

## МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 66.096.5

### ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ ЧАСТИЦ В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ<sup>1</sup>

В.Е. МИЗОНОВ<sup>1</sup>, А.В. МИТРОФАНОВ<sup>1</sup>, Е.В. БАСОВА<sup>1</sup>, К. TANNOUS<sup>2</sup>, О.В. СИЗОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

<sup>2</sup> University of Campinas, Campinas, Brazil

<sup>3</sup> ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: mizonov46@mail.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Аппараты с кипящим слоем достаточно широко используются в твердотопливной энергетике, химической промышленности и других отраслях. В частности, в энергетике топки кипящего слоя играют возрастающую роль для термохимической переработки и сжигания твердых видов топлива, включая биотопливо. Одним из возможных путей интенсификации процессов взаимодействия твердых частиц с газом является использование пульсирующих потоков газа. Однако эффективность применения пульсирующих потоков не всегда очевидна. В связи с этим нужны новые подходы для предварительной оценки их преимуществ.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи использован метод математического моделирования. Модель процесса построена на основе системы дифференциальных уравнений движения одиночной частицы в восходящем потоке газа с переменной по времени скоростью, меняющейся по синусоидальному закону, и с переменными во времени свойствами частицы, меняющимися благодаря тому или иному теплофизическому или химическому процессу взаимодействия частицы с газом. Изучение влияния параметров на эффективность процесса выполнено численными методами.

**Результаты.** Разработана модель влияния колебаний газового потока на эффективность переработки частиц в циркуляционном кипящем слое. Проведено сравнение необходимого времени для достаточной переработки частиц при различных амплитудах и частотах пульсаций скорости газа. Установлено, что наиболее значительный выигрыш во времени достигается при сильной зависимости постоянной скорости реакции от скорости обтекания частицы. В этом случае по частоте колебаний имеется экстремум, дающий максимальный выигрыш во времени, а по амплитуде – или монотонное возрастание выигрыша, или его оптимальное значение.

**Выводы.** Переход к пульсирующему потоку газа в реакторе с циркуляционным кипящим слоем дает заметный выигрыш во времени переработки частиц только при сильной зависимости постоянной скорости реакции от относительной скорости обтекания частиц газом. В этом случае имеется оптимальная частота и амплитуда колебаний, дающая максимальный выигрыш по времени.

**Ключевые слова:** циркуляционный кипящий слой, кинетика реакции, пульсирующий поток газа, параметры колебаний потока газов, оптимизация процесса

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-08-00028).

## INFLUENCE OF GAS FLOW OSCILLATION ON THE EFFICIENCY OF PARTICULATE SOLIDS TREATMENT IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

V.E. MIZONOV<sup>1</sup>, A.V. MITROFANOV<sup>1</sup>, K. TANNOUS<sup>2</sup>, O.V. SIZOVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup> University of Campinas, Campinas, Brazil

<sup>3</sup> Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: mizonov46@mail.ru

### Abstract

**Background.** Apparatuses with fluidized bed are widely used in the solid fuel energetic, chemical and other industries. In particular, fluidized bed furnaces play the increasing role for thermo-chemical treatment and burning the solid fuels including bio-fuels. The use of pulsating gas flows is one of the possible ways to intensify the process of gas-particle interaction. However, the efficiency of the way is not always obvious, and new approaches are needed for preliminary estimation of its advantages.

**Materials and methods.** The method of mathematical modeling is used to solve the above problem. The model is based on the set of differential equations of a single particle motion in the upstream gas flow with variable with time velocity, and with variable with time particle properties due to this or that thermo-physical or chemical process of gas-particle interaction. The study of influence of the process parameters on its efficiency is done by numerical methods.

**Results.** The model of the effect of oscillations in the gas flow on the efficiency of particle processing in a circulating fluidized bed has been developed. The necessary time for enough particle treatment is compared for different amplitude and frequency of gas flow oscillation. The most considerable gain in time is being reached for the strong dependence of the reaction rate constant on the velocity of flow around the particle. In this case the optimum frequency of oscillations exists that give the maximum gain in time. The growth of the amplitude leads to the monotonic increase of the gain in time, or gives the optimum amplitude.

