

## Разработка модели аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения

А. В. Митрофанов<sup>\*1</sup>, С. В. Василевич<sup>\*\*</sup>, Н. С. Шпейнова<sup>\*</sup>, З. В. Зарубин<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина,  
Иваново, Россия

<sup>\*\*</sup> Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

---

### Аннотация

Целью работы является разработка одномерной математической модели функционирования аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения. В статье изложены основные положения предлагаемой математической модели аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения и результаты численных экспериментов. Для описания основных процессов при функционировании установки использован математический аппарат цепей Маркова. Аппарат представлен цепью ячеек, а необходимые характеристики процессов организованы в векторы состояния. Изменение объекта фиксируется в дискретные моменты времени и описывается с использованием рекуррентных вычислительных процедур. Известные критериальные зависимости использованы для идентификации параметров модели, но расчет ведется с учетом состояния каждой ячейки цепи. Таким образом, аппарат рассматривается как система с распределенными характеристиками, что повышает достоверность описания процессов переноса.

### Ключевые слова

Псевдооживленный слой, теплообмен, газовзвесь, численное моделирование, рубашка охлаждения.

---

### Введение

Аппараты, использующие технику псевдооживления зернистых сред, широко распространены в различных отраслях материального производства [1–2]. Тем не менее, вопросы прогнозирования параметров работы подобной аппаратуры остаются весьма острыми [1–3], тем более что описанию подлежит не только явление псевдооживления, но (даже в большей степени) целевой процесс, в ходе которого изменяются свойства фаз и характеристики всей системы. Кроме того, расчет процессов

осуществляется в некоторой последовательности, учитывающей иерархию и взаимобусловленность отдельных процессов [3–4].

Приняв во внимание описанные общие соображения, оказывается возможным построить различные модели процессов в псевдооживленном слое, отличающиеся степенью декомпозиции объекта [5–6]. При этом в моделях, где масштаб моделирования предполагает декомпозицию до уровня отдельных частиц, возникают значительные трудности с параметрической

---

<sup>1</sup> Для переписки:

Email: and2mit@mail.ru

идентификацией многих параметров (например, характеристик контактного взаимодействия частиц и др.) и вычислительной громоздкостью расчетных процедур, что ограничивает их применимость в инженерной практике [6–8]. Поэтому инженерные справочники в основном дают указания к описанию аппаратов как объектов с однородным распределением свойств [3–4], что упрощает расчеты, но, естественно, снижает информативность методик.

Указанные трудности побуждают разрабатывать простые и вместе с тем информативные модели, отличающиеся некоторым компромиссным (мезоскопическим) масштабом моделирования [6–7].

Целью настоящей работы является развитие предложенного ранее подхода к описанию химико-технологической аппаратуры с псевдооживленным слоем на основе теории цепей Маркова для описания гидромеханики слоя и межфазного теплообмена газ-частицы [7–9]. Задачей настоящего исследования является распространение указанного подхода на случай псевдооживления частиц, где целевой процесс состоит в обеспечении теплообмена между газозвесью и охлаждаемым корпусом аппарата.

#### Материалы и методы решения задач, принятые допущения

Для построения математической модели в настоящей работе применяется математический аппарат теории счетных цепей Маркова [7–9]. Расчетная схема процесса проиллюстрирована на рисунке 1.

Алгоритм сборки моделей псевдооживления на основе теории цепей Маркова подробно изложен в предыдущих работах [7–10]. Поэтому в настоящей статье акцент будет сделан не на описании гидромеханики слоя (наиболее подробно описан в работах [7,10]), а на формировании представлений о теплообмене между слоем и

поверхностями теплообмена, так как именно решение этих вопросов определяет новизну построений.

