки вниз

$$P_{(n(j-1)+i+1,n(j-1)+i)} = d_y + v_y, \quad i = \overline{1,n-1}, j = \overline{1,m}\,, \qquad (4)$$

переходы из ячейки вперед

$$P_{(n(j-2)+i,n(j-1)+i)} = d_x, \quad i = \overline{1,n},\ j = \overline{2,m}, \qquad (5)$$

переходы из ячейки назад

$$P_{(nj+i,n(j-1)+i)} = d_x + v_x, \quad i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m-1}\,. \qquad (6)$$

Все остальные элементы матрицы равны 0.

Результаты

Реализация описанного алгоритма осуществлялась в среде MATLAB.

Экспериментальная часть исследования проведена на лопастном смесителе непрерывного действия (рис. 5). Корпус аппарата и его рабочие органы выполнены из стали, рабочий объем смесителя 20 литров. Эксперименты проводились при двух скоростях вращения лопастей – 20 и 80 оборотов в минуту, регулировка режимов осуществлялась при помощи программного обеспечения LABView.

Рис. 5

Исследованию подлежала двухкомпонентная смесь полимеров – полипропилена и политетрафторэтилена (рассматривался как ключевой компонент), характеристики которых приведены в табл. 1. Спектры размеров частиц данных полимеров не перекрываются, что позволяет полностью разделить их рассеиванием на сите.

Таблица 1

Показатели	Материал	
	поли-пропилен	политетра-фторэтилен
Истинная плотность, кг/м3	900	2200
Насыпная плотность, кг/м3	500	450
Средний размер частиц, мм	3,5	0,045

В установившемся режиме работы смесителя в него подавали порцию ключевого компонента и начинали отбор проб на выходе в кюветы, расположенные на ленточном конвейере под разгрузочным отверстием смесительного аппарата, через каждые 10 секунд. Процедуру отбора проб прекращали при отсутствии ключевого компонента на выходе из смесителя. Анализируя содержимое кювет, строили экспериментальные кривые распределения времени пребывания (РВП) исследуемого материала в аппарате.

Целью процесса перемешивания компонентов в смесителе является получение однородной смеси на выходе из него. Качество получаемой смеси в свою очередь напрямую зависит от времени, которое частицы материалов проводят внутри смесителя [14...16]. Именно поэтому в работе оценивалось влияние на кривые распределения времени пребывания частиц ключевого компонента в смесителе (РВП) различных режимных параметров процесса. Результаты некоторых численных и модельных экспериментов приведены на рис. 6.

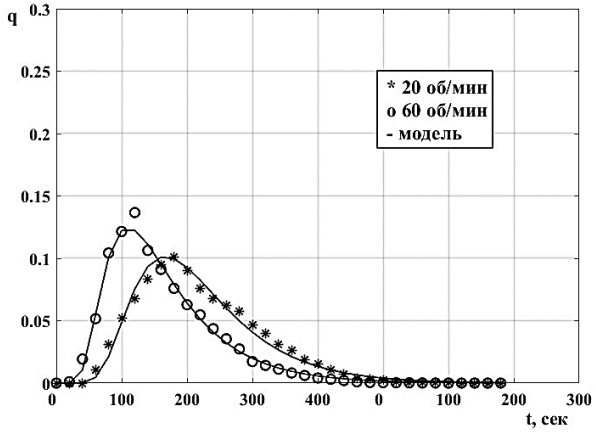

Рис. 6

В соответствии с разгрузочной характеристикой, полученной экспериментально, поток в смесителе считается однородным. Определив его параметры, строили модельную кривую РВП. Параметры диффузии d_x и d_y, скорость сегрегации v_y подбирались методом наименьших квадратов. Проверка адекватности модели производилась при помощи индекса детерминации ρ^2, равного 0,918. Это показывает, что 91,8 % вариации результативного признака объясняется вариацией признаков-факторов, а 8,2 % приходится на долю прочих факторов. Средняя ошибка аппроксимации составила 6,85 %. Это показывает, что линия РВП хорошо приближает исходные данные. *F*-критерий Фишера равен 68,7, что превышает табличное значение (5,99). Таким образом, можно утверждать, что кривые РВП зависят от скорости вращения лопастей аппарата – среднее время пребывания частиц ключевого компонента в аппарате уменьшается с ростом скорости вращения лопастей.