**Conclusions.** Transition to the pulsating gas flow in a circulating fluidized bed reactor leads to considerable gain in time of particle treatment only in the case of strong dependence of the reaction rate constant on the velocity of flow around the particle. In this case the optimum frequency and amplitude of oscillation exist that gives the maximum gain in time.

**Key words:** circulating fluidized bed, reaction kinetics, pulsating gas flow, parameters of oscillations in the gas flow, process optimization

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.6.060-066

**Состояние вопроса.** Реакторы с кипящим слоем широко используются в химической, энергетической и других отраслях промышленности. В частности, одним из перспективных направлений теплоэнергетики является использование угольных топок кипящего слоя. Развитие компьютерных технологий дало существенный импульс моделированию этих процессов для инженерной практики. Сравнительный анализ подходов к моделированию приведен в работе [1], где отдано предпочтение подходу, базирующемуся на теории цепей Маркова. Матрица переходных вероятностей, являющаяся основным оператором этой теории, сравнена с математическим образом реального процесса. Этот подход был успешно использован для описания процесса псевдооживления [2, 3]. Широкий спектр его использования в технологии дисперсных материалов представлен в работе [4]. Однако все эти работы имеют дело с проточными реакторами, в то время

как реакторы с циркуляционным кипящим слоем играют все возрастающую роль в промышленном применении. Реактор с циркуляционным кипящим слоем состоит из следующих основных частей: собственно реактора, сепаратора, который отделяет выходящие из реактора частицы от охлаждающего газа и направляет их в канал циркуляции, и клапана, который регулирует поток возврата частиц в нижнюю часть реактора. Частицы могут циркулировать в аппарате и оставаться в нем столько времени, сколько необходимо для их конверсии, независимо от скорости охлаждающего газа.

В [5, 6] описано моделирование процесса сжигания частиц топлива в промышленном энергетическом котле с топкой циркуляционного кипящего слоя на основе сравнительно нового гибридного подхода Эйлера-Лагранжа. Несмотря на то, что результаты моделирования оказались в хорошем соответствии с промышленными экспе-

риментами, сама циркуляция и ее влияние на гидродинамическую обстановку в реакторе не входили в задачи этого исследования. То же можно сказать и о результатах работы [7], в которой найдены всесторонние корреляции для лучшего прогнозирования распределения концентрации частиц в зоне полностью развитого слоя в реакторе. Несмотря на то, что эти корреляции хорошо работают в широком диапазоне параметров реактора, взаимное влияние циркуляции и процесса в реакторе не было исследовано.

Обширное экспериментальное исследование процесса сушки частиц в реакторе с циркулирующим кипящим слоем выполнено в [8]. Исследовано влияние начального содержания влаги, температуры и расхода оживающего газа и кратности циркуляции на процесс сушки. Тем не менее это была чисто экспериментальная работа, относящаяся к конкретной промышленной установке. Интересные экспериментальные результаты описаны в [9], где с помощью доплеровского анализатора частиц исследовано распределение концентрации частиц в реакторе при наличии циркуляции. Эти данные позволяют лучше понять механизм псевдооживления, но, к сожалению, в качестве предмета исследования рассматривался процесс только в самом реакторе.

Анализ указанных выше и многих других работ позволяет сделать вывод, что исследованию циркуляционного кипящего слоя посвящено много экспериментальных (реже – теоретических) работ. Однако подавляющее их число относится к исследованию отдельных частей установки с циркуляционным кипящим слоем и практически никогда к целой установке с обратной связью потоков частиц. Таким образом, взаимное влияние процессов в реакторе, сепараторе и контуре циркуляции остается не исследованным. С другой стороны, известно, что циркуляция частиц в мельничной установке замкнутого цикла в зависимости от характеристик мельничного сепаратора может терять устойчивость и приводить к завалу мельницы [10]. В частности, в [11] показано, что оптимальное позиционирование подвода возврата в мельницу может значительно увеличить тонкость готового продукта при прочих равных условиях.

