

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ ТРУБЧАТЫХ РЕАКТОРОВ

С.П. Бобков, И.А. Астраханцева, А.А. Гущин, Е.С. Бобкова, Р.Г. Астраханцев, Д.А. Шутов

Сергей Петрович Бобков (ORCID 0000-0001-7315-1625), Ирина Александровна Астраханцева (ORCID 0000-0003-2841-8639)\*, Роман Геннадьевич Астраханцев (ORCID 0000-0001-9880-2826), Дмитрий Александрович Шутов (ORCID 0000-0002-4662-4631)

Кафедра информационных технологий и цифровой экономики, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000  
E-mail: bsp@isuct.ru, i.astrakhantseva@mail.ru\*, rgastrakhantsev@gmail.com, shutov@isuct.ru

Андрей Андреевич Гущин (ORCID 0000-0003-2655-1671)

Кафедра промышленной экологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000  
E-mail: guschin79@gmail.com

Елена Сергеевна Бобкова (ORCID 0009-0009-4311-997X)

Кафедра физической химии, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, пр. Ленинский, 65, к. 1, Москва, Российская Федерация, 119991  
E-mail: lenabobkova777@gmail.com

*Аппараты трубчатого типа, в том числе и химические реакторы, часто являются основными объектами производственного процесса, и во многом определяют его технико-экономические показатели. Поэтому создание новых, более качественных конструкций таких реакторов, поиск оптимальных режимов их работы являются важными научно-исследовательскими задачами. Решение передовых задач всегда предполагает использование методов математического и компьютерного моделирования. В силу сложности внутренних процессов в таком оборудовании здесь используются достаточно упрощенные типовые модели. В исследовании анализируется возможность создания модели трубчатого реактора с использованием систем дискретных стохастических элементов. Данный инструмент позволяет в полной мере использовать парадигму, согласно которой индивидуальное поведение отдельных элементов системы должно определять характер поведения всей системы в целом. Кроме того, созданные модели учитывают влияние вероятностных составляющих исследуемых явлений. В статье в рамках единого подхода рассматриваются как гидродинамические эффекты, так и протекание химических реакций. Описана методика создания модели и приводятся некоторые результаты компьютерных экспериментов с ней. Анализируются итоги имитационного моделирования с использованием предлагаемого подхода. Результаты анализа свидетельствуют о широких возможностях данной методики для получения новых данных в области развития цифровых технологий в промышленности.*

**Ключевые слова:** дискретное моделирование; случайные процессы; структура потоков; электро-синтез озона

### Для цитирования:

Бобков С.П., Астраханцева И.А., Гущин А.А., Бобкова Е.С., Астраханцев Р.Г., Шутов Д.А. Использование дискретного вероятностного подхода для моделирования проточных трубчатых реакторов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 2. С. 96–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20256802.7109.

### For citation:

Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A., Gushchin A.A., Bobkova E.S., Astrakhantsev R.G., Shutov D.A. Using a discrete probabilistic approach for simulating flow tubular reactors. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 2. P. 96–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20256802.7109.

## USING A DISCRETE PROBABILISTIC APPROACH FOR SIMULATING FLOW TUBULAR REACTORS

**S.P. Bobkov, I.A. Astrakhanseva, A.A. Gushchin, E.S. Bobkova, R.G. Astrakhansev, D.A. Shutov**

Sergey P. Bobkov (ORCID 0000-0001-7315-1625), Irina A. Astrakhanseva (ORCID 0000-0003-2841-8639)\*, Roman G. Astrakhansev (ORCID 0000-0001-9880-2826), Dmitriy A. Shutov (ORCID 0000-0002-4662-4631)  
Department of Information Technology and Digital Economy, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia  
E-mail: bsp@isuct.ru, i.astrakhanseva@mail.ru\*, rgastrakhansev@gmail.com, shutov@isuct.ru

Andrey A. Gushchin (ORCID 0000-0003-2655-1671)

Department of Industrial Ecology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia  
E-mail: gushchin79@gmail.com

Elena S. Bobkova (ORCID 0009-0009-4311-997X)