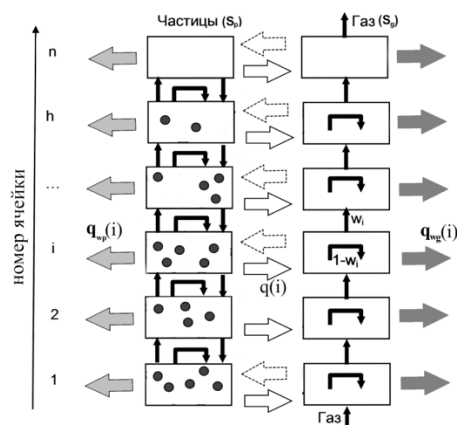


Рисунок 1 – расчетная схема моделирования псевдооживления и теплообмена

При использовании ячеечной методологии теории цепей Маркова пространство аппарата представляется набором из конечного числа  $n$  объемов с идеальным смешением свойств (ячеек цепи Маркова). Поиск решения осуществляется в одномерной постановке задачи, поэтому для конкретного момента времени изменение свойств фиксируется только при переходе от одной ячейки цепи к другой (каждая ячейка характеризуется высотой  $\Delta x$ ). Состояние аппарата описывается наборами параметров, записанных в векторы состояния  $\mathbf{S}$  (содержат массы фаз в ячейках) и  $\mathbf{Q}$  (описывают распределение теплоты фаз по ячейкам). Изменение состояния системы определяется в дискретные моменты времени  $t_k = (k - 1) \Delta t$ , где  $\Delta t$  — интервал времени между наблюдениями;  $k$  — номер временного шага. Таким образом, состояние системы описывается четырьмя векторами состояния:  $\mathbf{S}_g$  и  $\mathbf{S}_p$ ,  $\mathbf{Q}_g$  и  $\mathbf{Q}_p$  (индексы "g" и "p" относят вектор к газовой или твердой фазам соответственно). Переход системы из одного состояния в следующее описывается рекуррентными матричными соотношениями:

$$\mathbf{S}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^k \cdot \mathbf{S}_p^k, \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k \cdot \mathbf{S}_g^k + \mathbf{S}_f, \quad (2)$$

где  $\mathbf{S}_f$  — вектор поступления газа под газораспределительное устройство,  $\mathbf{P}_p^k$  и  $\mathbf{P}_g^k$  — матрицы переходных вероятностей для соответствующих фаз, которые являются основными операторами модели, описывающей движение фаз при формировании слоя. Формирование этих матриц подробно описано в работах [7–10], а процедуры идентификации численных значений входящих в них вероятностей переходов частиц и газа из ячейки в ячейку наиболее подробно описаны в работе [7].

Наиболее существенными для настоящей работы являются следующие общие замечания: за время  $\Delta t$  допускается переход некоторой доли частиц (или газа) в соседнюю ячейку, при этом для газа принят режим идеального вытеснения, а для частиц возможны перемещения и вперед, и назад. Скорость фильтрации газа в ячейках зависит от присутствия частиц, а сами содержания частиц поставлены в соответствие скоростям газа, что делает модель нелинейной. Для идентификации всех параметров модели необходимы зависимости для расчета коэффициента сопротивления частиц и коэффициента макродиффузии, который определяет случайный заброс частиц в соседние ячейки (перемешивание в модели слоя). Для проведения численных экспериментов эти параметры были установлены постоянными (коэффициент сопротивления установлен равным 0.9, а коэффициент макродиффузии равным  $0.005 \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Расчетные процедуры (1)–(2) позволяют описывать формирование аксиального распределения твердой фазы и поля скоростей газа с учетом переменной по высоте порозности слоя [7–10]. Эти знания необходимы для описания теплового состояния фаз в аппарате с учетом межфазного теплообмена и дополнительных

источников и стоков теплоты. Балансовые соотношения можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{Q}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^k \cdot \mathbf{Q}_p^k + \mathbf{q}^k - \mathbf{q}_{wp}^k, \quad (3)$$

$$\mathbf{Q}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k \cdot \mathbf{Q}_g^k + \mathbf{Q}_f - \mathbf{q}^k - \mathbf{q}_{wg}^k, \quad (4)$$

где  $\mathbf{Q}_p^k$  и  $\mathbf{Q}_g^k$  — матрицы содержания теплоты в твердой и газовой фазах соответственно,  $\mathbf{P}_p^k$  и  $\mathbf{P}_g^k$  — матрицы переходных вероятностей для соответствующих фаз, которые описывают перемещение теплоты вместе с частицами и газом,  $\mathbf{q}$  — вектор теплоты, которой обмениваются газ и частицы,  $\mathbf{Q}_f$  — вектор подачи теплоты, содержащейся в поступающем под газораспределительное устройство ожижающем агенте,  $\mathbf{q}_{wg}$  и  $\mathbf{q}_{wp}$  — векторы теплоты, передающейся газу и частицам соответственно от поверхности теплообмена (стенки аппарата).