Становится очевидным, что изучение циркуляционного кипящего слоя в терминах формирования массопотоков частиц является актуальной научной и технологической

задачей. Несколько подходов к построению таких моделей, базирующихся на теории цепей Маркова, описаны в [12, 13], где получены интересные, нетривиальные результаты. Тем не менее эти модели остаются сложными и требующими значительного машинного времени, чтобы быть использованными для предварительных оценок. Это может быть сделано на основе модели движения и преобразования свойств одиночной частицы в восходящем потоке газа. Будучи достаточно приближенной, такая модель позволяет учитывать эффекты первого порядка важности. Подобные модели успешно использовались при описании различных процессов с участием дисперсных сред [14–17]. В частности, они были использованы для описания конверсии одиночной пластмассовой частицы в суспензии [18], численного моделирования высокотемпературного сжигания частиц биомассы [19], исследования влияния размера коралловых частиц и производительности их подачи на их механические свойства [20].

Непосредственное применение такой модели к описанию процесса в циркуляционном кипящем слое описано в [21], где трансформация свойств частицы описана в восходящем потоке газа, движущегося с постоянной скоростью. Вместе с тем известно, что переход к осциллирующему потоку газа иногда позволяет повысить интенсивность конверсии частиц в этом потоке. Целью исследования является оценка степени влияния пульсаций потока газа на эффективность переработки частиц в циркуляционном кипящем слое с опорой на модель, описанную в [21].

**Теория.** На рис. 1 схематически показано упрощенное представление процесса – одномерного движения частицы с меняющимися во времени свойствами в восходящем потоке газа.

В начальный момент времени частица находится на поверхности газораспределительной решетки. Она вступает в теплофизическое или химическое взаимодействие с потоком газа, что приводит к изменению ее свойств. До тех пор, пока скорость витания частицы меньше скорости газа, она остается на решетке. Затем она начинает двигаться вверх вместе с газом. После достижения верхней границы реактора с кипящим слоем она может или покинуть основной аппарат (прямоточный реактор), или возвратиться в нижнюю его часть и вступить в повторное взаимодействие с газом (реактор с циркуляционным кипящим слоем). Существенным

отличием от модельного представления процесса в [21] является то, что здесь поток газа не стационарен и меняется по синусоидальному закону.

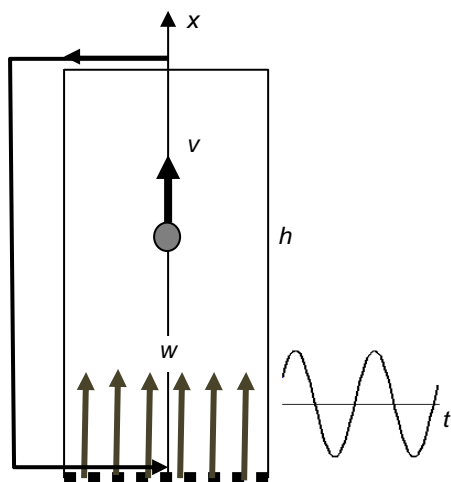


Рис. 1. Схематическое представление процесса движения частицы в восходящем потоке газа

Основные уравнения динамики описываемого процесса имеют следующий вид:

$$w(t) = w_0(1 + k_w \sin \omega t); \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -g + \frac{1}{m} c_f \frac{\pi d^2 \rho_g (w(t) - v)^2}{4}; \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = v; \quad (3)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\beta(m - m_2); \quad (4)$$

$$v(0) = 0, x(0) = 0, m(0) = m_1, \quad (5)$$

где  $w$  – скорость газового потока;  $v$  – скорость частицы;  $x$  – ее координата;  $m$ ,  $d$  и  $\rho_p$  – масса, диаметр и плотность частицы соответственно;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $c_f$  – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Закон изменения массы частицы в (4) принят по аналогии с уравнением химической реакции первого порядка, где  $m_2$  – остаточная масса частицы, которая не вступает в реакцию. Скорость реакции считается пропорциональной поверхности частицы и относительной скорости ее обтекания газом ( $w-v$ ):

$$\beta = \alpha S(w - v)^q, \quad (6)$$

где  $\alpha$  и  $q$  – постоянные параметры.