Physical Chemistry Department, Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin, Leninsky ave., 65, bld. 1, Moscow, 119991, Russia  
E-mail: lenabobkova777@gmail.com

*Tube-type devices, including chemical reactors, are often key components of the manufacturing process and significantly influence its technical and economic indicators. Therefore, creating new, higher-quality designs of such reactors and finding optimal operating regimes are important scientific research tasks. Addressing advanced problems always involves the use of mathematical and computer modeling techniques. Due to the complexity of internal processes in such equipment, relatively simplified standard models are used. The study examines the possibility of creating a model of a tubular reactor using systems of discrete stochastic elements. This tool fully utilizes the paradigm according to which the individual behavior of system elements should determine the behavior of the entire system as a whole. Additionally, the created models take into account the influence of probabilistic components of the phenomena under study. The article considers both hydrodynamic effects and the progression of chemical reactions within a unified approach. The methodology for creating the model is described, and some results of computer experiments with it are presented. The outcomes of simulation modeling using the proposed approach are analyzed, demonstrating its potential for generating new data in the field of digital technology development in industry.*

**Keywords:** discrete modeling; random processes; flow structure; electrosynthesis of ozone

### ВВЕДЕНИЕ

Производственный процесс на химических предприятиях включает в себя подготовительные и завершающие операции, с центральной ролью химической стадии, которая значительно влияет на основные технические и экономические параметры производства. Особое внимание уделяется химическим реакторам, среди которых трубчатые реакторы выделяются благодаря своей конструктивной простоте и способности к непрерывной эксплуатации [1, 2]. Эффективность проектирования и модернизации этих реакторов напрямую зависит от точности математических моделей, которые должны корректно описывать движение и взаимодействие веществ внутри аппарата. Применение иде-

ализированных моделей помогает упростить сложные динамические процессы, обеспечивая точность в анализе и оптимизации работы реакторов [3, 4].

### ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Основная модель движения сплошной фазы в трубчатых аппаратах – это модель идеального вытеснения, которая предполагает полное перемешивание вещества в направлении, перпендикулярном к оси потока, при этом игнорирует перемешивание вдоль оси. В соответствии с этой моделью поток ведет себя как твердый поршень, что обеспечивает одинаковое время пребывания всех частиц в аппарате [5, 6]. Однако реальные условия значительно отличаются из-за осевого перемешивания и пограничного слоя у стенок, что ведет к

различиям во времени пребывания частиц. Поэтому необходима разработка диффузионных моделей, которые модифицируют исходное уравнение с учетом продольного и поперечного перемешивания. Такие изменения приводят к уравнениям второго порядка с дополнительными переменными и условиями, что усложняет аналитические и вычислительные процедуры.

Клеточные автоматы и агентные модели изучают динамику системы на уровне отдельных элементов. Эти подходы позволяют имитировать реальные объекты с учетом нелинейных характеристик и случайных воздействий, тем самым облегчают решение сложных задач [7, 8].

#### МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ В АППАРАТЕ

Для создания дискретной модели трубчатого реактора поток в аппарате моделируется как совокупность макроячеек, перемещающихся на узлах равномерной ортогональной решетки по дискретным временным шагам. Эта методология включает два основных этапа моделирования: детерминированный и стохастический [9, 10].

На детерминированном этапе макроячейка движется в осевом направлении по закону Пуазейля, что позволяет вычислить скорость в поперечном сечении потока в зависимости от перепада давления, радиуса аппарата, расстояния до оси и вязкости среды. Эти расчеты используются для определения предварительных координат нового узла, при этом, из-за дискретности модели, значение скорости квантуется на шаг решетки [11, 12].

На стохастическом этапе учитывается случайное перемешивание частиц. Макроячейка может переместиться в один из четырех соседних узлов решетки, что моделируется с использованием вероятностей, основанных на подходах статистической физики или экспериментальных данных. Это позволяет макроячейке случайно выбрать новое положение на решетке, что добавляет реалистичности в моделирование движения вещества внутри аппарата.