Полученные экспериментальные распределения времени пребывания частиц ключевого компонента в смесителе адекватно описываются предложенной математической моделью.

ВЫВОДЫ

Предложенная марковская модель процесса смешивания полимерных компонентов при производстве синтетических нитей позволяет учитывать особенности физико-механических свойств дисперсных материалов, структуру потока материала в смесителе, прогнозировать поведение смеси при изменении режимных параметров процесса, определять значения этих параметров для обеспечения регламентной однородности полимерной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пророкова Н.П., Вавилова С.Ю.* Полипропиленовая нить, модифицированная стабилизированными наночастицами меди // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 5 (413). С. 108…115. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_ 5_1088.

2. *Пророкова Н.П.* Синтетические волокна в России: производство, перспективы развития и получения на их основе функциональных и "умных" материалов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2018. № 1-1. С. 289…294.

3. Пат. 2411312 С1 Российская Федерация, МПК D01F 6/06, D01F 1/10. Способ получения комплексных полипропиленовых нитей.

4. Пат. 2076116 С1 Российская Федерация, МПК С08J 3/20, С08J 3/22. Способ приготовления суперконцентрата.

5. *Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.* Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение: моногр. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2023. 440 с. – ISBN 978-5-534-07043-9.

6. *Жуков В.П., Осипов Д.А., Otwinowski H., Urbaniak D.* Расчетно-экспериментальные исследования измельчения смеси разнопрочных компонентов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2017. Т. 60, вып. 6. С. 109…115. – DOI: 10.6060/tcct.2017606.5562.

7. *Осипов Д.А., Жуков В.П.* Нелинейная модель измельчения смеси разнопрочных компонентов в струйной мельнице кипящего слоя // Вестник ИГЭУ. 2017. Вып. 2. С. 51…55. – DOI: 10.17588/2072-2672.2017.2.051-055.

8. *Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Tannous K., Ovchinnikov L.N.* A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties // Particulate Science and Technology. 2018. Vol. 36. N. 2. P.244…253.

9. *Mitrofanov A.V., Zhukov V., Tannous K., Zaitsev V.* Application of the theory of Markov chain to model heat and mass transfer in fluidized bed // Proc. of The 8th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. 2015. paper#12. P. 1…8. CD-edition.

10. *Хохлова Ю.В., Мизонов В.Е., Баранцева Е.А.* Математическая модель смесителя непрерывного действия с неоднородным потоком сыпучего материала // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2007. Т. 50, № 9. С. 118…120.

11. *Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Федосов С.В., Хохлова Ю.В.* Математическая модель кинетики лопастного перемешивания сыпучих материалов // Строительные материалы. 2008. Вып. 2. С.12…13.

12. *Огурцов В.А., Хохлова Ю.В., Алешина А.П., Фатахетдинов А.М.* Моделирование процессов получения сухих строительных смесей в лопастном аппарате непрерывного действия // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 2. С. 30…36.

13. *Огурцов В.А., Крупнов Е.И., Алешина А.П. и др.* Двухмерная модель фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов на ситовых тканях // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 1 (391). С. 133…137. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_1_133/

14. *Стенко Д.В., Капранова А.Б., Бахаева Д.Д. и др.* Стохастический анализ ротационного смешивания полимерных компонентов в рамках переработки и развития технологий 3D-печати // Химическая и нефтегазовая инженерия. 2022. Т. 58, № 11-12. С. 920…929. – https://doi.org /10.1007/s10556-022-01027-x

15. *Стенко Д.В., Капранова А.Б.* Экспериментальное исследование формирования разреженных потоков гранулированных полимерных компонентов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 3. С. 234…238.