В общем случае при взаимодействии частицы с газом могут меняться ее плотность и объем. Однако ограничимся случа-

ем, когда меняется только плотность частицы, а ее объем остается постоянным. Тогда уравнение (4) может быть записано следующим образом:

$$\frac{d(\rho_p)}{dt} = -\beta(\rho_p - \rho_{p2}). \quad (7)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления может быть представлен одночленной формулой:

$$c_f = \frac{a}{Re^n}, \quad (8)$$

где  $a = 24$  и  $n = 1$  – для закона сопротивления Стокса (малые числа Рейнольдса),  $a = 13$  и  $n = 0,5$  – для закона Аллена (средние числа Рейнольдса) и  $a = 48$  и  $n = 0$  – для закона Ньютона (большие числа Рейнольдса).

Подстановка (8) в (2) дает следующее уравнение:

$$\frac{dv}{dt} = -g + \frac{3}{4} a \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{v^n}{d^{1+n}} (w - v)^{2-n}. \quad (9)$$

При принятых допущениях скорость витания частицы рассчитывается следующим образом:

$$v_s = \left( \frac{4}{3} \frac{g}{a} \frac{\rho_p}{\rho_g} \frac{d^{1+n}}{v^n} \right)^{\frac{1}{2-n}}. \quad (10)$$

Необходимое время пребывания частицы в потоке оценивается временем  $t_{90}$ , за которое в 90 % реагирующей массы реакция завершается:

$$\frac{\rho(t_{90}) - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} = 1 - 0,9. \quad (11)$$

Учет циркуляции осуществляется следующим образом. Если координата частицы  $x$  достигает высоты  $h$ , то она мгновенно переносится в положение  $x = 0$  и ее скорость приравнивается к нулю.

Разработанная модель позволяет описывать движение и изменение во времени свойств частицы в восходящем потоке газа в реакторе с циркуляционным кипящим слоем.

**Результаты.** Целью численных экспериментов с моделью было выявить, как влияют частота и амплитуда колебаний скорости газового потока на необходимое время трансформации частицы. Расчеты выполнены для  $d = 2$  мм,  $\rho_{p1} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{p2} = 500$  кг/м<sup>3</sup>,  $a = 13$ ,  $n = 0,5$ ,  $h = 5$  м.

Рис. 2 иллюстрирует изменения скорости газа, скорости частицы и ее координаты при колебаниях скорости потока газа. Колебания оказывают существенное

влияние на характер изменение скорости и координаты. Например, при постоянной скорости газа частица, однажды оторвавшись от газораспределительной решетки, уже не будет задерживаться на ней при повторном попадании на нее за счет циркуляции. При колебаниях такая ситуация возможна, если повторное попадание приходится на малую скорость газа. Графики заканчиваются при  $t = t_{90}$ .

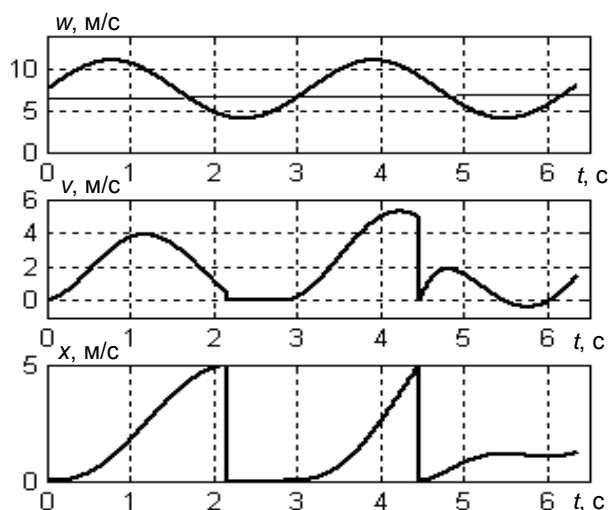


Рис. 2. Изменение скорости и координаты частицы при колебаниях скорости газового потока ( $w_0 = 6$  м/с,  $k_w = 0,5$ ,  $\omega = 2$  с $^{-1}$ ,  $q = 1$ )

На рис. 3 показан график изменения плотности частицы в зависимости от ее текущего положения в реакторе. Правый черный кружок соответствует завершению реакции на 90 %.