Эти два этапа повторяются на каждом шаге дискретного времени, что обеспечивает возможность наблюдения за эволюцией системы в условиях, учитывающих как детерминированные, так и случайные аспекты перемещения частиц. Эта методология позволяет адаптировать модель к реальным условиям потока, при этом повышается точность и адекватность описания процессов в трубчатом реакторе [13, 14].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА

Для анализа структуры потока использовалась компьютерная модификация метода трассера, включающая визуализацию и мониторинг поведения выбранных макроячеек в трубчатом аппарате во времени. Также применялись методы имитации различных видов возмущений на входе устройства, включая импульсный и ступенчатый ввод. Для изучения потоковых структур проводились имитационные эксперименты с использованием математического пакета Matlab.

В качестве прототипа рассматривалась трубка внутренним диаметром 15 мм. Изучалось движение сплошной среды, которая имела кинематическую вязкость  $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и двигалась со средней скоростью  $v_{\text{ср}} = (0,05 - 0,005 \text{ м/с})$ . Значение критерия Рейнольдса лежало в диапазоне  $Re = 52 - 6,3$ , что позволило считать режим течения ламинарным. Дискретизация пространства производилась с шагом  $\Delta x = 1/3 \text{ мм}$ , шаг по времени составлял  $\tau = 1/15 \text{ с}$ .

На рис. 1 представлены некоторые результаты трансформации входного импульсного воздействия по мере его продвижения внутри аппарата. По оси абсцисс отложена длина трубки, по оси ординат – диаметр.

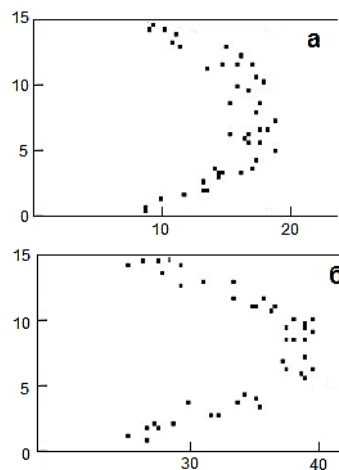


Рис. 1. Визуализация профилей скорости потока: а) – средняя скорость 0,0075 м/с; б) – 0,015 м/с

Fig. 1. Visualization of flow velocity profiles: а) – average speed 0.0075 m/s; б) – 0.015 m/s

Нетрудно увидеть, что фронт движения имеет форму, близкую к параболической, но он размыт случайным диффузионным перемещением ячеек. При этом, естественно, скорость движения элементов увеличивается с ростом средней скорости потока и убывает по мере удаления от оси потока к стенкам аппарата.

В химической технологии при изучении структуры потоков в аппарате часто рассматривают реакцию на стандартное возмущение [13]. Этот метод используют для исследования динамических характеристик аппаратов. На рис. 2 показана реакция рассматриваемой дискретной модели на стандартное ступенчатое возмущение. Полученные в эксперименте точки аппроксимированы экспоненциальной функцией. Кроме того, следует учитывать, что неровность линий на приведенных рисунках является особенностью, присущей дискретным вероятностным моделям.

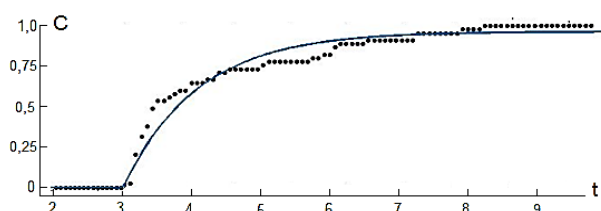


Рис. 2. Кривая отклика модели на ступенчатое возмущение  
Fig. 2. Model response curve to step disturbance

Полученная кривая отклика по своей форме наиболее близка к реакции на аналогичное возмущение двухпараметрической диффузионной модели.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБЧАТОГО РЕАКТОРА

В промышленно развитых странах озон широко используется во многих отраслях, причем наиболее эффективным методом его получения является электросинтез в электрических разрядах из кислорода или кислородсодержащих газов. В промышленности основным методом генерации озона служит барьерный разряд. Учитывая высокую энергоемкость процесса, актуальной задачей становится улучшение технологии и конструкции озонирующих реакторов, для чего эффективно применяются моделирование. Изучение трубчатых реакторов-озонаторов методами дискретного моделирования начато из-за их потенциала в синтезе озона, где основные реакции включают образование атомарного кислорода и диссоциацию молекулярного кислорода, а также реакции распада озона.

