

УДК 66.096.5

Расчетно-экспериментальное исследование тепловой обработки дисперсного топлива в аппарате с кипящим слоем*

А.В. Митрофанов¹, Н.С. Шпейнова², А.Ф. Камело¹, А.В. Плаксин¹, С.А. Херувимов¹
¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: and2mit@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Процесс сушки является неотъемлемой стадией термохимической переработки твердых видов топлива. Реализация подобных процессов часто проводится в реакторах с кипящим слоем. Наиболее часто употребляемые модели кипящего слоя, по всей видимости, не удовлетворяют всем требованиям современной промышленности. С одной стороны, эти модели включают в себя детальное математическое описание псевдооживления, что приводит к громоздким вычислительным процедурам. С другой стороны, сложность вычислительных процедур обычно не обеспечивает точности получаемых прогнозов. По этой причине развитие простой, но информативной модели описания технологических процессов в кипящем слое остается актуальной задачей.

Материалы и методы: Для моделирования процесса сушки в кипящем слое используется теория цепей Маркова. Предложенная модель дополнена полуэмпирическими субмоделями: межфазного теплообмена, межфазного массообмена, усадки частиц и изменения коэффициента сопротивления частиц в зависимости от чисел Re и Ar. Все субмодели проверены в ходе проведения специальных экспериментальных исследований.

Результаты: На основе теории цепей Маркова предложена ячеечная модель сушки в кипящем слое. Переходные матрицы поставлены в соответствие с физическими параметрами протекания процессов, что делает предлагаемую модель нелинейной. Модель, основанная на теории цепей Маркова, дополнена независимыми полуэмпирическими субмоделями процессов в кипящем слое и успешно использована для описания сушки. Учет влияния указанных субпроцессов позволяет описывать эволюцию расширения кипящего слоя в процессе сушки. Установлено хорошее соответствие полученных экспериментальных и расчетных результатов.

Выводы: Предложенная математическая модель может быть рассмотрена как достоверная научная основа для операционного контроля и проектирования установок кипящего слоя.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, вектор состояния, матрица переходных вероятностей, скорость витания частицы, теплоотдача, массоотдача, содержание влаги, твердое топливо.

Experimental and computational study of thermal treatment of particulate fuel in a fluidized bed reactor

A.V. Mitrofanov¹, N.S. Shpeynova², A.F. Kamelo¹, A.V. Plaksin¹, S.A. Kheruvimov¹
¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: and2mit@mail.ru

Abstract

Background: Drying is an integral part of thermochemical treatment of solid fuels. Fluidized bed reactors are widely used to carry out such operations. The most commonly used models of fluidization do not seem to meet all requirements of modern industry. On the one hand, these models include a detailed mathematical description of fluidization, which leads to long computation. On the other hand, the long calculation process does not usually produce correct predictions. For this reason, the development of a simple but informative model to describe the technological processes in the fluidized bed remains an urgent problem.

Materials and methods: The Markov chain approach is used to model the drying process in fluidized bed. The proposed model is complemented by the following semi-empirical sub-models: gas-solid heat transfer, gas-solid mass transfer, particles shrinkage and estimation of drag force coefficient correlation with Re and Ar numbers. All the sub-models are verified by ad hoc experiments.

Results: A cell model of fluidized bed dryer has been suggested based on the Markov chains. The transition matrices are associated with current physical properties of the substances involved, which makes the proposed model nonlinear. The Markov chains model has been modified by adding independent semi-empirical sub-models of processes in fluidized bed and has been successfully used to simulate the drying process. Taking into account the sub-processes allows predicting the evolution of the fluidized bed expansion during drying. A comparison of the obtained experimental results with the model predictions shows a good agreement between them.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-08-01684.

Conclusions: The obtained mathematical model can be considered the scientific basis for operating control and design of fluidized bed reactors.

Key words: fluidized bed, state vector, matrix of transition probabilities, particle settling velocity, heat transfer, mass transfer, moisture content, solid fuel.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.058-062

В топливной энергетике широко распространены процессы термической обработки дисперсного топлива, при которых осуществляется межфазное взаимодействие движущегося газового потока со слоем дисперсного материала, находящимся во взвешенном (кипящем) состоянии [1–3].

В области химической инженерии кипящий слой длительное время используется для проведения разнообразных процессов, что не только привело к появлению математических моделей этих процессов, базирующихся на широком спектре подходов к моделированию, но и позволило накопить достаточный набор эмпирических или полуэмпирических зависимостей для установления параметров идентификации этих моделей [4, 5].

