

УДК 621.928, 621.929
DOI 10.48612/ntp/upe4-5148-gk7x

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРООЖИЖЕННОМ СЛОЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ МАРКОВА

**В. А. ОГУРЦОВ, А. В. ШЕНБЕРЕВА, Ю. В. ХОХЛОВА,
Вс. А. ОГУРЦОВ, А. Д. ПАРАМОНОВ, Н. С. КАСЬЯНЕНКО**
Ивановский государственный политехнический университет,
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru, sshenbereva@gmail.com, hohjul@mail.ru,
willdday@yandex.ru, 9109800120@mail.ru, kasianenko@gmail.com

Процессы фракционирования и перемешивания сыпучих строительных материалов являются ключевыми этапами подготовки сырья для производства высококачественных строительных изделий. От их эффективности напрямую зависят качество продукции, энергопотребление и себестоимость. В современных условиях промышленность сталкивается с зависимостью от импортного оборудования для переработки сыпучих сред – вибрационных грохотов и смесителей, стоимость которых достигает 30 млн рублей за единицу, а запасные части и обслуживание формируют устойчивую внешнюю зависимость. Это противоречит задачам технологического суверенитета и импортозамещения, поставленным государством.

Несмотря на широкое применение, фундаментальные механизмы движения частиц в виброожигенных слоях остаются недостаточно изученными. Современные теоретические модели не позволяют прогнозировать поведение многокомпонентных дисперсных систем при изменении режимных и конструктивных параметров. Эмпирический подход доминирует в проектировании, что снижает эффективность оборудования и увеличивает затраты.

Целью настоящей работы является разработка универсальной стохастической модели процессов виброгрохочения и виброперемешивания, основанной на аппарате цепей Маркова. Предлагаемая модель позволяет описывать кинетику обоих процессов на единой математической основе, что представляет собой научную новизну описания движения ансамбля частиц в виброожигенном слое. Для этого предлагается использовать ячеечный подход, где рабочий объем аппарата делится на зоны (ячейки), а переход частиц между ними описывается вероятностями. Разработана одномерная модель для периодического грохочения и перемешивания. Показано, что известные качественные закономерности этих процессов (например, асимптотическое стремление эффективности грохочения к максимуму или снижение неоднородности смеси до минимума) могут быть получены в результате численного эксперимента по предложенной модели. Результаты подтверждают адекватность и перспективность применения стохастических моделей для решения задач цифрового моделирования и оптимизации технологий переработки сыпучих материалов. Данное исследование имеет прямую связь с темой гражданской защиты, так как повышение качества и надежности строительных материалов, производимых с использованием таких моделей, напрямую влияет на долговечность, прочность и безопасность зданий и сооружений, особенно в сейсмоактивных и экстремальных климатических зонах.

Ключевые слова: сыпучие материалы, грохочение, перемешивание, цепи Маркова, вектор состояния, матрица переходных вероятностей.

STOCHASTIC MODELING OF FRACTIONATION AND MIXING PROCESSES OF FRACTURED CONSTRUCTION MATERIALS IN A VIBRATING LIQUID SLAB BASED ON MARKOV CHAIN THEORY

**V. A. OGURTSOV, A. V. SHASHENBEREVA, Yu. V. KHOKHLOVA,
Vs. A. OGURTSOV, A. D. PARAMONOV, N. S. KASYANENKO**
Ivanovo State Polytechnic University,
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru, sshenbereva@gmail.com, hohjul@mail.ru,
willdday@yandex.ru, 9109800120@mail.ru, kasianenko@gmail.com

The processes of fractionation and mixing of loose construction materials are key stages in the preparation of raw materials for the production of high-quality construction products. The quality of the products, energy consumption, and cost depend directly on the efficiency of these processes. In today's conditions, the industry faces a dependence on imported equipment for processing loose media, such as vibrating screens and mixers, which can cost up to 30 million rubles per unit, and spare parts and maintenance create a stable external dependence. This contradicts the goals of technological sovereignty and import substitution set by the government.