В разработанной модели трубчатого реактора-озонатора поток представлен дискретными ячейками, которые могут быть активными (содержащими озон) или пассивными. Эта модель позволяет изучать процессы образования и разложения озона без углубления в детали химических реакций.

1. В реакторе неактивная ячейка может активироваться на каждом временном шаге под действием барьерного разряда с вероятностью  $P_A$ , которая зависит от параметров разряда, состава среды и

конструкции реактора, но не зависит от времени пребывания газа в аппарате или его расхода.

2. Активная ячейка может переходить в пассивное состояние с вероятностью  $P_D$ , зависящей от состава среды и конструктивных особенностей реактора. Вероятность дезактивации увеличивается с продолжительностью активности ячейки.

Исходные значения вероятностей активации  $P_A$  и дезактивации  $P_D$  ячеек в модели были определены на основе кинетических параметров реакций озона и уточнены экспериментальными данными.  $P_D$  рассчитывалась как отношение количества активных ячеек к общему числу ячеек при дискретизации пространства от 1,0 до 0,25 мм, с первоначальными значениями в диапазоне  $(0,8 \cdot 10^{-3} - 0,2 \cdot 10^{-3})$ , корректировавшихся до  $(2 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3})$ . Вероятность  $P_D$ , рассматриваемая как величина с экспоненциальным распределением, зависела от продолжительности активности ячейки и корректировалась на основе скорости разрушения озона, с усредненными значениями на каждом шаге от (0,2 – 0,9).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРА

Рассматривался реактор диэлектрического барьерного разряда с внутренним диаметром 15 мм и длиной активной зоны 120 мм, где создавался разряд тока с напряжением до 20 кВ. В нем обрабатывалась газовая смесь с техническим кислородом при регулируемом расходе. Параметры скорости и характеристики газовой среды соответствовали условиям, использованным при анализе структуры потока. В дискретной модели пространство квантовалось с шагом  $\Delta x = (0,5 - 0,05)$  мм, время – с шагом  $\tau = (0,1 - 0,01)$  с. Результаты имитационного моделирования показывают динамику процесса, протекающего в аппарате, с визуализацией по шагам времени, показывая установившийся режим работы при скорости газовой смеси 0,018 м/с (рис. 3). Диаметр и длина активной зоны реактора даны в миллиметрах. Направление потока – слева направо.

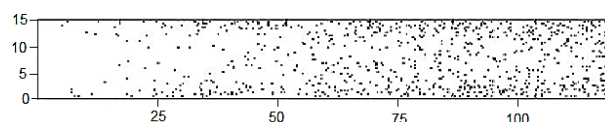


Рис. 3. Визуализация состояния реактора. Активные ячейки отмечены черным цветом

Fig. 3. Visualization of the reactor state. Active cells are marked in black

Выявлено неравномерное распределение активных ячеек в аппарате, вызванное гидродинамиче-

скими особенностями потока и реакциями образования и разложения озона. На рис. 4 приведено среднее количество активных элементов в поперечных сечениях вдоль оси аппарата, в процентах от их общего числа.

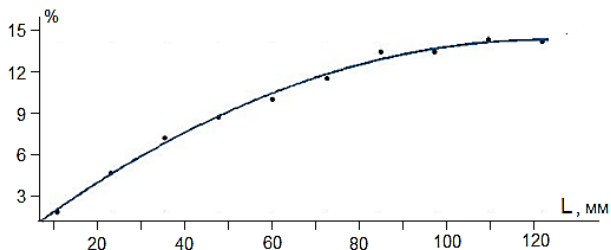


Рис. 4. Распределение активных ячеек по длине аппарата  
Fig. 4. Distribution of active cells along the length of the apparatus

Результаты показывают ожидаемый рост концентрации озона к выходу из реактора, с замедлением роста, что указывает на установление равновесия между прямой и обратной реакциями и свидетельствует о переходе к стационарному режиму.

На рис. 5 приведено усредненное по длине реактора распределение активных ячеек по диаметру сечения рабочей зоны (также в процентах).