В энергетике опыт промышленного использования кипящего слоя крайне мал [1–3], что, с одной стороны, исключает использование для расчетов наработанного за предыдущие годы эмпирического материала, а с другой стороны, затрудняет выбор стратегии моделирования.

Предлагаемые модели далеко не всегда отвечают необходимым требованиям по точности прогнозирования протекания процесса, а также требуют значительного машинного времени для описания даже одного режимно-конструктивного варианта [4–6].

Таким образом, остается актуальной разработка моделей, сочетающих быстроту вычислительных операций с достаточной для инженерных расчетов точностью. Решить эту задачу поможет развитие предложенной ранее [7, 8] модели, основанной на теории цепей Маркова, хорошо зарекомендовавших себя при моделировании смежных процессов [6, 9, 10].

В основу модели положена ячеечная схема: аппарат представлен как совокупность из n ячеек, а эволюция векторов состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода; k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени).

Продольные миграции частиц и продвижение воздуха вдоль цепей описывается рекуррентными матричными равенствами:

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

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

где \mathbf{S}_p и \mathbf{S}_g – векторы-столбцы объемного содержания частиц и газа в ячейках; \mathbf{P}_p^k и \mathbf{P}_g^k – матрицы переходных вероятностей для частиц

и газа, зависящие от векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе; \mathbf{S}_{gf} – вектор подачи газа (при подаче через решетку он имеет единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему газа, подаваемому в нее за один переход).

Особенностью предлагаемой модели является то, что, в отличие от подобных линейных моделей [9, 10], локальные скорости обтекания частиц газом в ячейках и пропорциональные этим скоростям коэффициенты межфазного взаимодействия (коэффициенты сопротивления частиц, теплообмена, массообмена) рассчитываются с учетом локальной порозности и ее влияния на уменьшение живого сечения потока.

Зависимость для расчета коэффициента сопротивления частиц C_d , полученная на основе выполненного нами обобщения экспериментальных данных, и методика ее использования для расчета скорости витания частицы для k -го шага описана в [7, 8].

В i -й ячейке скорость витания одиночной частицы V_{si} связана с ее весом через соотношение

$$P = C_d f_p \rho_g \frac{V_{si}^2}{2}, \quad (3)$$

где C_d – коэффициент сопротивления одиночной частицы; f_p – площадь поверхности одиночной частицы; ρ_g – плотность газа.

Переходные вероятности p_{si} , p_{ui} и p_{di} , составляющие переходную матрицу \mathbf{P}_p , связаны с параметрами процесса и крупностью фракции следующими зависимостями [7, 8]:

$$p_{si} = 1 - p_{ui} - p_{di} \quad (4)$$

$$p_{di} = 0 \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0; \quad (5)$$

$$p_{di} = v_i \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0; \quad (6)$$

$$p_{ui} = v_i \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0; \quad (7)$$

$$p_{ui} = 0 \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0, \quad (8)$$

где w_i – локальная скорость обтекания частиц оживающим газом в i -й ячейке.

Расчетная схема процесса псевдооживления показана на рис. 1.

На уровне верхней ячейки, где v_h становится равной нулю, расширение слоя прекращается и вся дальнейшая эволюция его состояния происходит внутри него. В [7, 8] показано, что модель позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью прогнозировать переход слоя во взвешенное состояние и его расширение в режиме псевдооживления.

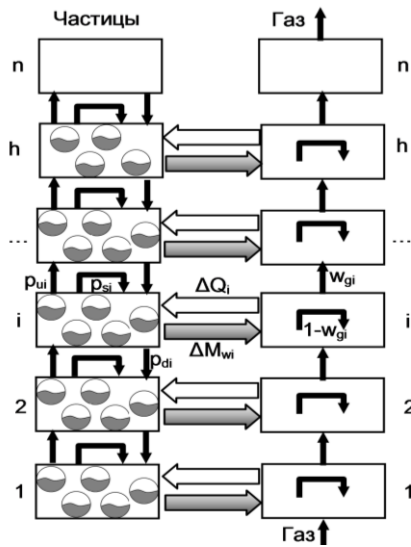


Рис. 1. Расчетная схема процесса псевдооживления

Для расчета коэффициента межфазного теплообмена α в кипящем слое использована эмпирическая зависимость, полученная в [11]:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,991}, \quad (9)$$

где Nu – критерий Нуссельта ($Nu = \alpha d / \lambda$; d – средний диаметр оживаемой фракции; λ – коэффициент теплопроводности материала частиц); Re – критерий Рейнольдса ($Re = wd/v$; w – локальная скорость обтекания частиц оживающим газом, разная в разных ячейках слоя; v – коэффициент кинематической вязкости газа).