Соотношения (3)–(4) являются достаточно очевидными балансовыми уравнениями. При этом идентификация некоторых слагаемых не вызывает затруднений (например, при известном расходе воздуха и заданных параметрах его теплофизического состояния оценка величины  $\mathbf{Q}_f$  не представляет трудностей). Идентификация других слагаемых менее однозначна. Так, оценка количества теплоты  $q_i$ , которой обмениваются частицы и газ в  $i$ -й ячейке за время  $\Delta t$ , может быть выполнена как [7]:

$$q_i^k = \alpha_i^k \cdot \mathbf{F}_i^k \cdot \Delta t \cdot (T_{p,i}^k - T_{g,i}^k), \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент межфазного теплообмена (зависит от режима обтекания частиц потоком в ячейке),  $\mathbf{F}$  — поверхность теплообмена, которая зависит от содержания частиц в ячейке,  $T_p$  и  $T_g$  — температуры частиц и газа.

Коэффициент теплоотдачи газ-частицы  $\alpha$ , который определяется дифференцированно для  $i$ -й ячейки (является локальным), рассчитывается по известным

корреляционным зависимостям для определяемых критериев теплообмена [3]:

$$Nu_i^k = 0.016 \cdot \left( \frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k} \right) \cdot Pr^{0.33}, \quad (6)$$

при  $\frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k} < 200;$

$$Nu_i^k = 0.4 \cdot \left( \frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k} \right) \cdot Pr^{0.33}, \quad (7)$$

при  $\frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k} > 200.$

Теплота, которая передается от частиц и газа в аппарате к его стенке, рассчитывается также с использованием некоторого эффективного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_w$ , который отдельно рассчитывается для каждой рассматриваемой ячейки. Определяемый критерий теплообмена может быть рассчитан как [3]:

$$Nu_{w,i}^k = Nu_{g,i}^k \cdot \left[ 1 + 6.7 \cdot \left( \frac{\mu \cdot c_p}{c_g} \right) \cdot (Re_i^k)^{1/3} \right], \quad (8)$$

где  $Nu_g$  — число Нуссельта для процесса теплообмена газ-стенка,  $Re_0$  — число Рейнольдса для процесса движения газа в пустом сечении аппарата,  $\mu$  — динамическая вязкость оживающего агента,  $c_p$  и  $c_g$  — теплоемкости материала зерен сыпучей среды и оживающего агента.

Зависимость (8) позволяет оценить общее количество теплоты, отдаваемое газозвесью стенке, однако, с точки зрения модельных представлений (3)–(4) необходимо каким-то образом разделить эту теплоту между частицами и газом, составляющими среду внутри аппарата. Наиболее простым допущением, на наш взгляд, будет предположить, что теплота  $q_w$  распределяется долями, зависящими от порозности:

$$q_{wp,i}^k = q_{w,i}^k \cdot (1 - \varepsilon_i^k), \quad (9)$$

$$q_{wg,i}^k = q_{w,i}^k \cdot \varepsilon_i^k, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_i$  — порозность в  $i$ -й ячейке, которая легко рассчитывается при известном распределении фаз по цепи,  $q_w$  — общее

количество теплоты, которым обмениваются стенка с поверхностью  $F_w$  и газозвесь с температурой  $T_s$ :

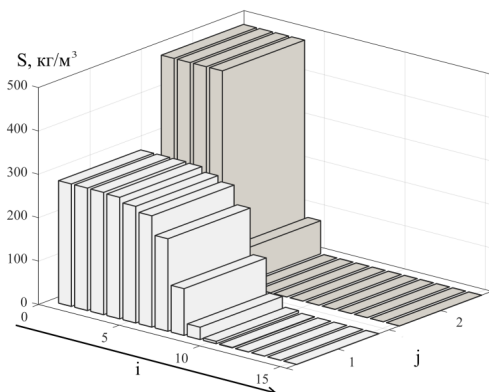
$$q_{w,i}^k = \alpha_{w,i}^k \cdot F_{w,i}^k \cdot \Delta t \cdot (T_w^k - T_{s,i}^k), \quad (11)$$

где  $\alpha_w$  — коэффициент межфазного теплообмена,  $F_w$  — поверхность обмена,  $T_w$  (полагается постоянной) и  $T_s$  — температуры стенки и газозвеси.