Despite their widespread use, the fundamental mechanisms of particle motion in fluidized beds remain insufficiently studied. Current theoretical models do not allow for predicting the behavior of multi-component dispersed systems when changing operating and design parameters. An empirical approach dominates in design, which reduces equipment efficiency and increases costs.

The aim of this work is to develop a universal stochastic model of the processes of vibro-screening and vibro-mixing, based on the Markov chain apparatus. The proposed model allows to describe the kinetics of both processes on a single mathematical basis, which represents a scientific novelty. To do this, it is proposed to use a cell approach, where the working volume of the apparatus is divided into zones (cells), and the transition of particles between them is described by probabilities. A one-dimensional model for periodic screening and mixing has been developed. It is shown that the known qualitative patterns of these processes (for example, the asymptotic approach of the efficiency of screening to a maximum or the reduction of the heterogeneity of the mixture to a minimum) can be obtained as a result of a numerical experiment using the proposed model. The results confirm the adequacy and prospects of using stochastic models for solving problems of digital modeling and optimization of technologies for processing bulk materials.

Keywords: bulk materials, screening, mixing, Markov chains, state vector, transition probability matrix.

Введение

Производство высококачественных строительных материалов, таких как автоклавный газобетон, сборные железобетонные конструкции и специализированные сухие смеси, требует точного контроля за фракционным составом исходного сырья и однородностью конечного продукта. Нарушение этих параметров приводит к снижению прочности, морозостойкости и долговечности изделий, что ставит под угрозу безопасность эксплуатации зданий и сооружений. В условиях роста урбанизации и усиления экологических и техногенных рисков, обеспечение надежности строительных конструкций становится одной из ключевых задач гражданской защиты населения и инфраструктуры.

Фракционирование (виброгрохочение) и перемешивание являются основными операциями на предприятиях строительной индустрии. Однако традиционные методы настройки и проектирования соответствующего оборудования часто носят эмпирический характер. Это приводит к значительным потерям времени и ресурсов на пуско-наладочные работы и снижает общую эффективность производства. Существующие импортные образцы вибрационного оборудования, хотя и обладают высокой производительностью, создают зависимость от внешних поставщиков, что противоречит стратегическим целям технологического суверенитета России.

В связи с этим, актуальным направлением является создание отечественных, научно обоснованных методик расчета и оптимизации

процессов переработки сыпучих материалов. В работах В.Е. Мизонова, Е.А. Баранцевой, А.В. Митрофанова, В.А. Огурцова, Н. Berthiaux, A. Camelo, K. Tannous, D. Chakraborty, D. Ramkrishna показана применимость стохастических моделей, основанных на теории цепей Маркова, для описания кинетики процессов перемешивания сыпучих материалов (чаще всего в аппаратах лопастного типа), моделирование процессов тепло-массопереноса в кипящем (псевдооживленном) слое, грохочение, дробление и другие [1 – 4]. В этих работах для каждого процесса рассматривалась своя модель. Однако комплексная, универсальная модель, способная описывать как грохочение, так и перемешивание на единой математической основе, до настоящего времени не была предложена.

Целью данной работы является разработка и апробация такой универсальной стохастической модели процессов фракционирования и перемешивания сыпучих материалов в виброоживленном слое.

Методология

Процессы перемешивания и фракционирования дисперсной среды в поле вибраций для получения сыпучих строительных материалов с заданным качеством фракционных составов имеют единую стохастическую природу. Именно эта стохастичность делает адекватным математическим аппаратом для их описания теорию случайных процессов. В качестве первой и наиболее эффективной модели для изучения динамики отдельных частиц в таком

сложном ансамбле предлагается использовать однородные цепи Маркова, которые успешно применялись для описания процессов в системах со случайными свойствами. Данный подход позволяет абстрагироваться от чрезвычайно сложного детерминированного описания взаимодействия тысяч частиц и представить их движение как последовательность случайных переходов между дискретными состояниями.