При описании межфазного массообмена используется допущение о равенстве критериев Нуссельта и Шервуда ($Sh = \beta d / D_p$, где β – коэффициент массоотдачи; D – коэффициент диффузии; ρ – плотность оживающей среды) [4, 5].

Указанное допущение позволяет при помощи зависимости (9) количественно оценить интенсивность тепломассообмена между частицами и воздухом, а матричные равенства (1), (2) описывают перенос вдоль цепей любого аддитивного свойства, связанного с частицами и газом, в частности, содержащейся в частицах теплоты и влаги.

Таким образом, кинетика распределенного тепло- и массообмена в слое может быть описана рекуррентными матричными равенствами:

$$M_{wp}^{k+1} = P_p^k (M_{wp}^k - \beta \cdot F^k \cdot (p_{ws}^k - p_{wg}^k) \Delta t); \quad (10)$$

$$M_{wg}^{k+1} = P_g^k (M_{wg}^k + \beta \cdot F^k \cdot (p_{ws}^k - p_{wg}^k) \Delta t + M_{wgf}); \quad (11)$$

$$Q_p^{k+1} = P_p^k (Q_p^k + \alpha \cdot F^k \cdot (T_g^k - T_p^k) \Delta t - r k_w \cdot F^k \cdot (M_{ws}^k - M_{wg}^k) \Delta t); \quad (12)$$

$$Q_g^{k+1} = P_g^k (Q_g^k - \alpha \cdot F^k \cdot (T_g^k - T_p^k) \Delta t + Q_{gf}), \quad (13)$$

где Q – вектор количеств теплоты в ячейках; T – вектор температур; M_w – вектор масс влаги; p_{ws} и p_{wg} – векторы парциальных давлений влаги

на поверхности частиц и в газе; β и α – векторы коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи; F^k – вектор поверхностей обмена в ячейках, зависящий от концентрации частиц в них; оператор \cdot означает поэлементное умножение векторов.

Векторы Q и T связаны соотношением $Q = T \cdot c \cdot \rho$, где c – вектор теплоемкостей влажных частиц и ρ – вектор их плотностей.

Плотность частиц, меняющаяся в процессе массообмена, рассчитывается по соотношению

$$\rho^k = (M_w^k + p_p S_p^k) / S_p^k, \quad (14)$$

где p_p – плотность сухих частиц.

Распределение влагосодержания по ячейкам цепей рассчитывается по формулам:

$$m_{wp}^k = M_{wp}^k / (\rho_p S_p^k); \quad (15)$$

$$m_{wg}^k = M_{wg}^k / (\rho_g S_g^k), \quad (16)$$

где ρ_g – плотность газа, которая определяется по уравнению состояния.

Массогабаритные свойства частиц по мере удаления влаги непрерывно изменяются, поэтому процесс псевдооживления не является установившимся вплоть до достижения всеми частицами некоторой равновесной влажности.

Были проведены расчетно-экспериментальные исследования изменения средней порозности слоя по мере высыхания псевдооживляемых частиц.

На рис. 2 приведена схема установки для тепловой обработки дисперсных материалов в кипящем слое.

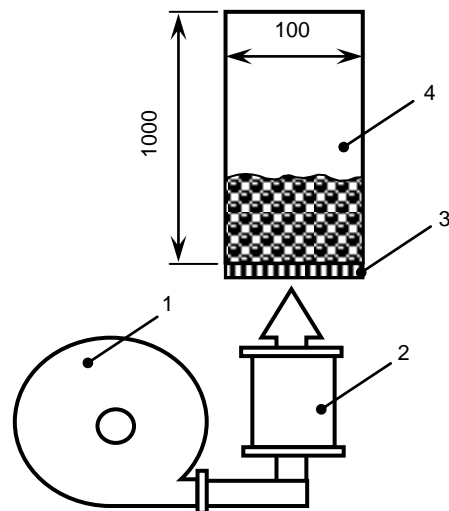


Рис. 2. Схема и основные размеры экспериментальной установки: 1 – воздуходувка; 2 – электрокалорифер; 3 – газораспределительное устройство; 4 – цилиндрический реактор с кипящим слоем

Оживлению подвергались кубики картофеля со стороной 5 мм. Картофель был выбран в качестве модельного материала, так как, с одной стороны, имеет большую разницу между на-

чальным и равновесным значениями влагосодержания, а потому гидромеханические свойства кипящего слоя в значительной мере изменяются в процессе сушки частиц, а с другой стороны, картофель является распространенным сырьем для переработки в жидкое биотопливо [12].

