

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ АППАРАТЕ**

**С.П. Бобков, Р.Г. Астраханцев, А.А. Самарский, Е.А. Павлова**

Сергей Петрович Бобков (ORCID 0000-0001-7315-1625), Роман Геннадьевич Астраханцев (ORCID 0000-0001-9880-2826), Александр Александрович Самарский, Екатерина Алексеевна Павлова (ORCID 0000-0002-9266-9603)

Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000, Россия

E-mail: bsp@isuct.ru, rgastrakhantsev@gmail.com, aleksander91@mail.ru, pavlova\_ea@isuct.ru.

*Производственные процессы в технологическом оборудовании обычно происходят в потоках сплошных сред. Структура таких потоков оказывает существенное влияние на эффективность производственных процессов и требует тщательного изучения. Поэтому создание новых образцов промышленных конструкций невозможно без предварительной оценки характеристик движения веществ внутри аппарата. Такая оценка обычно проводится с использованием моделей движения вещества – математических или физических. В последние годы, вследствие роста возможностей компьютерной техники к указанным моделям добавились также имитационные модели. Они предполагают создание алгоритма, имитирующего поведение реального объекта, и проведение дальнейших исследований с виртуальным объектом. Ядром такого программного имитатора становится математическая или логическая модель.*

*При исследовании движения потоков вещества широко используются идеализированные гидродинамические модели. Несмотря на недостаточную адекватность, они получили распространение, благодаря простоте использования. Однако, подавляющее большинство указанных моделей по своей математической схеме относятся к классу непрерывных и детерминированных. В то же время в реальных условиях значительным является действие случайных факторов. Такая ситуация требует более широкого использования стохастических подходов к моделированию гидродинамических процессов. Кроме того, широкое внедрение цифровых технологий стимулирует интерес к дискретным подходам в моделировании.*

*В данной статье рассмотрен альтернативный подход к анализу потоков веществ – использование дискретных имитационных моделей. При их создании принималась гипотеза о существовании двух составляющих вектора скорости элементов потока – детерминированной и случайной. В работе приводится общая методика создания модели, изложены некоторые результаты ее использования. Рассмотрены возможные области применения полученной модели.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, дискретное стохастическое моделирование, гидродинамика потоков.

**SIMULATION MODEL OF THE MOVEMENT OF SUBSTANCE  
IN A TECHNOLOGICAL APPARATUS**

**S.P. Bobkov, R.G. Astrakhantsev, A.A. Samarskiy, E.A. Pavlova**

Sergey P. Bobkov (ORCID 0000-0001-7315-1625), Roman G. Astrakhantsev (ORCID 0000-0001-9880-2826), Aleksandr A. Samarskiy, Ekaterina A. Pavlova (ORCID 0000-0002-9266-9603)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 7, Sheremetevsky Ave., Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: bsp@isuct.ru, rgastrakhantsev@gmail.com, aleksander91@mail.ru, pavlova\_ea@isuct.ru.

*Production processes in technological equipment usually occur in continuous media flows. The structure of such flows has a significant impact on the efficiency of production processes and requires careful study. Therefore, the creation of new samples of industrial structures is impossible without a preliminary assessment of the characteristics of the movement of substances inside the apparatus. Such an assessment is usually carried out using models of the movement of matter - mathematical or physical. In recent years, due to the growth in the capabilities of computer technology, simulation models have also been added to these models. They involve creating an algorithm that imitates the behavior of a real object and conducting further research with a virtual object. The core of such a software simulator is a mathematical or logical model.*

*When studying the movement of substance flows, idealized hydrodynamic models are widely used. Despite their lack of adequacy, they have become widespread due to their ease of use. However, the vast majority of these models, according to their mathematical scheme, belong to the class of continuous and deterministic. At the same time, in real conditions the effect of random factors is significant. This situation requires wider use of stochastic approaches to modeling hydrodynamic processes. In addition, the widespread adoption of digital technologies is stimulating interest in discrete modeling approaches.*

*This article discusses an alternative approach to the analysis of substance flows - the use of discrete simulation models. When creating them, the hypothesis was accepted about the existence of two components of the velocity vector of flow elements - deterministic and random. The work provides a general methodology for creating a model and outlines some of the results of its use. Possible areas of application of the resulting model are considered.*

**Keywords:** simulation modeling, discrete stochastic modeling, hydrodynamics of flows.

#### Для цитирования:

Бобков С.П., Астраханцев Р.Г., Самарский А.А., Павлова Е.А. Имитационная модель движения вещества в технологическом аппарате. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2024. № 02(60). С.32-40. DOI: 10.6060/ivecofin.2024602.681

#### For citation:

Bobkov S.P., Astrakhansev R.G., Samarskiy A.A., Pavlova E.A. Simulation model of the movement of substance in a technological apparatus. *Ivecofin*. 2024. N 02(60). С.32-40. DOI: 10.6060/ivecofin.2024602.681 (in Russian)