Модель предполагает дискретизацию рабочей зоны вибрационного грохота или смесителя на систему взаимодействующих ячеек идеального смешения. Слой сыпучего материала состоит из частиц разного размера, поэтому следует отметить, что модель рассматривает миграцию по виброоживленному слою частиц определенной фракции, которую будем считать ключевым компонентом. Слой сыпучего

материала разделен на m дискретных ячеек (рис. 1). Таким образом, совокупность всех m ячеек описывает весь диапазон возможных локаций частиц ключевого компонента.

Каждая ячейка характеризуется своей вероятностью S нахождения в ней этих частиц в произвольный момент времени. Набор вероятностей формирует вектор состояния, сумма компонентов которого тождественно равна единице, определяющийся как

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \end{bmatrix}. \quad (1)$$

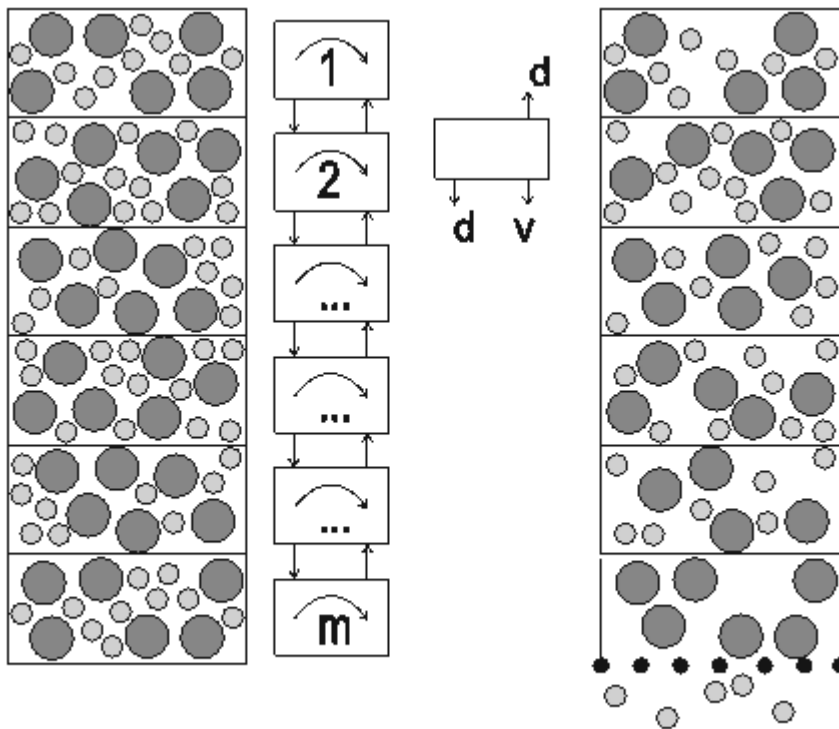


Рис. 1. Модель цепи Маркова для процессов перемешивания и грохочения, вероятности возможных межъячеечных переходов частиц ключевого компонента

Динамика переноса материальных компонентов определяется матричным оператором переходных вероятностей, формализу-

ющим механизмы межъячеечного массообмена, который определяется как

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 - d - v & d & \dots & 0 & 0 \\ d + v & 1 - 2d - v & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d + v & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 - 2d - v & d \\ 0 & 0 & \dots & d + v & 1 - d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где d – безразмерный коэффициент макродиффузии, v – безразмерная скорость сегрегационного расслоения. Диффузионный перенос равновероятен и возможен как вверх по ячейкам цепи, так и вниз. Сегрегационный перенос частиц ключевого компонента направлен строго вниз.