В процессе псевдооживления через определенные промежутки времени делались серии (30 фотографий) цифровых фотоснимков слоя (с частотой 1 кадр в секунду), каждая серия снимков подвергалась обработке при помощи специально разработанной ранее программы [7, 8] для анализа цифровых изображений в целях определения высоты свободной поверхности кипящего слоя.

На рис. 3 показаны результаты сравнения расчетных значений (линия) расширения кипящего слоя с экспериментальными данными (точки), согласно которым, высота слоя изменяется постепенно вплоть до достижения материалом равновесной с оживающим агентом влажности, при этом изменение расширения имеет очевидно нелинейный характер.

После каждой серии снимков из слоя извлекались 20 частиц, взвешивались для последующего расчета среднего влагосодержания материала, а после взвешивания возвращались в реактор.

Кроме того, при каждой выгрузке измерялись линейные размеры 10 частиц для отслеживания интенсивности их объемной усадки.

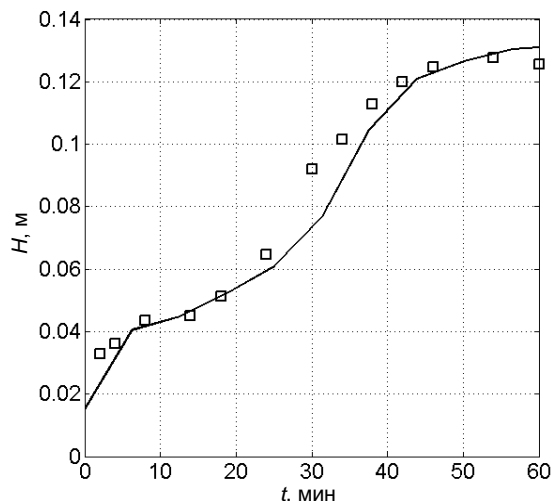


Рис. 3. Изменение высоты кипящего слоя в процессе сушки (расходная скорость воздуха $W_0 = 3,75$ м/с)

Рис. 4 иллюстрирует кинетику изменения среднего влагосодержания частиц в процессе тепловой обработки.

Закономерности усадки пищевых продуктов достаточно хорошо изучены [5, 13, 14], в то же время при расчете протекания тепломассообменных процессов размер частиц обычно считается постоянным, что позволяет формировать только линейные модели, в которых

матрица переходных вероятностей не зависит от текущего состояния процесса [6, 9, 10].

Объемная усадка картофеля имеет линейную зависимость от влагосодержания и определяется по следующей формуле [13]:

$$V = V_c(1 + \beta_v \cdot X), \quad (17)$$

где V – объем частицы в любой момент сушки, см^3 ; V_c – объем частицы абсолютно сухого материала, см^3 ; β_v – коэффициент объемной усадки (для картофеля – 0,625) [13].

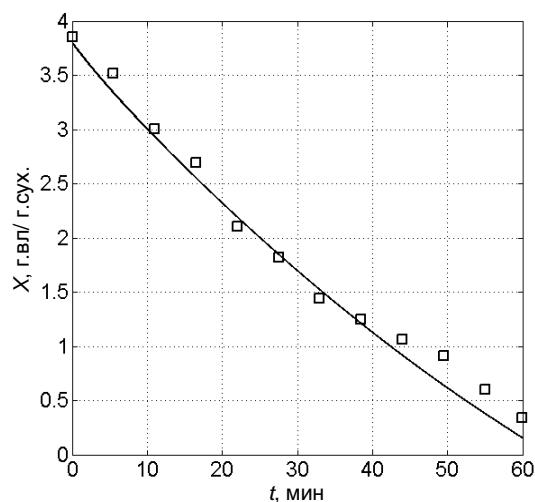


Рис. 4. Изменение среднего влагосодержания частиц слоя: линия – расчетные значения; точки – экспериментальные значения

Расчетное и экспериментальное изменение линейных размеров частиц показано на рис. 5.