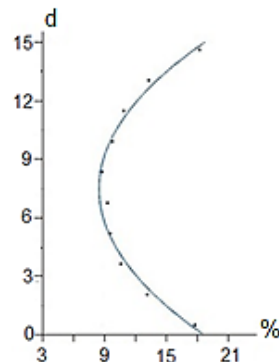


Рис. 5. Распределение активных ячеек по диаметру сечения аппарата  
Fig. 5. Distribution of active cells along the cross-sectional diameter of the apparatus

Результаты показывают высокую концентрацию активных ячеек возле стенок реактора из-за пограничного слоя, который увеличивает время их пребывания в зоне электрического разряда. Адекватность модели подтверждается сравнением с экспериментальными данными. Данные о концентрации озона на выходе из реактора при различных скоростях потока сопоставлены в таблице.

Таблица

Сравнение экспериментальных и расчетных данных  
Table. Comparison of experimental and calculated data

| № | Скорость газа, (м/с) | Время контакта (с) | Концентрация озона · 10 <sup>16</sup> (см <sup>-3</sup> ) |        | Погрешность, % |
|---|----------------------|--------------------|---|--------|----------------|
|   |                      |                    | Эксперимент   | Модель |                |
| 1 | 0,01                 | 12                 | 9,5   | 9,1    | 4,2            |
| 2 | 0,018                | 6,7                | 6,1   | 6,4    | 3,2            |
| 3 | 0,04                 | 3                  | 3,6   | 3,1    | 13,8           |

Относительная погрешность результатов не превышает 15%, что говорит об адекватности предлагаемой дискретной модели.

#### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дискретная стохастическая модель более точно отражает снижение осевой скорости к стенкам аппарата по сравнению с поршневым режимом течения и описывает локальное перемешивание, аналогичное первому закону Фика для молекулярной диффузии.

Использование стохастических методов в моделировании химических реакций показывает, что химическая кинетика включает вероятностные факторы при анализе столкновений молекул. Применение дискретных вероятностных моделей обеспечивает эффективное использование современной компьютерной техники и параллельных вычислений.

Предложенная модель позволяет анализировать распределение макроячеек в реакционном объеме, что отсутствует в классических моделях. Сложности с определением вероятностных показателей решаются с использованием экспериментальных данных и статистической термодинамики.

Таким образом, предложенный подход является перспективным для моделирования различных видов технологического оборудования особенно в условиях цифровой трансформации.

*Работа поддержана Министерством высшего образования и науки Российской Федерации, проект FZZW-2023-0010.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The work was supported by the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation, project FZZW-2023-0010.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технология. М.: Ленанд. 2022. 512 с.
2. Федосов С.В., Баканов М.О. Моделирование процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с применением метода «микропроцессов» для области малых значений числа Фурье. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 78-83. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6387.
3. Рубцова Л.Н., Александрова Л.Ю., Ганин П.Г., Маркова А.В., Мошинский А.И., Сорокин В.В. Исследование ламинарного течения в призматических каналах прямоугольного и эллиптического сечения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 4. С. 93-100. DOI: 10.6060/ivkkt.20226504.6533.
4. Андреев А.С., Аксенчик К.В. Компьютерное моделирование и оценка возможности управления каталитическим процессом при политропическом режиме работы трубчатого реактора. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 2. С. 120-127. DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6727.
5. Черпичкий С.Н., Королев Л.В., Таршис М.Ю. Математическое моделирование процесса перемешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном смесителе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 112-120. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6504.
6. Караневская Т.Н., Шумихин А.Г. Моделирование технологических процессов в целях алгоритмизации задачи управления объектами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 84-90. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6100.
7. Бобков С.П., Астраханцева И.А., Галиаскаров Э.Г. Применение системного подхода при разработке математических моделей. *Совр. наукоемк. технол. Регионал. прилож.* 2021. № 1(65). С. 66-71. DOI: 10.6060/snt.20216501.0008.
8. Бобков С.П., Астраханцева И.А. Использование вероятностных клеточных автоматов для моделирования течения жидкости. *Совр. наукоемк. технол. Регионал. прилож.* 2022. № 2(70). С. 47-54. DOI: 10.6060/snt.20216703.0008.
9. Бобков С.П., Астраханцева И.А. Использование многоагентных систем для моделирования технологических процессов. *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. 012002 (ITIDMS-II 2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2001/1/012002.
10. Бобков С.П., Астраханцева И.А. Применение агентного подхода для моделирования процессов теплопроводности. *Вестн. ИГЭУ*. 2022. № 2. С. 58-66. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.058-066.
11. Bobkov S.P. Use of Discrete Approaches for Simulation the Basic Processes of Chemical Technology. *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. N 6. P. 1190-1197. DOI: 10.1134/S1070363221080181.
12. Бобков С.П., Астраханцева И.А. Дискретная стохастическая модель гидродинамики потока. *Моделирование систем и процессов*. 2023. № 2. С. 7-14. DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-2-7-14.
13. Бобкова Е.С. Разряд атмосферного давления как источник активных частиц для очистки воды от органических поллютантов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2014. Т. 57. Вып. 10. С. 89-91.
14. Bobkova E.S., Rybkin V.V. Peculiarities of Energy Efficiency Comparison of Plasma Chemical Reactors for Water Purification from Organic Substances. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35. N 1. P. 133-142. DOI: 10.1007/s11090-014-9583-8.