#### АКТУАЛЬНОСТЬ

Технологические процессы, как правило, протекают в потоках, движущихся внутри промышленного оборудования. Это характерно для различных отраслей индустрии. Поэтому вопросы моделирования движения сплошных сред в рабочих зонах технологических аппаратов имеют важное значение при конструировании новых образцов оборудования и модернизации существующих. Анализ процесса переноса вещества внутри технического устройства должен учитывать ряд моментов [1, 2]. В первую очередь, важен режим течения и существование пограничного слоя у внутренних стенок. Во-вторых, в реальных условиях возникает неравномерное поле скоростей потока и, как следствие, не одинаковое время пребывания элементов потока в аппарате [3]. Отсюда возникают требования к адекватности математического описания структуры потоков.

В целом к моделям структуры потока предъявляются следующие требования [4, 5]. Отражая физическую сущность реального потока, она, тем не менее, должна иметь достаточно про-

стую математическую форму. При этом необходимо иметь возможность определять параметры модели экспериментальным или расчетным путем [6]. Классическая гидродинамика предлагает ряд уравнений, позволяющих корректно описать движение потока сплошной среды: это уравнение неразрывности потока, уравнение Бернулли, уравнение Навье-Стокса и др. Однако, их использование для анализа процессов внутри технологического оборудования, наталкивается на серьезные трудности, которые вызваны сложностью реальной гидродинамической обстановки внутри оборудования. До недавнего времени для изучения структуры потоков использовались идеализированные математические модели. При их выводе использованы упрощающие предположения, но, тем не менее, такие модели стали разумным компромиссом между корректностью описания и сложностью его реализации. Наибольшее распространение получили типовые модели движущихся потоков, основанные на оценке степени перемешивания частиц потока [7]. К ним относятся модели идеального перемешивания, идеального вытеснения, диффузионные и ячеечные модели.

## ПРЕДМЕТНАЯ ОБЛАСТЬ.

В промышленности встречается достаточно большое количество аппаратов, у которых длина существенно превышает диаметр. Это химические реакторы, колонная аппаратура различного назначения, массообменное и теплообменное оборудование. Все упомянутые образцы часто объединяют понятием «аппарат трубчатого типа» [2]. Для анализа процессов течения сплошной среды в таких устройствах наиболее часто применяются диффузионные модели структуры потока [8]. В общем виде диффузионная модель может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial l} + D_l \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где  $C$  – искомая фазовая переменная (концентрация, температура);

$u$  – линейная скорость потока в аппарате;

$D_l$  – коэффициент диффузии в продольном направлении;

$D_r$  – коэффициент диффузии в радиальном направлении;

$t$  – время;

$l$  – длина аппарата;

$r$  – текущий радиус.

Модель в виде (1) предполагает плоскопараллельное течение сплошной среды в осевом направлении с постоянной скоростью  $u$ . При этом учитываются эффекты продольного и поперечного перемешивания за счет молекулярной диффузии.

В ряде случаев модель (1) упрощают, вводя дополнительные допущения. Так, можно игнорировать эффект поперечной диффузии, приняв соответствующий коэффициент  $D_r$  равным нулю. При этом в правой части уравнения (1) остается только два слагаемых. Здесь мы приходим к однопараметрической диффузионной модели. Если же полностью отказаться от учета влияния перемешивания и также приравнять нулю коэффициент продольного перемешивания  $D_l$ , можно получить простейшую модель потока – модель идеального вытеснения.

Анализ уравнения (1) и его упрощенных вариантов показывает, что они относятся к классу непрерывных детерминированных моделей и представляют собой дифференциальные уравнения с частными производными. Опыт показывает, что данные модели не всегда удобны для технологических расчетов, несмотря на существование мощных современных вычислительных средств. Дело в том, что для решения уравнения указанных уравнений их следует дополнить корректными начальными и граничными условиями, которые часто определить затруднительно. Кроме

того, в уравнениях типа (1) полностью игнорируются стохастические факторы, всегда присутствующие в реальных условиях [9].

Вместе с тем, в связи с возросшими возможностями технических и программных средств компьютерной техники, в последние годы стали активно использоваться методы имитационного моделирования. Этот подход предполагает создание и исследование некоторого моделирующего алгоритма, который имитирует поведение реального объекта – прототипа. Алгоритмическая модель используется для проведения численных экспериментов и позволяет получать информацию о функционировании объекта с учетом случайных входных воздействий [10]. Особенностью имитационных моделей является то, что они позволяют воспроизводить поведение моделируемых систем с сохранением их логической структуры и поведенческих свойств. Более того, остается неизменной и динамика взаимодействий элементов объекта – последовательность во времени событий, происходящих в системе. Все указанное делает имитационный подход удобным для выполнения компьютерных экспериментов с целью проектирования, анализа и оценки функционирования объектов и систем.

## МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ

Возвращаясь к непрерывным детерминированным моделям типа (1), следует напомнить, что аналитические приемы, лежащие в их основе, базируются на понятии бесконечно малых величин. Являясь фундаментом классического математического анализа, бесконечно малые, в сущности, есть математическая абстракция. В реальной действительности существуют пусть малые, но конечные физические величины, которые являются дискретными. Поэтому рассмотрение объектов с дискретных позиций может считаться более адекватным при исследовании объектов и систем различной природы. Одной из разновидностей дискретного подхода являются модели в виде систем динамических элементов. Они представляют собой формальный математический аппарат моделирования процессов, для которых характерны коллективные явления, в том числе процессов течения сплошной среды [11, 12].

При получении дискретной модели трубчатого реактора введем следующие допущения [13, 14]. Поток сплошной среды в аппарате будем рассматривать, как совокупность отдельных элементов (частиц, клеток, ячеек). Размер элементов должен быть достаточным для реализации макроскопические характеристики процесса таких, как плотность, вязкость, давление и пр. Указанные элементы образуют регулярную ортогональную

решетку, что позволяет фиксировать положение элемента координатами.

Суть используемого метода моделирования движения вещества легко объясняется с помощью понятия «меченая» частица, которое широко используется при исследованиях в естественных науках.

Допустим, имеется «меченый» элемент решетки, координаты которого известны, и который обладает определенной скоростью. На каждом шаге дискретного времени вычисляются новые координаты решетки, куда элемент может переместиться, двигаясь с заданной скоростью. Тогда «меченым» становится элемент с вычисленными новыми координатами. Для него также определяется значение скорости движения. Если «меченых» элементов на решетке несколько, процедура переноса «меток» повторяется для их всех на данном шаге по времени. Затем происходит переход к следующему шагу.

Величина скорости движения элемента определяется так. Принимается, что вектор скорости движения состоит из двух составляющих. Первая определяется действием давления и направлена вдоль оси течения. Модуль этой составляющей может быть рассчитан с использованием базовых законов гидродинамики. Вторая компонента рассматривается, как случайный процесс перемещения элементов и обусловлена флуктуациями скорости.

Поскольку в дальнейшем будет рассматриваться объект цилиндрической формы, справедливы следующие рассуждения. Первая (детерминированная) составляющая вектора скорости вычисляется в соответствии с законом Пуазейля:

$$v_r = \frac{\Delta P(R^2 - r^2)}{4\mu l} \quad (2),$$

где  $v_r$  – скорость, как функция расстояния до оси аппарата;

$\Delta P$  – перепад давления;

$R$  – радиус аппарата;

$r$  – расстояние до оси аппарата;

$\mu$  – вязкость среды;

$l$  – длина аппарата.

Использование выражения (2) позволяет легко рассчитать скорость переноса вещества в осевом направлении для любой точки поперечного сечения потока. При этом, поскольку модель дискретная, найденное значение квантуется с шагом решетки  $\Delta h$ . Полученная величина дает возможность определить предварительные координаты нового узла решетки для переноса «метки». Так имитируется макроскопический поток вещества через аппарат под действием перепада давления.

При моделировании второй (вероятностной) составляющей вектора скорости принимается допущение, что «меченый» элемент может

совершить случайное перемещение в любой из соседних узлов решетки. Для выбора конкретного узла при моделировании можно применить метод «выбора по жребью», который часто используется при моделировании исходов, составляющих полную группу несовместных событий. Можно использовать следующий оператор:

$$\begin{cases} (i, j) \rightarrow (i, j+1) & \text{если } 0 < r \leq d_1 \\ (i, j) \rightarrow (i+1, j) & \text{если } d_1 < r \leq d_1 + d_2 \\ (i, j) \rightarrow (i, j-1) & \text{если } d_1 + d_2 < r \leq d_1 + d_2 + d_3 \\ (i, j) \rightarrow (i-1, j) & \text{если } d_1 + d_2 + d_3 < r \leq 1 \end{cases} \quad (3),$$

где  $(i, j)$  – исходные координаты элемента;

$r$  – случайное число, равномерно распределенное в диапазоне  $[0 \div 1]$ ;

$d_i$  – вероятности движения в соответствующем направлении.

В простейшем случае указанные вероятности можно принять одинаковыми:  $d_1 = d_2 = d_3 = 0,25$ . Найденное направление случайного перемещения элемента позволяет скорректировать его новое положение на решетке для данного шага моделирования.

#### ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим моделирование в двухмерном пространстве. Имитационный алгоритм будет состоять из следующих этапов.

1. Ввод исходных данных: длина и диаметр объекта ( $l$  и  $d$ ); шаг дискретизации пространства ( $\Delta h$ ); перепад давления ( $\Delta P$ ); вязкость среды ( $\mu$ ); вектор вероятностей случайного перемещения элементов ( $d_i$ ); шаг дискретизации по времени и общее число шагов моделирования ( $\Delta t$  и  $T$ ).
2. Задание начального состояния массива «меченых» элементов (их исходное размещение).
3. Продвижение имитационного времени на один шаг.
4. Имитация процесса движения элементов: выбор очередного элемента, определение его нового положения, согласно методике, описанной выше, переход к следующему элементу. К концу данного этапа формируется массив состояние элементов на данном шаге по времени.
5. Если шаги по времени не исчерпаны, то возврат к этапу 3.
6. Вывод и визуализация результатов.