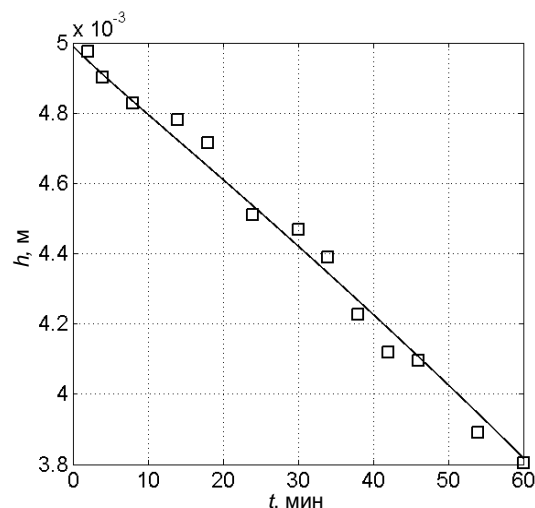


Рис. 5. Изменение среднего линейного размера частиц слоя: линия – расчетные значения; точки – экспериментальные значения

Таким образом, предлагаемая модель, в отличие от известных ячеечных моделей кипящего слоя [6, 9, 10], является нелинейной. Матрица переходных вероятностей формируется с учетом текущего состояния описываемой сис-

темы, при этом учитывается несколько обуславливающих друг друга процессов.

Гидромеханические параметры системы определяются текущей порозностью, расходной скоростью оживающего агента, а также значением коэффициента сопротивления C_d для частицы, находящейся в данной ячейке [7, 8]. Коэффициент сопротивления рассматривается как функция числа Рейнольдса Re и числа Архимеда Ar ($C_d = f(Re, Ar)$). Значения числа Рейнольдса Re определяют интенсивность межфазного тепло- и массообмена через зависимость (9), в то же время сами значения Ar и Re корректируются на каждом шаге с учетом изменения плотности частиц (14) и их размера (17). Указанная взаимообусловленность параметров модели делает ее нелинейной и позволяет на основе единой методологии и известных моделей сопутствующих процессов в слое [7, 8, 11, 13] построить обобщенную модель кипящего слоя, обладающую достаточной для инженерных расчетов прогностической эффективностью.

Таким образом, предлагаемая ячеечная математическая модель и эмпирические зависимости для описания интенсивности межфазного взаимодействия в кипящем слое, с одной стороны, являются независимыми, а с другой – обеспечивают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. На этом основании предложенная модель и ее программно-алгоритмическое обеспечение может рассматриваться как достоверная научная основа инженерного компьютерного метода расчета тепловой обработки дисперсного топлива в кипящем слое при изменении массогабаритных характеристик обрабатываемых частиц.

Список литературы

1. **Бокун И.А., Чернышев В.И.** Газификация низкосортных топлив в пульсирующем слое // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2011. – № 4. – С. 40–45.
2. **Саломатов В.В., Рычков А.Д., Саломатов В.В.** Экспериментальное исследование и математическое моделирование аэродинамики, тепломассообмена, излучения и горения дробленого топлива в циркулирующем кипящем слое // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 60–71.
3. **Исследование** процессов нагрева и сушки слоя органосодержащих отходов в термическом реакторе / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 17–21.
4. **Расчеты** аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
5. **Handbook** of Industrial Drying / edited by A.S. Mujumdar. – 3rd edition. – CRC Precc.: Taylor & Francis Group, 2006. – 1312 p.
6. **Berthiaux H., Mizonov V.** Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2004. – Vol. 85, No. 6. – P. 1143–1168.
7. **Modeling** of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Ogurtzov, K. Tannous // Particulate Science and Technology: An International Journal. – 2014. – Vol. 32(2). – P. 171–178.