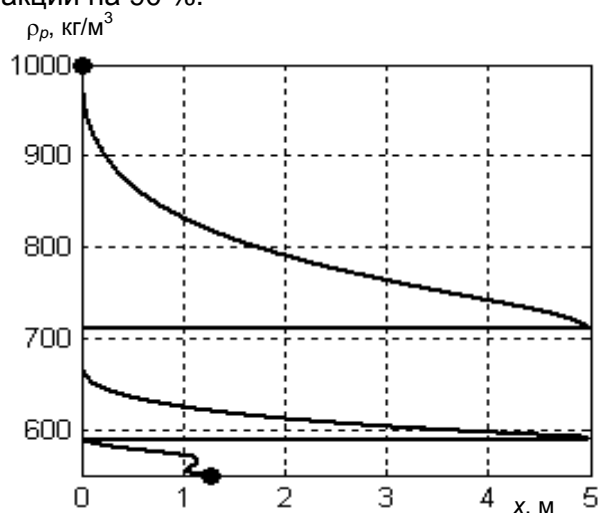


Рис. 3. Изменение плотности частицы по мере ее движения по высоте слоя с циркуляцией ( $w_0 = 6$  м/с,  $k_w = 0,5$ ,  $\omega = 2$  с $^{-1}$ ,  $q = 1$ )

Убедившись, что предложенная модель дает физически непротиворечивые результаты, перейдем к анализу влияния параметров колебаний. Для оценки эффекта введем относительное время завершения реакции  $t_{90}/t_{90R}$ , где  $t_{90R}$  – время завершения реакции при постоянной скорости газа  $w_0$ .

На рис. 4 показано влияние частоты колебаний на  $t_{90}/t_{90R}$ .

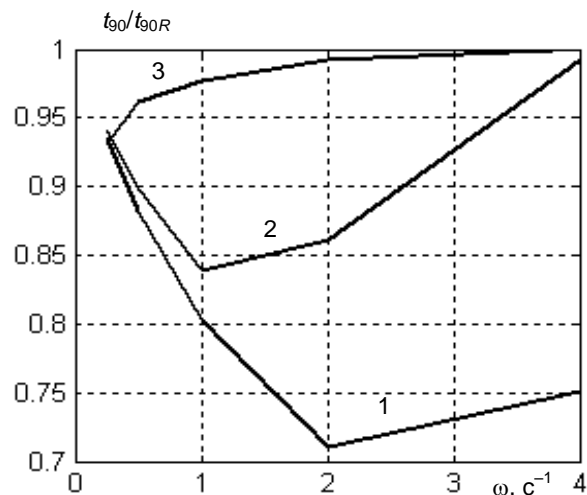


Рис. 4. Влияние частоты колебаний потока на относительное время завершения реакции: 1 –  $q = 2$ ; 2 –  $q = 1,5$ ; 3 –  $q = 1$  ( $w_0 = 6$  м/с,  $k_w = 0,5$ )

Параметром кривых является коэффициент  $q$  в уравнении (6), характеризующий степень зависимости скорости реакции от относительной скорости движения частицы и газа. При сильной зависимости скорости реакции от относительной скорости частицы ( $q = 2$ ,  $q = 1,5$ ) выигрыш во времени имеет экстремум по частоте, но при слабой зависимости ( $q = 1$ ) выигрыш монотонно убывает с ростом частоты. Таким образом, оптимальная (рациональная) частота колебаний существенно зависит от характера зависимости скорости реакции от относительной скорости частицы.

На рис. 5 показано влияние относительной амплитуды колебаний на выигрыш во времени.