## REFERENCES

1. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengarten M.G. General chemical technology. M.: Lenand. 2022. 512 p. (in Russian).
2. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Modeling of heat conduction and diffusion processes in bodies of canonical shape using the “microprocesses” method for the region of small values of the Fourier number. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 78-83 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6387.
3. Rubtsova L.N., Aleksandrova L.Yu., Ganin P.G., Markova A.V., Moshinsky A.I., Sorokin V.V. Study of laminar flow in prismatic channels of rectangular and elliptical cross-section. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 4. P. 93-100 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226504.6533.
4. Andreev A.S., Aksenchik K.V. Computer modeling and assessment of the possibility of controlling the catalytic process in the polytropic operating mode of a tubular reactor. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 2. P. 120-127 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6727.
5. Cherpitskiy S.N., Korolev L.V., Tarshis M.Yu. Mathematical modeling of the bulk materials mixing process in a drumblade mixer. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 9. P. 112-120 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6504.
6. Karanevskaya T.N., Shumikhin A.G. Modeling of technological processes in order to algorithmize the problem of object management. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 2. P. 84-90 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6100.
7. Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A., Galiaskarov E.G. Application of a systems approach in the development of mathematical models. *Sovr. Naukoemk. Tekhnol. Regional. Prilozh.* 2021. N 1(65). P. 66-71 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20216501.0008.
8. Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A. Using probabilistic cellular automata to simulate fluid flow. *Sovr. Naukoemk. Tekhnol. Regional. Prilozh.* 2022. N 2(70). P. 47-54 (in Russian). DOI: 10.6060/snt.20216703.0008.
9. Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A. Using multi-agent systems to simulate technological processes. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. 012002 (ITIDMS-II 2021). (in Russian). DOI: 10.1088/1742-6596/2001/1/012002.
10. Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A. Application of an agent-based approach to modeling heat conduction processes. *Vestn. IGEU*. 2022. N 2. P. 58-66 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.058-066.
11. Bobkov S.P. Use of Discrete Approaches for Simulation the Basic Processes of Chemical Technology. *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. N 6. P. 1190-1197. DOI: 10.1134/S1070363221080181.
12. Bobkov S.P., Astrakhantseva I.A. Discrete stochastic model of flow hydrodynamics. *Modelirovanie Sistem Protssesov*. 2023. N 2. P. 7-14 (in Russian). DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-2-7-14.
13. Bobkova E.S. Atmospheric pressure discharge as a source of active particles for water purification from organic pollutants. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2014. V. 57. N 10. P. 89-91 (in Russian).
14. Bobkova E.S., Rybkin V.V. Peculiarities of Energy Efficiency Comparison of Plasma Chemical Reactors for Water Purification from Organic Substances. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2015. V. 35. N 1. P. 133-142. DOI: 10.1007/s11090-014-9583-8.

Поступила в редакцию (Received) 17.05.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 27.09.2024