Таким образом, на каждом шаге дискретного времени происходит синхронное обновление положения каждого «меченого» элемента, моделирующее движение вещества внутри объекта. Накопленная к окончанию модельного опыта статистика в виде последовательности массивов состояния элементов, служит основой для последующего анализа

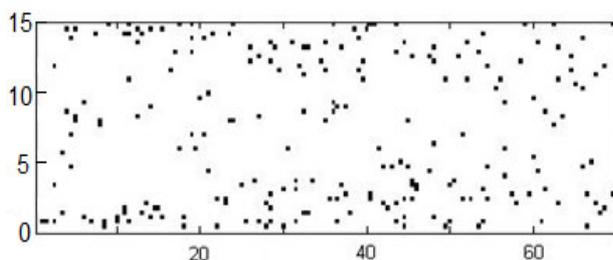
и графической иллюстрации моделируемого процесса. Алгоритм был реализован в среде Matlab.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА.

В качестве прототипа при имитационном моделировании течения жидкости был взят объект цилиндрической формы, имеющий внутренний диаметр  $d = 0,015$  м и длину  $l = 0,07$  м. Шаг дискретизации пространства составлял  $\Delta h = 1/3$  мм, модельное время квантовалось с шагом  $\Delta t = 1/15$  с, вероятностные составляющие скоростей в выражении (3) приняты в предположении, что вероятности направления движения  $d_i$  одинаковы, т.е. равны 0,25. В качестве сплошной среды рассматривался воздух при нормальных условиях с вязкостью  $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$  Па·с. В процессе численных экспериментов перепад давления лежал в диапазоне  $[0,002 \div 0,02]$  Па, что соответствовало изменению средней скорости потока  $[0,01 \div 0,06]$  м/с. Рассчитанное при данных условиях значение числа Рейнольдса не превышало 20, что делает корректным применение уравнения Пуазейля.

Ниже представлены некоторые результаты имитационного моделирования и их обсуждение. При рассмотрении рисунков необходимо учитывать, что вследствие вероятностного характера модели каждая реализация процесса является случайной.

Как отмечалось выше, дискретный подход позволяет достаточно просто визуализировать динамику потока в аппарате. Для этого достаточно представить ряд последовательных состояний системы по шагам дискретного времени. Поскольку возможности печатного издания не позволяют такую демонстрацию, на рис. 1 приведен отдельный кадр возможного видеоряда.

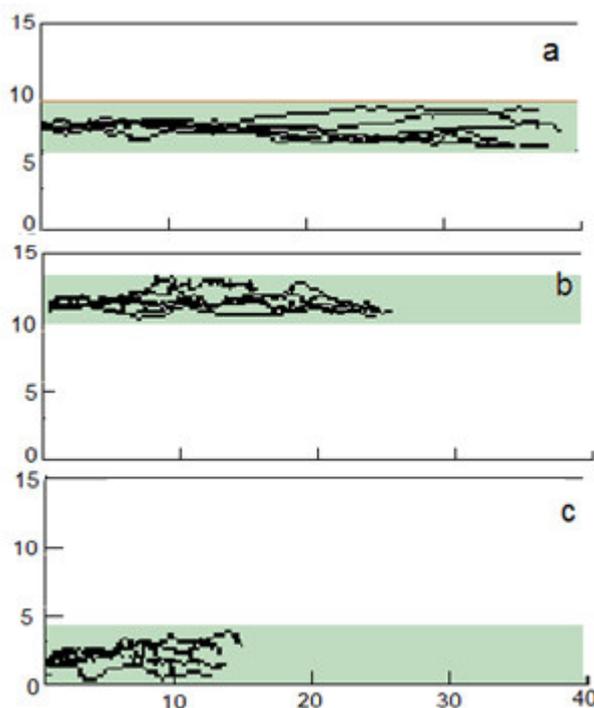


**Рисунок 1. Визуализация одного из возможных состояний системы**  
**Figure 1. Visualization of one of the possible states of the system**

На рис.1. представлена локализация элементов в объекте в установившемся режиме при средней скорости потока  $v_{cp} = 0,015$  м/с в момент времени  $t = 10$  с. «Меченые» элементы генерировались во входном сечении и далее двигались в потоке среды слева направо. Приведенные результаты показывают, что по мере продвижения

доля элементов в пристеночных зонах увеличивается. Для объяснения данного факта можно предположить, что там они находятся дольше, чем в районе центральной оси.