Развитие цепи во времени определяется последовательностью матричных преобразований

$$S^{k+1} = P S^k \quad (3)$$

Методология исследования предполагает представление эволюции системы на дискретной временной шкале с элементарным шагом Δt . В рамках данного подхода интервал времени Δt определяет фундаментальный микропроцесс, в течение которого реализуется принцип локальности переходов: частицы ключевого компонента могут мигрировать исключительно в смежные состояния (ячейки), что соответствует физическому ограничению на дальнедействующие скачки в конфигурационном пространстве. Дискретная временная ось формализуется соотношением:

$$t_k = k \Delta t, \quad (4)$$

где порядковый номер перехода k ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) служит целочисленным дискретным аналогом непрерывного времени. Дискретизация сохраняет топологию временной эволюции при соблюдении условия Δt существенно меньше характерного времени процесса.

После выполнения процедуры параметрической идентификации, в результате которой определены стохастические коэффициенты d (диффузионный перенос) и V (сегрегационное расслоение), кинетика процесса гомогенизации (перемешивания) полностью детерминирована системой рекуррентных матричных уравнений (1)-(3). Эта система описывает эволюцию вектора состояния S^k во времени, моделируя перераспределение частиц между ячейками идеального смешения.

Для адаптации базовой модели к процессу сепарации на вибрационном сите (грохотение) требуется введение дополнительного механизма, учитывающего извлечение в подситовое пространство частиц фракций, имеющих размер меньший размера отверстий сита. Пусть m – индекс ячейки, примыкающей к просеивающей поверхности. На каждом $(k+1)$ -ом временном шаге из состояния S_m^{k+1} исключается доля проходных частиц $q^{(k+1)}$, описываемая соотношением:

$$q^{(k+1)} = S_m^{k+1} v_f, \quad (5)$$

где v_f – вероятность сепарации, определяемая как доля частиц ключевого компонента (с диаметром, меньшим апертуры сита), которые, достигнув просеивающей поверхности в течение интервала Δt , покидают рабочий объем, переходя в подрешетный продукт. Следовательно, после акта сепарации состояние ячейки m должно быть скорректировано оператором присваивания:

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f) \quad (6)$$

Данная операция отражает мгновенное уменьшение концентрации частиц проходовой фракции в приграничной ячейке в результате их успешного просеивания. Таким образом, исходная модель, дополненная сепарационным членом v_f приобретает универсальность, позволяя единым стохастическим аппаратом описывать как процессы смешения, так и процессы классификации сыпучих сред.

Предлагаемый методологический аппарат вводит фундаментальное понятие вектора состояния системы, представляющего собой формализованный образ исследуемого объекта – виброактивированного слоя сыпучего материала в рабочей камере аппарата. Эволюция данного вектора во времени описывается уравнением (1), которое математически воплощает пространственно-временное распределение концентрации частиц целевой фракции по дискретизированному объему. Таким образом, многомерный вектор состояния служит цифровым двойником физической реальности, позволяя отслеживать изменение относительного содержания частиц в каждой элементарной ячейке системы.

Ключевым оператором, управляющим динамикой вектора состояния, выступает матрица переходных вероятностей (2). Данная матрица является математической репрезентацией внешнего энергетического воздействия на дисперсную среду – будь то вибрация сита грохота или колебания рабочей камеры смесителя. Через свои элементы, выраженные стохастическими коэффициентами (диффузии d и сегрегации v), матрица кодирует законы миграции частиц, определяя вероятности их перехода между соседними ячейками и, следовательно, закономерности изменения локальных концентраций. Это обеспечивает универсальность модели: один и тот же математический формализм способен имитировать работу как классифицирующего (грохот), так и гомогенизиру-

ющего (смеситель) оборудования, задаваясь лишь конфигурацией граничных условий и спецификой матрицы P .

Для количественного анализа кинетики грохочения предлагается использовать динамический показатель степени извлечения ε , характеризующий изменение массовой доли выхода частиц мелких фракций от времени процесса

$$\varepsilon^{(k+1)} = \sum_{k=0}^{k+1} q^{(k+1)} \quad (7)$$

Данная параметризация кинетики обеспечивает инструмент для эффективного технологического процесса грохочения через анализ зависимости $\varepsilon(t)$ от режимных параметров вибрации и свойств сыпучего материала.