8. **Митрофанов А.В., Tannous K., Мизонов В.Е.** Экспериментальное исследование гидродинамики частиц биотоплива в топке с кипящим слоем // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 3. – С. 65–67.
9. **Dehling H.G., Hoffman A.C., Stuu H.W.** Stochastic Models for Transport in a Fluidised Bed // SIAM Journal of Applied Mathematics. – 1999. – 60, 1. – P. 337–358.
10. **Dehling H.G.** A stochastic model for mixing and segregation in slugging fluidized beds // Powder Technology. – 2007. – 171. – P. 118–125.
11. **Овчинников Л.Н.** Моделирование процесса сушки минеральных удобрений во взвешенном слое // Изв. вузов. Химия и химич. технология. – 2009. – Т. 52, вып. 7. – С. 122–124.
12. **Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Киселева С.В.** Биомасса как источник энергии // Вестник РАЕН. – 2010. – № 1. – С. 54–60.
13. **Киселева Т.Ф.** Технология сушки: учебно-методический комплекс / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2007. – 117 с.
14. **Кац З.А.** Производство сушеных овощей, картофеля и фруктов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 216 с.

References

1. Bokun, I.A., Chernyshevich, V.I. Gazifikatsiya nizkosortnykh topliv v pul'siruyushchem sloe [Gasification of low-grade fuels in the pulsed bed]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG. Energetika*, 2011, no. 4, pp. 40–45.
2. Salomatov, V.V., Rychkov, A.D., Salomatov, V.V. Eksperimental'noe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie aerodinamiki, teplomassoobmena, izlucheniya i gorenija droblenogo topliva v tsirkuliruyushchem kipiyashchem sloe [An experimental study and mathematical modeling of aerodynamics, heat and mass transfer, radiation and burning of granulated fuel in a circulating fluidized bed]. *Polzunovskiy vestnik*, 2010, no. 1, pp. 60–71.
3. Kolibaba, O.B., Gorinov, O.I., Gabitov, R.N., Samyshina, O.V. Issledovanie protsessov nagreva i sushki sloya organosoderzhashchikh otkhodov v termicheskom reaktore [A study of heating and drying processes of organic waste bed in a thermal reactor]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 6, pp. 17–21.
4. Mukhlenova, I.P., Sazhina, B.S., Frolova, V.F. *Raschety apparatov kipiyashchego sloya: spravochnik* [Calculus of fluidized bed apparatuses: a reference book]. Leningrad, Khimiya, 1986. 352 p.
5. Handbook of Industrial Drying. CRC Precc.: Taylor & Francis Group, 2006. 1312 p.
6. Berthiaux, H., Mizonov, V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2004, vol. 85, no. 6, pp. 1143–1168.
7. Mizonov, V., Mitrofanov, A., Ogurtzov, A., Tannous, K. Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains. *Particulate Science and Technology: An International Journal*, 2014, vol. 32(2), pp. 171–178.
8. Mitrofanov, A.V., Tannous, K., Mizonov, V.E. Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamiki chastits biotopliva v topke s kipiyashchim sloem [Experimental study of hydrodynamic particles of biofuel in a fluidized bed furnace]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 3, pp. 65–67.
9. Dehling, H.G., Hoffman, A.C., Stuu, H.W. Stochastic Models for Transport in a Fluidised Bed. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 1999, 60, 1, pp. 337–358.
10. Dehling, H.G. A stochastic model for mixing and segregation in slugging fluidized beds. *Powder Technology*, 2007, 171, pp. 118–125.
11. Ovchinnikov, L.N. Modelirovanie protsessa sushki mineral'nykh udobreniy vo vzveshennom sloe [Modeling of drying of mineral fertilizers in suspension bed]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, issue 7, pp. 122–124.
12. Chernova, N.I., Korobkova, T.P., Kiseleva, S.V. Biomassa kak istochnik energii [Biomass as a source of energy]. *Vestnik RAEN*, 2010, no. 1, pp. 54–60.

13. Kiseleva, T.F. *Tekhnologiya sushki: uchebno-metodicheskiy kompleks* [Drying technology: a study guide complex]. Kemerovo, 2007. 117 p.

14. Kats, Z.A. *Proizvodstvo sushenykh ovoshchey, kartofelya i fruktov* [Production of dried vegetables, potatoes and fruit]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1984. 216 p.

Митрофанов Андрей Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,
e-mail: and2mit@mail.ru

Шпейнова Наталья Сергеевна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
ассистент кафедры архитектурного дизайна,
e-mail: shpejnova@mail.ru

Arnold Figerar Camelo Amaa,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры прикладной математики,
e-mail: arnoldfigerar@mail.ru

Плаксин Алексей Владимирович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент кафедры прикладной математики,
e-mail: alesha.plaksin@yandex.ru

Херувимов Сергей Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент кафедры прикладной математики,
e-mail: Qqkwa37@mail.ru