Таким образом соотношения (5)–(11) позволяют выполнить замыкание системы общих балансовых уравнений (1)–(4) и провести вычислительные эксперименты с получением достоверных в качественном отношении результатов.

### Результаты

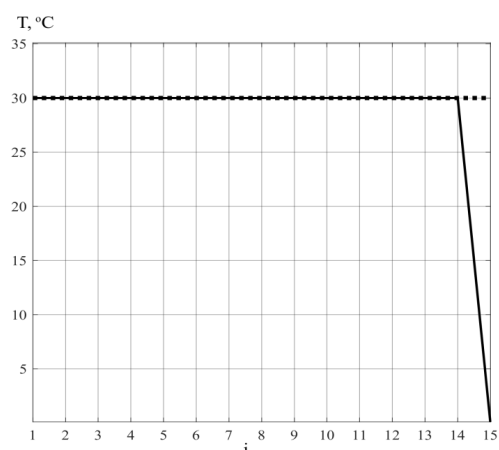
На рисунках 2–5 представлены результаты численных экспериментов с моделью. Поскольку свойства дисперсной фазы полагаются неизменными, то все представленные расчеты выполнены для одной гидромеханической ситуации (фиктивная скорость воздуха составляет 4 м/с при диаметре аппарата 10 см, оживаемый материал — монофракция модельного материала с диаметром зерен 1 мм). Пример распределения содержания частиц по высоте аппарата показан на рисунке 2.



**Рисунок 2** — распределение модельного зернистого материала по высоте аппарата ( $j = 1$  — псевдооживленное состояние,  $j = 2$  — рахлонасыпанное состояние)

На рисунке 3 показано установившееся распределение температур фаз при условии, что температура стенки равна

температуре оживающего агента ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Установившееся распределение температур является очевидным в данном случае и здесь приводится только для демонстрации качественной непротиворечивости модели. В тех ячейках цепи, где содержание материала равно нулю, температуре твердой фазы также присваивается нулевое значение (этим вычислительным эффектом объясняется падение температуры в последней ячейке цепи).

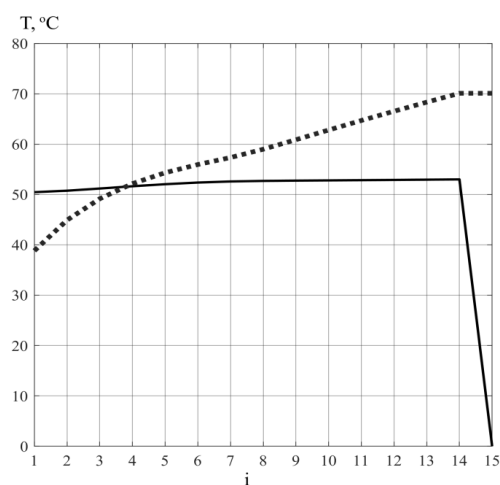


**Рисунок 3** — распределение температур фаз по высоте аппарата при  $T_w = T_{g,1} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (пунктирная линия — температура газа, сплошная линия — температура частиц)

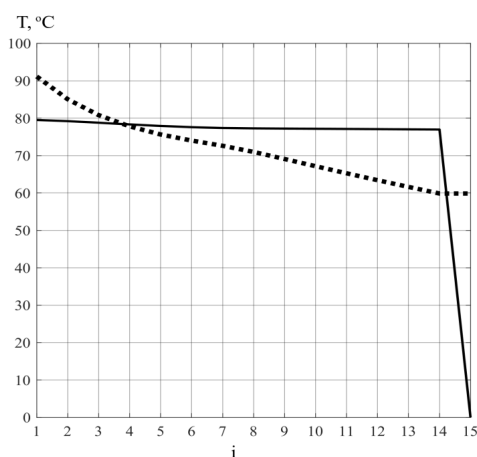
На рисунке 4 показано установившееся распределение температур фаз при условии, что температура стенки выше ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температуры оживающего газа ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Из рисунка следует, что оживающий газ, поступивший с температурой  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , по мере прохождения вдоль аппарата нагревается до  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом температура охлаждаемого сыпучего материала не может опуститься ниже  $53\text{ }^{\circ}\text{C}$  (с учетом перемешивающих возможностей слоя).