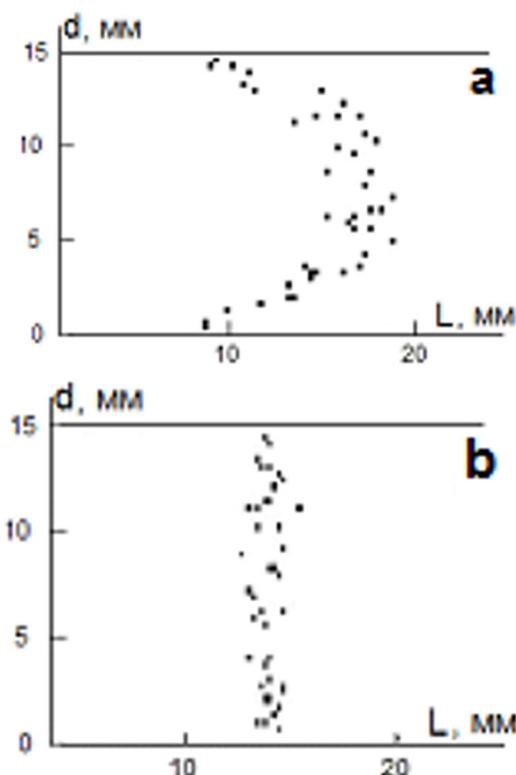
Это предположение подтверждается анализом траекторий элементов, представленных на рис. 2. Здесь представлены реализации и зоны расположения траектории элементов, которые начинали движение из различных точек входного сечения. Продолжительность движения потока равна 4,5 с, остальные параметры были приведены выше.



**Рисунок 2. Траектории движения элементов в потоке и зоны их расположения**  
**Figure 2. Trajectories of element movement in the flow and zones of their location**

Из рис. 2. видно, что скорости отдельных элементов меняются по величине и направлению. При этом элементы, находящиеся в начальный момент на оси потока (рис. 2а), проходят более длинный путь и испытывают меньшее влияние случайных воздействий. При удалении исходной точки от оси (рис. 2b) элемент проходит меньший путь. И, наконец, если движение начинается около стенки (рис. 2с), то траектория становится весьма искривленной, элемент движется медленно, постоянно меняет направление.

Неравномерность распределения скоростей потока по сечению также подтверждается результатами рассмотрения формы профиля скоростей. Результаты, полученные при средней скорости  $v_{cp} = 0,0075$  м/с в момент времени 2 с представлены на рис. 3.



**Рисунок 3. Визуализация профилей скорости потока:**

**a) – дискретная модель;**

**b) – диффузионная модель**

**Figure 3. Visualization of flow velocity profiles:**

**a) – discrete model; b) – diffusion model**

Из рис. 3а видно, что фронт скоростей движения в дискретной модели имеет форму, близкую к параболической, но он размыт случайным перемещением элементов. При этом локальная скорость движения убывает по мере удаления

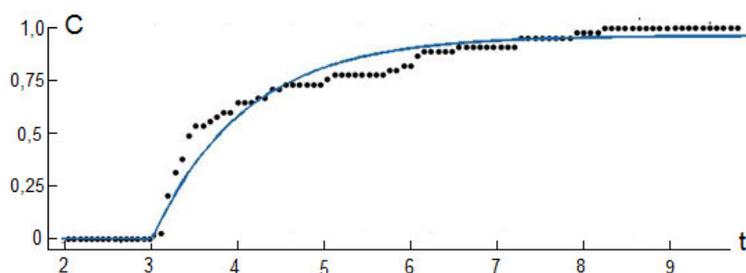
от оси потока к стенкам аппарата. На рис. 3б для сравнения приведен профиль скорости потока для диффузионной модели (уравнение (1)). Видно, что хаотическое перемешивание элементов здесь присутствует, однако средняя скорость среды постоянна по сечению потока.

При исследовании типовых идеализированных моделей потоков часто используют анализ функций отклика объекта на стандартное возмущение [15]. Этот прием полезен для идентификации модели и исследования ее динамических характеристик. Представляет интерес рассмотреть эти важные показатели предлагаемой дискретной модели. На рис. 4. показана реакция рассматриваемой дискретной модели на ступенчатое возмущение. Представленная кривая соответствует средней скорости потока  $v_{cp} = 0,015$  м/с.

Для получения отклика модели на ступенчатое возмущение использовался следующий прием. Элементы на входе в исследуемую зону генерировались на каждом шаге по времени с одинаковой интенсивностью и подсчитывались на выходе. На оси абсцисс графика расположено время, на оси ординат – количество частиц, покинувших зону, нормированное на единицу. Полученные в эксперименте точки аппроксимированы экспоненциальной функцией.