Для количественной оценки качества смешивания использовался статистический критерий, основанный на определении среднеквадратического отклонения фактического распределения концентраций ключевого компонента от теоретически идеального (равномерного) распределения по ячейкам системы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (S_i - \bar{S}_i)^2}, \quad (8)$$

где S_i – концентрация частиц ключевого компонента в ячейке с номером i , \bar{S}_i – концентрация частиц ключевого компонента в ячейке с номером i при их идеальном распределении по ячейкам цепи.

Данный параметр σ выступает в роли интегрального мероопределятеля степени неоднородности смеси. Его величина прямо пропорциональна отклонению реальной микроструктуры композита от идеального состояния равномерного распределения. Стремление $\sigma \rightarrow 0$ свидетельствует о достижении высокой степени гомогенизации, в то время как большие значения указывают на наличие значительной локальной сегрегации или недостаточную эффективность процесса смешивания. Использование среднеквадратического отклонения позволяет проводить анализ влияния режимных параметров (амплитуды и частоты вибрации) и времени обработки на конечное качество продукта.

Результаты исследования

Были проведены численные эксперименты для обоих процессов. На рис. 2 показан пример численного эксперимента распределения частиц ключевого компонента по ячейкам цепи в различные моменты времени для процессов грохочения и перемешивания при заданных стохастических параметрах: безразмерный коэффициент диффузии $d=0,05$, безразмерная скорость сегрегации $V=0,02$, безразмерная скорость просеивания частиц ключевого компонента через отверстия сита при грохочении $V_f=0,05$. Слой сыпучего материала разбивался на 6 ячеек. В начальный момент времени частицы ключевого компонента находились в первых двух ячейках.

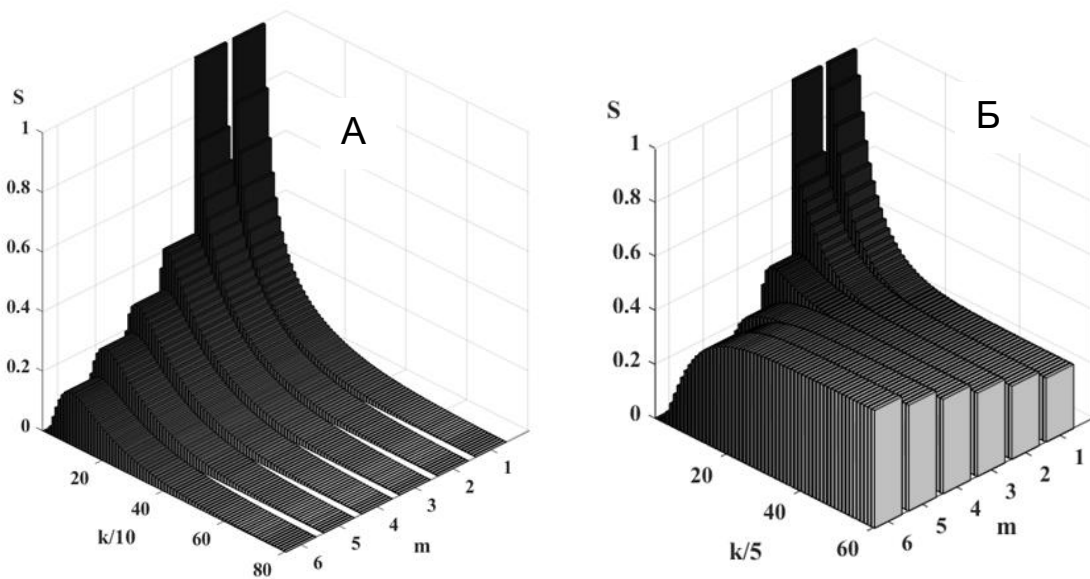


Рис. 2. Распределение частиц ключевого компонента по ячейкам цепи в различные моменты времени при грохочении (А) и перемешивании (Б)