16. *Волков М.В., Королев Л.В., Таршис М.Ю.* Математическая модель процесса смешивания сыпучих материалов в новом устройстве гравитационно-пересыпного действия // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-5. С. 960…964. – https://fundamental-research.ru/ru/article/view? id=34997

R E F E R E N C E S

1. *Prorokova N.P., Vavilova S.Yu.* Polypropylene yarn modified with stabilized copper nanoparticles // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. No. 5 (413) 2024. P. 108…115. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_5_1088.

2. *Prorokova N.P.* Synthetic fibers in Russia: production, development prospects and obtaining functional and "smart" materials based on them // Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials (SMARTEX). 2018. No. 1-1. P.289…294.

3. Patent 2411312 C1 Russian Federation, IPC D01F 6/06, D01F 1/10. Method for producing complex polypropylene threads.

4. Patent 2076116 C1 Russian Federation, IPC C08J 3/20, C08J 3/22. Method for preparing superconcentrate.

5. *Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu.* System analysis of chemical technology processes: grinding and mixing: monograph. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Yurayt Publishing House, 2023. 440 p. – ISBN 978-5-534-07043-9.

6. *Zhukov V.P., Osipov D.A., Otwinowski H., Urbaniak D.* Computational and experimental studies of grinding a mixture of components with different strengths // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2017. Vol. 60, No. 6. P. 109…115. – DOI: 10.6060/ tcct.2017606.5562.7.

7. *Osipov D.A., Zhukov V.P.* Nonlinear model of milling a mixture of different-strength components in a fluid bed jet mill // Vestnik of ISPU. 2017. Issue 2. P.51…55. – DOI: 10.17588/2072-2672.2017.2.051-055.

8. *Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Tannous K., Ovchinnikov L.N.* A Markov chain model to describe

fluidization of particles with time-varying properties // Particulate Science and Technology. 2018. Vol. 36. N.2. P. 244…253.

9. *Mitrofanov A.V., Zhukov V., Tannous K., Zaitsev V.* Application of the theory of Markov chain to model heat and mass transfer in fluidized bed // Proc. of The 8th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. 2015. paper#12. P. 1…8. CD-edition.

10. *Khokhlova Yu.V., Mizonov V.E., Barantseva E.A.* Mathematical model of a continuous-flow mixer with an inhomogeneous flow of bulk material // Proceedings of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2007. Vol. 50, No. 9. P. 118…120.

11. *Barantseva E.A., Mizonov V.E., Fedosov S.V., Khokhlova Yu.V.* Mathematical model of the kinetics of paddle mixing of bulk materials // Construction Materials. 2008. Issue 2. P. 12…13.

12. *Ogurovtsov V.A., Khokhlova Yu.V., Aleshina A.P., Fatakhetdinov A.M.* Modeling of processes for producing dry construction mixtures in a continuous-flow paddle apparatus // Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Materials. Structures. Technologies. 2019. No. 2. P. 30…36.

13. *Ogurtsov V.A., Krupnov E.I., Aleshina A.P. etc.* Two-dimensional model of vibroseparation of fine bulk materials through the holes of fabric sieve // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 1 (321). P.133…137. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_1_133.

14. *Stenko D.V., Kapranova A.B., Bakhayeva D.D.* Stochastic analysis of rotational mixing of polymer components in the context of processing and development of 3D printing technologies // Chemical and Oil and Gas Engineering. 2022. V. 58, No. 11-12. Pp.920…929. – https://doi.org/10.1007 /s10556-022-01027-x.

15. *Stenko D.V., Kapranova A.B.* Experimental study of the formation of sparse flows of granular polymer components // Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences. 2023. No. 3. Pp. 234…238.

16. *Volkov M.V., Korolev L.V. and Tarshis M.Yu.* Mathematical Model of the Mixing Process of Bulk Materials in a New Gravity-Filling Device // Fundamental Research. 2014. No. 9-5. Pp. 960…964. –https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id= 34997

Рекомендована кафедрой строительства и инженерных систем ИВГПУ. Поступила 12.08.25.