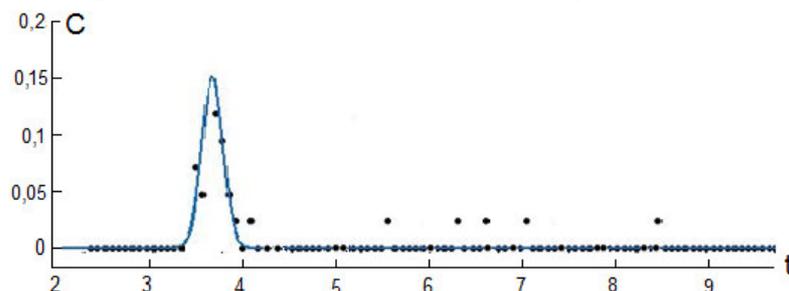
На рис. 5. показан отклик дискретной модели на другое стандартное возмущение – импульсное при тех же параметрах процесса.

При получении этой кривой клетки на входе в исследуемый объем генерировались однократно. При аппроксимации полученных точек использовалась функция Гаусса.



**Рисунок 4. Кривая отклика модели на ступенчатое возмущение**

**Figure 4. Curve of model response to step disturbance**

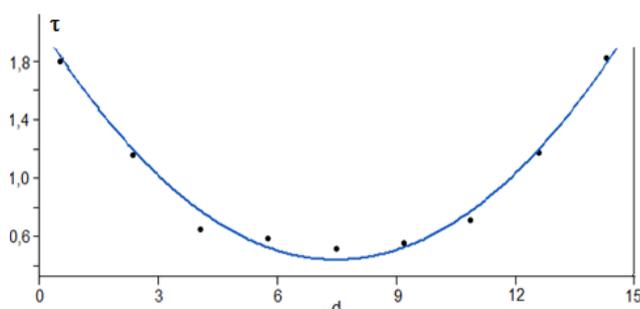


**Рисунок 5. Кривая отклика модели на импульсное возмущение**

**Figure 5. Curve of model response to impulse disturbance**

Представляет интерес сравнить полученные результаты с теми же показателями для диффузионной модели, описываемой уравнением (1). Анализ показывает, что функции отклика обеих моделей достаточно похожи. Очевидно, это связано с тем фактом, что использованный в алгоритме способ моделирования стохастической составляющей вектора скорости в дискретной модели, аналогичен описанию диффузии [16].

Наконец, обработка результатов имитационных экспериментов с дискретной моделью позволила более подробно рассмотреть зависимость времени пребывания элементов внутри объекта от его локализации в выходном сечении. На рис. 6. представлена кривая связи времени пребывания элементов с координатами поперечного сечения объекта при средней скорости потока  $v_{cp} = 0,015$  м/с.



**Рисунок 6. Распределение времени пребывания элементов по сечению аппарата**  
**Fig.6. Distribution of elements residence time over the cross section of the apparatus**

Точки на графике получены после статистической обработки серии опытов. Кривая является результатом параболической аппроксимации. На оси абсцисс указаны значения диаметра объекта, на оси ординат – время пребывания, нормированное на среднее значение, равное 4,1 с.

Нетрудно заметить, что дискретная модель позволила отойти от использования усредненного параметра – среднее время пребывания и установить закономерности распределения времени пребывания элементов по сечению объекта.

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Можно отметить, что исходные предпосылки, использованные при создании имитационной дискретной модели, можно считать правомерными. Системы дискретных динамических элементов успешно используются при моделировании целого ряда технологических, экономических, социальных и других процессов. Эти модели хорошо сочетают в себе возможности детерминированного и стохастического описания явлений и объектов.

В данной работе рассматриваются две составляющих скорости элементов, одна из которых получена на основе фундаментального закона гидродинамики, а вторая широко используется в физике для описания движения микрочастиц [17]. Оба этих факта подтверждают корректность постановки задачи.

Сравнивая предлагаемую имитационную модель с диффузионной моделью, можно отметить, что они обе предполагают существование двух механизмов движения элементарных объемов в потоке: основного и перемешивающего. Но, в отличие от диффузионной, дискретная модель демонстрирует уменьшение скорости по мере приближения к стенкам [18-21]. Такое поведение элементов потока представляется более правдоподобным, чем принятый в диффузионной модели поршневой режим течения.

Результаты, касающиеся исследования времени пребывания элементов потока в аппарате, полезно учитывать при конструировании оборудования.

Еще одним полезным качеством имитационной дискретной модели можно считать ее удобство в плане визуализации и компьютерной анимации результатов машинных экспериментов. Более того, в силу своей специфики, такая модель хорошо пригодна для организации параллельных вычислений при использовании современных вычислительных средств. В таких условиях компьютер может не только выполнять вычислительные функции, но также преобразовывать входную и выходную информацию в форму удобную для восприятия и работы. То есть имитационная дискретная модель становится базой своего рода экспериментальной установки для проведения изучения объекта в виртуальном мире [22-24].