Анализ полученных зависимостей (рис. 5) показывает, что характер зависимости существенно зависит от  $q$ . При  $q = 1$  рост амплитуды практически не дает выигрыша, а при  $k_w > 0,75$  необходимое время даже увеличивается. При  $q = 1,5$  эта зависимость имеет минимум, а при  $q = 2$  выигрыш во времени монотонно возрастает.

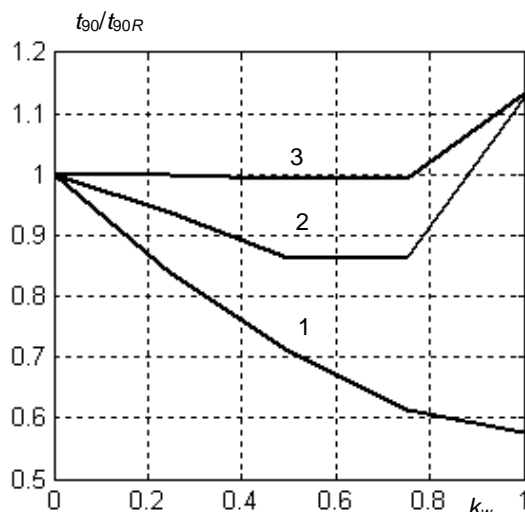


Рис. 5. Влияние относительной амплитуды колебаний потока на относительное время завершения реакции: 1 –  $q = 2$ ; 2 –  $q = 1,5$ ; 3 –  $q = 1$  ( $w_0 = 6$  м/с,  $\omega = 2$  с $^{-1}$ )

**Выводы.** На основе анализа разработанной модели показано, что пульсации газового потока в большинстве случаев позволяют сократить время, необходимое для переработки частиц в циркуляционном кипящем слое. Наиболее значительный выигрыш во времени достигается при сильной зависимости постоянной скорости реакции от скорости обтекания частицы. В этом случае по частоте колебаний имеется экстремум, дающий максимальный выигрыш во времени, а по амплитуде – или монотонное возрастание выигрыша, или его оптимальное значение. Модель может быть легко адаптирована к другому механизму изменения свойств частиц.

#### Список литературы

1. **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 // *Part. Sci. Technol.* – 2014. – Vol. 32. – P. 171–178.
2. **Dehling H.G., Hoffmann A.C., Stuu H.W.** Stochastic models for transport in a fluidized bed // *SIAM J. Appl. Math.* – 1999. – Vol. 60. – P. 337–358.
3. **A stochastic** model for mixing and segregation in slugging fluidized beds / H.G. Dehling, C. Dechsiri, T. Gottschalk, et al. // *Powder Technol.* – 2007. – Vol. 171. – P. 118–125.
4. **Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V.** Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // *Powder Technol.* – 2005. – No. 157. – P. 128–137.
5. **Modeling** of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler–Lagrange approach / W.P. Adamczyk, G. Wecel, M. Klajny, et al. // *Particuology.* – 2014. – Vol. 16. – P. 29–40.
6. **Numerical** approach for modelling particle transport phenomena in a closed loop of a circulating fluidized bed / W.P. Adamczyk, P. Kozolub, Kruczek, et al. // *Particuology.* – 2016. – Vol. 29. – P. 69–79.
7. **Qi X., Zhu J., Huang W.** A new correlation for predicting solids concentration in the fully developed zone of circulating fluidized bed risers // *Powder Technol.* – 2008. – Vol. 188. – P. 64–72.
8. **Balasubramaniani N., Srinivasakannan C.** Drying of granular materials in circulating fluidized beds // *Adv. Powder Technol.* – 2007. – Vol. 18. – P. 135–142.
9. **Experimental** analysis of the gas–particle flow in a circulating fluidized bed using a phase Doppler particle analyzer / T. Van den Moortel, E. Azario, R. Santini, L. Tadrist // *Chem. Eng. Sci.* – 1998. – Vol. 10. – P. 1883–1899.
10. **On Possible** Instability of Throughputs in Complex Milling Circuits / V. Mizonov, V. Zhukov, A. Korovkin, H. Berthiaux // *Chem. Eng. Process.* – 2005. – Vol. 44. – P. 267–272.
11. **Mizonov V., Zhukov V., Zaitsev V.** Optimal Positioning of the Circulating Load Input along the Tube Mill Length // *Chem. Eng. & Technol.* – 2014. – No. 37. – P. 873–878.
12. **Theoretical** Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. Recent Innovations in Chemical Engineering / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Camelo, L. Ovchinnikov // *Recent Innovations in Chemical Engineering.* – 2018. – No. 11(1). – P. 20–28. doi: 10.2174/2405520410666170620105102.
13. **A Markov** chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties / A. Mitrofanov, V. Mizonov, K. Tannous, L. Ovchinnikov // *Part. Sci. Technol.* – 2018. – Vol. 36, no. 2. – P. 244–253. doi: 10.1080/02726351.2016.1243180.
14. **Analysis** of particle rotation in fluidized bed by use of discrete particle model / Run-Jia Liu, Rui Xiao, MaoYe, Zhongmin Liu // *Advanced Powder Technology.* – 2018. – Vol. 29, issue 7. – P. 1655–1663. doi.org/10.1016/j.apr.2018.03.032
15. **Fluidized** bed classification of particles of different size and density / Jana Chladek, Chameera K. Jayarathna, Britt M.E. Moldestad, Lars-Andre Tokheim // *Chem. Eng. Sci.* – 2018. – Vol. 177. – P. 151–162. doi.org/10.1016/j.ces.2017.11.042
16. **A phenomenological** model of single particle breakage as a multi-stage process / Fatemeh Saeidi, Luis Marcelo Tavares, Mohsen Yahyaee, Malcolm Powell // *Minerals Engineering.* – 2016. – Vol. 98. – P. 90–100. doi.org/10.1016/j.mineng.2016.07.006