Основным критерием, характеризующим эффективность процесса грохочения, является сепарационная полнота извлечения частиц целевой фракции, количественно описываемая кинетической зависимостью степени обогащения от времени пребывания материала на классифицирующей поверхности [7]. Динамика данного процесса изображена на рис. 3, где представлена полученная кинетическая кривая сепарации, отражающая изменение массовой доли извлеченного ключевого компонента во временном интервале для рассматриваемого численного эксперимента.

Кривая имеет асимптотический характер, что соответствует известному физическому явлению: с течением времени количество частиц проходовых фракций накапливается, а на поверхности сита остается все больше

непроходных частиц, что замедляет процесс просеивания. Чем больше время грохочения, тем выше эффективность процесса. Однако реальное время пребывания материала на грохоте ограничено. Для каждого конкретного случая оно имеет определенное значение и зависит от длины сита, угла его наклона, амплитуды и частоты колебаний. Зная реальное время пребывания сыпучего материала на сите грохота можно определить эффективность промышленного процесса сепарации.

На рис. 4 представлена зависимость степени однородности смеси от времени обработки, описывающая динамику процесса смешивания. Как и ожидалось, с увеличением времени перемешивания значение σ уменьшается, стремясь к минимальному уровню, что свидетельствует о достижении однородности смеси.

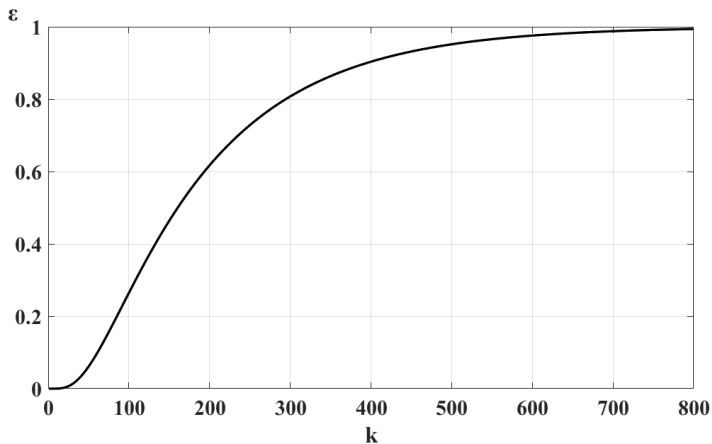


Рис. 3. Кинетика грохочения

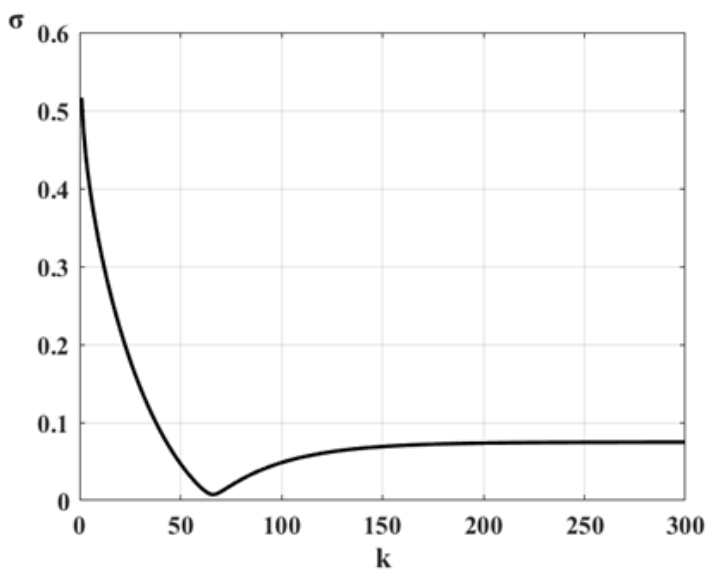


Рис. 4. Кинетика перемешивания

Кривая распределения среднеквадратического отклонения σ от времени является ключевой зависимостью для анализа процесса смешивания. Её вид количественно описывает динамику достижения гомогенности. Кривые $\sigma(t)$, полученные при разных режимах, позволяют объективно сравнивать эффективность различных конструкций смесителей или алгоритмов управления. Кривая $\sigma(t)$ позволяет найти оптимальное время смешивания, соответствующие σ_{min} .