Сказанное выше позволяет сделать выводы о перспективности использования предлагаемой имитационной дискретной модели для исследования течений сплошной среды в различных видах технологического оборудования. Также аналогичные подходы могут применяться для анализа движения неоднородных потоков, процессов в силовых полях – гравитационных, электрических, магнитных и пр. Кроме того, физическая простота исходных предпосылок и наглядность реализации результатов дают возможность рекомендовать рассмотренные модели при изучении соответствующих инженерных дисциплин в вузах.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*  
*The authors declare no conflict of interest.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г.** Общая химическая технология. М.: Ленанд. 2022. 512 с.
2. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: «Альянс». 2004. 735 с.
3. **Жилин Ю.Н., Зарубина А.Н., Олиференко Г.Л. и др.** Инженерная химия. Химические реакторы. М.: МГУЛ. 2016. 140 с
4. **Гумеров А. М.** Математическое моделирование химико-технологических процессов. СПб.: Лань. 2022. 176 с.
5. **Мошинский А.И.** Математическое моделирование химико-технологических и биотехнологических процессов. М.: КноРус. 2021. 335 с.
6. **Балакирев В.С. и др.** Математическое моделирование технологических процессов. Ярославль: ИД Н.П. Пастухова. 2018. 352 с.
7. **Некрасов А.В.** Компьютерное моделирование гидродинамических процессов систем водоснабжения. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2014. 312 с.
8. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н.** Системный анализ процессов химической технологии. М.: Юрайт. 2018. 499 с.
9. **Звонарев С.В.** Основы математического моделирования. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2019. 112 с.
10. **Заварухин С.Г.** Математическое моделирование химико-технологических процессов и аппаратов. Новосибирск: НГТУ. 2017. 86 с.
11. **Бандман О.Л.** Клеточно-автоматные модели естественных процессов и их реализация на современных компьютерах. *Прикладная дискретная математика*. 2017. № 35. С. 102-121.
12. **Бобков С.П.** Использование дискретных подходов для моделирования основных процессов химической технологии. *Рос. Хим.ж.* 2019. Т. LXIII. №3-4.
13. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Использование вероятностных клеточных автоматов для моделирования течения жидкости. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. №2(70) С. 47-54. DOI: 10.6060/snt.20216703.0008.
14. **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.
15. **Цивинский Д.Н.** Приложение метода возмущений к исследованию структуры потоков в аппаратах подготовки и транспорта нефти и газа. Самара: СГТУ. 2012. 212 с.
16. **Кириченко Н.А.** Термодинамика, статистическая и молекулярная физика. М.: Физматлит. 2012. 192 с.
17. **Бекман И.Н., Романовский И.П.** Феноменологическая теория диффузии в гетерогенных средах и ее применение для описания процессов мембранного разделения. *Успехи химии*. 1988. Т. 57. Вып. 6. С. 944-958.
18. **Суворов И.А.** Разработка автоматизированной системы для анализа качества текстильной поверхности волоконно-композитного слоя с использованием систем обработки изображений. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством [Ивэкофин]*. 2022. № 3(53). С. 101-108. DOI: 10.6060/ivecofin.2022533.619. EDN XJIJSA.
19. **Макшанова А.О., Зимнуров М.Ф.** Мемоизация и агрегация в визуализации построения химических соединений. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством [Ивэкофин]*. 2022. № 2(52). С. 106-111. DOI: 10.6060/ivecofin.2022522.607. EDN YSSNPT.