17. **Anisotropic** single-particle dissipative particle dynamics model / Mingge Deng, Wenxiao Pan, George Em Karniadakis // *Journal of Computational Physics*. – 2017. – Vol. 336. – P. 481–491. doi.org/10.1016/j.jcp.2017.01.033
18. **Experiments** and modeling of single plastic particle conversion in suspension / Hao Wu, Damien Grévin, Lars Skaarup Jensen, et al. // *Fuel Processing Technology*. – 2018. – Vol. 178. – P. 213–225. doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.05.003
19. **Numerical** simulation of high-temperature fusion combustion characteristics for a single biomass particle / Yao Xu, Ming Zhai, Shuai Jin, et al. // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 183. – P. 27–34. doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.10.024
20. **Effects** of size and loading rate on the mechanical properties of single coral particles / Linjian Ma, Zeng Li, Mingyang Wang, Houzhen Wei, Pengxian Fan // *Powder Technol.* – 2019. – Vol. 342. – P. 961–971. doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.037
21. **A simple** model to estimate and compare efficiency of fluidized bed reactor without and with circulation / V.E. Mizonov, A.V. Mitrofanov, K. Tannous, A. Camelo // *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* – 2019. – Vol. 62, no. 3. – P. 83–88. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5852

---

*Мизонов Вадим Евгеньевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, e-mail: mizonov46@mail.ru

*Mizonov Vadim Evgen'evich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, professor of Applied Mathematics Department, e-mail: mizonov46@mail.ru

*Митрофанов Андрей Васильевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры прикладной математики, e-mail: and2mit@mail.ru

*Mitrofanov Andrey Vasilyevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Associate Professor of Applied Mathematics Department, e-mail: and2mit@mail.ru

*Басова Елена Владимировна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры высшей математики, e-mail: nowikowa.elena@mail.ru

*Basova Elena Vladimirovna,*

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Higher Mathematics Department, e-mail: nowikowa.elena@mail.ru

*Tannous Katia,*

University of Campinas, Chemical Engineering School (Brazil), Doctor of Engineering, Professor, e-mail: katia@feq.unicamp.br

*Сизова Ольга Владимировна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и цифровой экономики, e-mail: siz-olga@yandex.ru

*Sizova Olga Vladimirovna,*

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of information technologies and digital economics department, e-mail: siz-olga@yandex.ru