Обратная ситуация проиллюстрирована на рисунке 5, который характеризует режим, при котором температура стенки зафиксирована на  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура оживающего агента составляет на входе в аппарат  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура оживающего агента снижается по мере продвижения

вдоль аппарата, при этом материал охлаждается только до  $77\text{...}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 4** — распределение температур фаз по высоте аппарата при  $T_w = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{g,1} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (пунктирная линия — температура газа, сплошная линия — температура частиц)



**Рисунок 5** — распределение температур фаз по высоте аппарата при  $T_w = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{g,1} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (пунктирная линия — температура газа, сплошная линия — температура частиц)

### Обсуждение полученных результатов

Полученные в ходе численных экспериментов с предложенной моделью результаты показывают, во-первых, качественную непротиворечивость модели и ее высокую информативность (она позволяет фиксировать неоднородность пространственных характеристик процессов

теплообмена и псевдооживления даже в сравнительно небольших аппаратах). Прогностические возможности предложенной модели должны подкрепляться надежными процедурами параметрической идентификации, при этом совершенно не очевидно, что имеющиеся эмпирические зависимости будут пригодны для использования, так как получены они в основном путем обработки не локальных, а интегральных параметров процессов.

### Заключение

Предложенная математическая модель функционирования аппарата псевдооживленного слоя с рубашкой охлаждения дает возможность рассчитывать аппарат как объект с распределенными параметрами, что повышает адекватность описания процессов переноса. При должном качестве организации параметрической идентификации и проведении необходимых экспериментальных процедур для исследования локальных параметров теплообмена модель может быть рассмотрена как достоверная научная основа расчета теплообменной аппаратуры с кипящим слоем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Псевдооживление. Под. ред. Дэвидсона И. Ф., Харрисона Д. Пер. с англ. М.: Химия, 1974, 728 с.
- [2]. Smith P. G. Applications of fluidization to food processing. UK: Blackwellscience, 2007, 243 p.
- [3]. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. I. Под. ред. Островского Г. М. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004, 848 с.
- [4]. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации. М.: Наука, 1979, 394 с.
- [5]. Sturm M., Wirtz S., Scherer V., Denecke J. Coupled DEM-CFD simulation of pneumatically conveyed granular media. *Chemical Engineering & Technology*. 2010, vol. 33, no.7, pp. 1184–1192. DOI: 10.1002/ceat.201000162
- [6]. Li J. et. al. From Multiscale Modeling to Meso-Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 484 p.
- [7]. 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, no. 2, pp. 244–253. DOI: 10.1080/02726351.2016.1243180
- [8]. Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 2018, no. 11(1), pp. 20–28. DOI: 10.2174/2405520410666170620105102
- [9]. Mizonov V. E., Mitrofanov A. V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *Advances in engineering research*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2020, pp. 1–74.
- [10]. Митрофанов А. В., Мизонов В. Е., Шпейнова Н. С. и др. Опытное-теоретическое исследование аксиального распределения частиц твердой фазы в кипящем слое. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2021, т. 64, № 4, с. 349–362. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-4-349-362

**Митрофанов Андрей Васильевич** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики, Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина (Российская Федерация, 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34).

**Василевич Сергей Владимирович** — канд. техн. наук, доцент, доцент, Белорусская государственная академия авиации (Республика Беларусь, 220096, Минск, ул. Уборевича, д. 77).

**Шпейнова Наталия Сергеевна** — аспирант кафедры прикладной математики, Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина (Российская Федерация, 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34).

**Зарубин Захар Викторович** — заместитель начальника учебно-методического управления, Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина (Российская Федерация, 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34).