## REFERENCES

1. **Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengarten M.G.** General chemical technology. Moscow: Lenand. 2022. 512 p. (in Russian).
2. **Kasatkin A.G.** Basic processes and apparatus of chemical technology. Moscow: «Al'yans». 2004. 735 p. (in Russian).
3. **Zhilin Yu.N., Zarubina A.N., Oliferenko G.L. and oth.** Engineering chemistry. Chemical reactors. Moscow: MGUL. 2016. 140 p. (in Russian).
4. **Gumerov A.M.** Mathematical modeling of chemical and technological processes. St. Petersburg: Lan. 2022. 176 p. (in Russian).
5. **Moshinsky A.I.** Mathematical modeling of chemical-technological and biotechnological processes. Moscow: KnoRus. 2021. 335 p. (in Russian).
6. **Balakirev V.S. and oth.** Mathematical modeling of technological processes. Yaroslavl: Publishing house of N.P. Pastukhov. 2018. 352 p. (in Russian).
7. **Nekrasov A.V.** Computer modeling of hydrodynamic processes of water supply systems. Ekaterinburg: Ural University Publishing House. 2014. 312 p. (in Russian).
8. **Kafarov V.V., Dorokhov I.N.** System analysis of chemical technology processes. Moscow: Yurayt. 2018. 499 p. (in Russian).
9. **Zvonarev S.V.** Basics of mathematical modeling. Ekaterinburg: Ural University Publishing House. 2019. 112 p. (in Russian).
10. **Zavarukhin S.G.** Mathematical modeling of chemical technological processes and apparatus. Novosibirsk: NSTU. 2017. 86 p. (in Russian).
11. **Bandman O.L.** Cellular-automata models of natural processes, implementation on supercomputers. *Applied discrete mathematics*. 2017. N 35. P. 102-121. (in Russian).
12. **Bobkov S.P.** Use of Discrete Approaches for Simulation the Basic Processes of Chemical Technology. *Russian Journal of General Chemistry*. 2019. Vol. LXIII. N 3-4. (in Russian).
13. **Bobkov S.P., Astrakhanseva I.A.** Using probabilistic cellular automata for liquid flow simulation. *Modern high technologies. Regional application*. 2022. N 2(70). P. 47-54. DOI: 10.6060/snt.20216703.0008. (in Russian).
14. **Bobkov S.P., Astrakhanseva I.A.** Discrete stochastic model of flow hydrodynamics. *Modeling of systems and processes*. 2023. N 2. P. 7-14. DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-2-7. (in Russian).
15. **Tsivinsky D.N.** Application of the disturbances method to the study of flow structure in oil and gas preparation and transport devices. Samara: SSTU. 2012. 212 p. (in Russian).
16. **Kirichenko N.A.** Thermodynamics, statistical and molecular physics. Moscow: Fizmatlit. 2012. 192 p. (in Russian).
17. **Bekman I.N., Romanovskiy I.P.** Phenomenological theory of diffusion in heterogeneous media and its application to describe membrane separation processes. *Russian Chemical Reviews*. 1988. Vol. 57. Is. 6. P. 944-958. (in Russian).
18. **Suvorov I.A.** Development of an automated system for textile surface quality analysis of a fiber composite layer using image processing systems. *Ivecofin*. 2022. N 03(53). C.101-108. DOI: 10.6060/ivecofin.2022533.619. EDN XJIJSA. (in Russian).
19. **Makshanova A.O., Zimnurov M.F.** Memoization and aggregation in the visualization of the chemical compounds construction. *Ivecofin*. 2022. N 02(52). C.106-111. DOI: 10.6060/ivecofin.2022522.607. EDN YSSNPT. (in Russian).
20. **Mirolyubova A.A., Balakin M.A., Miloslavsky M.Yu.** Forecasting the china rmb ratebased on genetic algorithm of neural networks. *Ivecofin*. 2023. N 04(58). C.62-70. DOI: 10.6060/ivecofin.2023584.665. EDN RHZBMO. (in Russian).
21. **Morozov E.N., Gorev S.V.** Mathematical models for optimization of machine-readable regulation. *Ivecofin*. 2023. N04(58). C.71-78. DOI: 10.6060/ivecofin.2023584.666. EDN LLSUGG. (in Russian).

20. **Миролюбова А.А., Балакин М.А., Милославский М.Ю.** Прогнозирование курса китайского юаня на основе генетического алгоритма нейросетей. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством [Ивэкофин]*. 2023. № 4(58). С. 62-70. DOI: 10.6060/ivecofin.2023584.665. EDN RHZBMO.
21. **Морозов Е.Н., Горев С.В.** Математические модели для оптимизации машиночитаемых регулятивных систем. *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством [Ивэкофин]*. 2023. № 4(58). С. 71-78. DOI: 10.6060/ivecofin.2023584.666. EDN LLSUGG.
22. **Зимнуров М.Ф., Астраханцева И.А., Грименицкий П.Н.** Системный анализ и оптимизация количественных показателей эффективности в технологических проектах на основе гибких методологий. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 3(75). С. 61-68. DOI: 10.6060/snt.20237503.0008. EDN OYNXHV.
23. **Астраханцева И.А., Горев С.В., Астраханцев Р.Г.** Фрактальный анализ в оценке эффективности и надежности сложных технических систем. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. №4(76). С. 60-68. DOI: 10.6060/snt.20237604.0008. EDN NBDYHR.
24. **Павлова А.Н., Кузнецова О.В.** Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 1(65). С. 78-87. DOI: 10.6060/snt.20216501.0010. EDN СКПИUI.
22. **Zimnurov M.F., Astrakhantseva I.A., Grimenitsky P.N.** System analysis and optimization of quantitative performance indicators in technology projects based on flexible methodologies. *Modern high technology. Regional application*. 2023. N 3(75). P. 61-68. DOI: 10.6060/snt.20237503.0008. EDN OYNXHV. (in Russian).
23. **Astrakhantseva I.A., Gorev S.V., Astrakhantsev R.G.** Fractal analysis in assessing the efficiency and reliability of complex technical systems. *Modern high-tech technologies. Regional application*. 2023. N 4(76). P. 60-68. DOI: 10.6060/snt.20237604.0008. EDN NBDYHR. (in Russian).
24. **Pavlova A.N., Kuznetsova O.V.** Mathematical modeling and optimization of technological processes. *Modern high technology. Regional application*. 2021. N 1(65). P. 78-87. DOI: 10.6060/snt.20216501.0010. EDN СКПИUI (in Russian).

Поступила в редакцию 05.04.2024  
 Принята к опубликованию 19.04.2024

Received 05.04.2024  
 Accepted 19.04.2024