Важно отметить, что точность определения стохастических коэффициентов универсальной модели может быть повышена за счет совместного расчетно-экспериментального исследования процессов грохочения и перемешивания, проводимых с одной и той же смесью при одинаковых параметрах вибровоздействия аппаратов на сыпучую среду на лабораторных установках периодического действия.

Список литературы

1. Мизонов В. Е., Berthiaux Н. Применение теории цепей Маркова в химической инженерии // Международный Косыгинский форум. МНТС Плановский-2021. Пленарная сессия. 2021. С. 65–69. DOI: 10.37816/eeste-2021-p-65-69. URL: <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-p-65-69>.
2. Разработка вероятностно-статистической модели расширения и аксиальной структуры псевдооживленного слоя частиц антрацита / А. В. Митрофанов, В. Е. Мизонов, А. Н. Беляков [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 6. С. 68–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076.
3. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed / A. Mitrofanov, V. Mizonov, A. Camelo [et al.]. Particulate Science and Technology, 2019, vol. 37, issue 8, pp. 1028–1033. DOI: 10.17654/HM01802026.
4. Jayanta Chakraborty, Doraiswami Ramkrishna. Identification of Markov Matrices of Milling Models. Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, pp. 9763–9771.
5. Исследование эффективности процесса грохочения на вибрационном грохоте с составной конструкцией шпальтового сита / С. И. Ханин, М. А. Малахов, О. С. Мордовская [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 9. С. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-140>.
6. Анализ параметров модели смешения полимерных компонентов в пересекающихся потоках / А. Б. Капранова, Д. В. Стенько,

Выводы

Разработана универсальная стохастическая модель, основанная на теории цепей Маркова, которая впервые применяется для описания как процесса виброгрохочения, так и виброперемешивания на единой математической основе. Предложена концепция ячеечного подхода, где различия между процессами объясняются исключительно граничными условиями: открытая система (с сепарацией) для грохота и замкнутая система для смесителя. Проведены численные эксперименты, результаты которых подтвердили адекватность предложенной модели. Полученные зависимости (асимптотический рост извлечения и снижение неоднородности) качественно совпадают с известными закономерностями реальных процессов.

Д. Д. Бахаева [и др.] // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 7. С. 39–46. DOI: 10.1007/s10556-018-0477-0.

7. К расчету процесса вибросепарации на ситовых тканях сыпучих материалов с высоким содержанием частиц мелких фракций / В. А. Огурцов, Ю. В. Хохлова, А. П. Алешина [и др.] // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 4. С. 257–261. DOI 10.47367/0021-3497_2023_4_257.

8. Ячеечная модель смешивания в технологии производства сухих строительных смесей / В. А. Огурцов, Ю. В. Хохлова, Е. Р. Брик [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», 2021. № 1 (17). С. 62–69.

References

1. Mizonov V. E., Berthiaux H. Primenenie teorii cepei Markova v himicheskoi injenerii [Application of Markov chain theory in chemical engineering]. *Mejdunarodnii Kosiginskii forum. MNTS Planovskii_2021. Plenarnaya sessiya*, 2021. Pp. 65–69. DOI: 10.37816/eeste-2021-p-65-69. URL: <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-p-65-69>.
2. Razrabotka veroyatnostno_statisticheskoi modeli rasshireniya i aksialnoi strukturi psevdoojivennogo sloya chastic antracita [Development of a probabilistic and statistical model of the expansion and axial structure of a fluidized bed of anthracite particles] / A. V. Mitrofanov, V. E. Mizonov, A. N. Belyakov [et al.]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2020, issue 6, pp. 68–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076.

3. Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed / A. Mitrofanov, V. Mizonov, A. Camelo [et al.]. *Particulate Science and Technology*, 2019, vol. 37, issue 8, pp. 1028–1033. DOI: 10.17654/HM01802026.

4. Jayanta Chakraborty, Doraiswami Ramkrishna. Identification of Markov Matrices of Milling Models. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, pp. 9763–9771.

5. Issledovanie effektivnosti processa grohocheniya na vibracionnom grohote s sostavnoi konstrukciei shpaltovogo sita [Investigation of the efficiency of the screening process on a vibrating screen with a composite structure of a trellis screen] / S. I. Hanin, M. A. Malahov, O. S. Mordovskaya [et al.]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*, 2024, issue 9, pp. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-140>.

6. Analiz parametrov modeli smesheniya polimernih komponentov v peresekayuschih potokah [Analysis of parameters of the mixing

model of polymer components in intersecting streams] / A. B. Kapranova, D. V. Stenko, D. D. Bahaeva [et al.]. *Matematicheskie metody v tekhnologii i tekhnike*, 2023, issue 7, pp. 39–46. DOI: 10.1007/s10556-018-0477-0.

7. K raschetu processa vibroseparacii na sitovih tkanyah sipuchih materialov s visokim sodержaniem chastic melkih frakcii [To calculate the vibration separation process on sieve fabrics of bulk materials with a high content of fine particles] / V. A. Ogurcov, Yu. V. Hohlova, A. P. Aleshina [et al.]. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstilnoi promishlennosti*, 2023, issue 4, pp. 257–261. DOI: 10.47367/0021_3497_2023_4_257.

8. Yachechnaya model smeshvaniya v tekhnologii proizvodstva suhih stroitelnih smesei [The cellular mixing model in the technology of production of dry building mixes] / V. A. Ogurcov, Yu. V. Hohlova, E. R. Brik [et al.]. *Vestnik Povoljskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Materiali. Konstrukcii. Tehnologii»*, 2021, vol. 1 (17), pp. 62–69.

Огурцов Валерий Альбертович

Ивановский государственный политехнический университет

Российская Федерация, г. Иваново

доктор технических наук, профессор

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Ogurtsov Valery Albertovich

Ivanovo State Polytechnic University

Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, Professor

E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Шенберева Александра Вячеславовна

Ивановский государственный политехнический университет

Российская Федерация, г. Иваново

аспирант

E-mail: sshenbereva@gmail.com

Shenbereva Alexandra Vyacheslavovna

Ivanovo State Polytechnic University

Russian Federation, Ivanovo

Postgraduate Student

E-mail: sshenbereva@gmail.com

Хохлова Юлия Владимировна

Ивановский государственный политехнический университет

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: hohjul@mail.ru

Khokhlova Yulia Vladimirovna

Ivanovo State Polytechnic University

Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: hohjul@mail.ru

Огурцов Всеволод Антонович

Ивановский государственный политехнический университет
Российская Федерация, г. Иваново

магистрант

E-mail: willdday@yandex.ru

Ogurtsov Vsevolod Antonovich

Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

Master's student

E-mail: willdday@yandex.ru

Парамонов Антон Дмитриевич

Ивановский государственный политехнический университет
Российская Федерация, г. Иваново

аспирант

E-mail: 9109800120@mail.ru

Paramonov Anton Dmitrievich

Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

postgraduate student

E-mail: 9109800120@mail.r

Касьяненко Наталья Сергеевна

Ивановский государственный политехнический университет
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: kasianenko@gmail.com

Kasyanenko Natalia Sergeevna

Ivanovo State Polytechnic University
Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: kasianenko@gmail.com