## Development of a model of a fluidized bed apparatus with a cooling jacket

A. V. Mitrofanov<sup>\*1</sup>, S. V. Vasilevich<sup>\*\*</sup>, N. S. Shpeynova<sup>\*</sup>, Z. V. Zarubin<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> *Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia*

<sup>\*\*</sup> *Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Republic of Belarus*

---

### Abstract

The aim of the paper is to develop a one-dimensional mathematical model of the functioning of the fluidized bed apparatus with a cooling jacket. The article presents the main provisions of the proposed mathematical model of a fluidized bed apparatus with a cooling jacket and the results of numerical experiments. To describe the main processes in the operation of the setup, the mathematical apparatus of Markov chains is used. The apparatus is represented by a chain of cells, and the necessary characteristics of the processes are organized into state vectors. The evolution of the object is registered at discrete points in time and described using recurrent computational procedures. Known criterion dependencies are used to identify the model parameters, but the calculation is carried out taking into account the state of each cell of the chain. Thus, the device is considered as a system with distributed characteristics, which increases the reliability of the description of the transfer processes.

### Keywords

Fluidized bed, heat exchange, gas suspension, numerical modeling, cooling jacket.

---

<sup>1</sup> *Corresponding author*  
*Email: and2mit@mail.ru*

## REFERENCES

- [1]. Pseudoozhizheniye [Pseudo-Fluidization]. Ed. Davidson I. F., Harrison D. Moscow: Khimiya Publ., 1974, 728 p. (In Russ.)
- [2]. Smith P. G. Applications of fluidization to food processing. UK: Blackwell-science, 2007, 243 p.
- [3]. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy [Handbook of Chemist and Technologist. Processes and apparatus of chemical technology]. Part I. Ostrovsky G. M. (ed.). St. Petersburg: ANO NPO "Professional" Publ., 2004, 848 p. (In Russ.)
- [4]. Kafarov V. V., Dorokhov I. N. Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Topologicheskii printsip formalizatsii [System analysis of chemical technology processes. Topological principle of formalization]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 394 p. (In Russ.)
- [5]. Sturm M., Wirtz S., Scherer V., Denecke J. Coupled DEM-CFD simulation of pneumatically conveyed granular media. *Chemical Engineering & Technology*. 2010, vol. 33, no. 7, pp. 1184–1192. DOI: 10.1002/ceat.201000162
- [6]. Li J. et. al. From Multiscale Modeling to Meso-Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 484 p.
- [7]. 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, no. 2, pp. 244–253. DOI: 10.1080/02726351.2016.1243180
- [8]. Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 2018, no. 11(1), pp. 20–28. DOI: 10.2174/2405520410666170620105102
- [9]. Mizonov V. E., Mitrofanov A. V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *Advances in engineering research*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2020, pp. 1–74.
- [10]. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Shpeynova N. S., Vasilevich S. V., Kasatkina N. K. Opytno-teoreticheskoye issledovaniye ak-sial'nogo raspredeleniya chastits tverdoy fazy v kipyashchem sloye. [Experimental and Theoretical Study of the Axial Distribution of Solid Phase Particles in a Fluidized Bed]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG*. [*Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc*], 2021, 64 (4), pp. 349–362. (In Russ.) DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-4-349-362



**Mitrofanov A. V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Applied Mathematics, Ivanovo State Power Engineering University (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

**Vasilevich S. V.** — Cand. Sc (Eng), Assoc. Professor, Belarusian State Academy of Aviation (Ubovichya st., 77, Minsk, 220096, Republic of Belarus).

**Shpeynova N. S.** — Postgraduate student, Department of Applied Mathematics, Ivanovo State Power Engineering University (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

**Zarubin Z. V.** — Deputy Head of the Educational and Methodological Department, Ivanovo State Power Engineering University (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Разработка модели аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения / А. В. Митрофанов, С. В. Василевич, Н. С. Шпейнова, З. В. Зарубин // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8). С. 15 – 23.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-15-23

**Please cite this article as:**

Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Shpeynova N. S., Zarubin Z. V. Development of a model of a fluidized bed apparatus with a cooling jacket. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 15 – 23.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-15-23