

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА В КОЛОННОМ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОМ РЕАКТОРЕ

Сеченов П.А., старший преподаватель кафедры прикладных информационных технологий и программирования (pavesa89@mail.ru)

Цымбал В.П., д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования (tsymbal33@mail.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассматривается задача создания имитационной модели гравитационного сепаратора в колонном струйно-эмульсионном реакторе (СЭР). Основное внимание уделено рассмотрению сил, действующих на частицу. Показан алгоритм генерации крупности частиц по нормальному закону распределения в заданном диапазоне. Учтено влияние скорости потока газа по высоте реактора при турбулентном движении и случайные скорости, действующие на частицу по высоте реактора. Рассмотрены упругие и неупругие соударения, при которых учитывается изменение скоростей и масс двух частиц, а также схемы взаимодействия частиц железной руды, шлака, металла, углерода, газов CO и CO₂. Приведен расчет плотностей газа и смеси по высоте реактора; определены массовые приходы и расходы частиц железной руды, шлака и металла.

Ключевые слова: имитационная модель, гравитационный сепаратор, струйно-эмульсионный реактор, взаимодействие частиц.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-278-283

Ранее были рассмотрены проблемы управления химическим составом металла в струйно-эмульсионном процессе и агрегате СЭР [1, 2]. Показано, что это достигается путем режимной организации динамических диссипативных структур [2], играющих роль своеобразных «камер», которые планировалось создавать в конструкциях агрегатов, когда интенсивно велись первые работы по созданию непрерывных сталеплавильных процессов [3, 6].

Благодаря созданию ряда диссипативных структур, которые могут существовать только при определенных, достаточно интенсивных потоках вещества и энергии [1], создается возможность раздельного управления восстановительными и окислительными процессами. Рассмотрим эти диссипативные структуры [2] со ссылкой на модель (рис. 1), представленную следующими зонами:

- зона 1 – ядро уплотнения на встречных струях газа;
- зона 2 – реактор-осциллятор, включающий упомянутую структуру 1, а также соединительный канал 3 (зона 3), играющий роль газодинамического затвора при критическом истечении двухфазной среды; осциллятор является, по существу, побудителем расхода подготовленной в нем рабочей смеси;
- зона 4 – динамическая провальная решетка, отделяющая и поддерживающая зоны 6 и 7 (где протекают в основном восстановительные реакции)

от зон 5 и 8 (где могут протекать, в том числе и окислительные реакции).

В настоящей работе основное внимание уделено моделированию процессов в зонах 6 и 7, которые представляются в виде диссипативного гравитационного сепаратора. Ранее была предпринята попытка решить эту задачу на основе двухскоростной модели Р.И. Нигматулина [7]. Для системы вода–воздух эту модель удалось достаточно хорошо идентифицировать, попытка же решения этой задачи для реальной шлако-эмульсионной системы пока не увенчалась успехом.

Ниже рассматривается постановка задачи, аналогичная подходу с использованием «первых принципов», аналогичных тем, которые были использованы при создании кинетической теории газов (молекулярной кинетики). В данном случае в качестве первых принципов рассматриваются: взаимодействие дисперсных частиц шихты (руда, уголь) и продуктов реакций (металл, шлак, газ). В качестве основной элементарной ячейки рассматривается процесс обтекания дисперсной частицы вертикальным потоком газа.

Для решения этой задачи разработан специальный алгоритм, реализующий подход, аналогичный методу Монте-Карло.

Целью настоящей работы является описание механизма и создание имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного реактора [1,2].

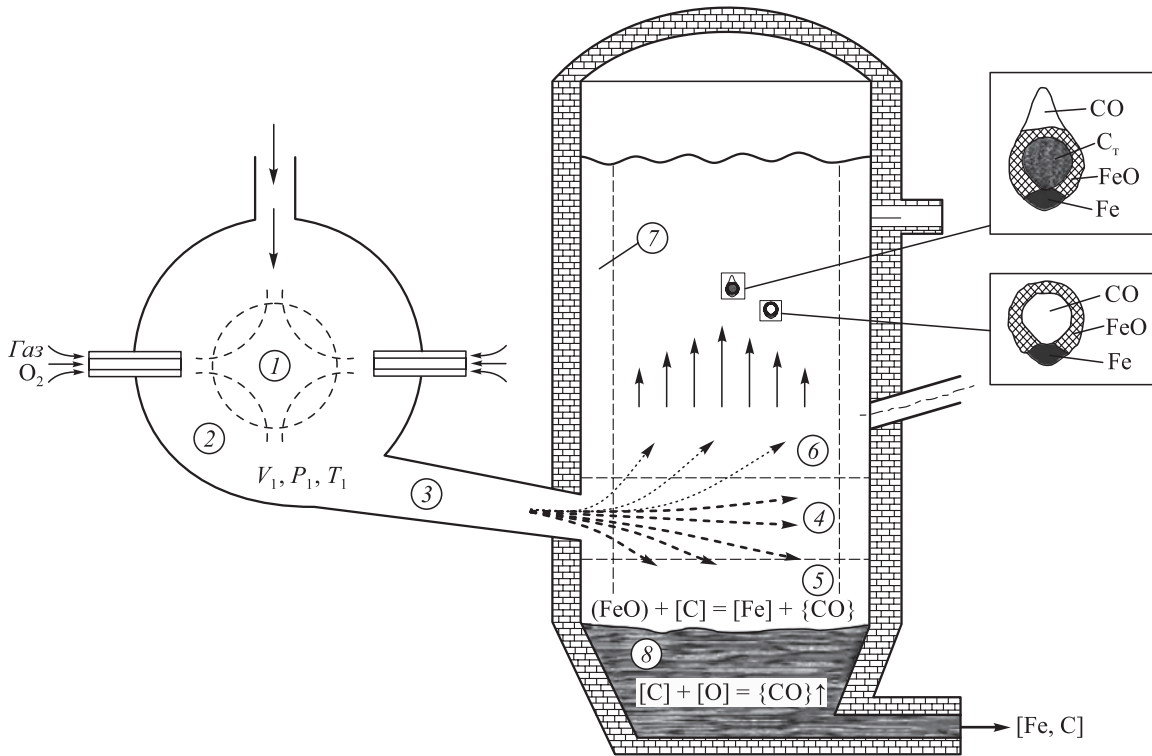


Рис. 1. Зонная модель струйно-эмульсионного реактора

Fig. 1. Band model of a jet-emulsion reactor

На рис. 2 представлены силы, действующие на частицу: сила давления потока F_C , направленная снизу вверх; сила тяжести F_G и архимедова сила F_A . В зависимости от соотношения этих сил частица может подниматься, опускаться или оставаться неподвижной.

В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению [8]

$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{TB}}{dt}, \quad (1)$$

где m – масса частицы; ω_{TB} – скорость движения сферической частицы; t – время.

Сила тяжести и сила давления потока выражаются как

$$F_G = mg; \quad (2)$$

$$F_C = cS\rho \frac{\omega^2}{2}, \quad (3)$$

где S – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока); ρ – плотность смеси; ω – скорость потока смеси; c – коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса (для сферических частиц в турбулентном режиме $c = 0,44$).

Подъемная, или архимедова сила находится из выражения

$$F_A = \frac{m}{\rho_{TB}} \rho g. \quad (4)$$

Из уравнений (1) – (4) получим

$$\frac{d\omega_{TB}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{TB}} \right) - \frac{c\rho\omega^2}{2m} S. \quad (5)$$

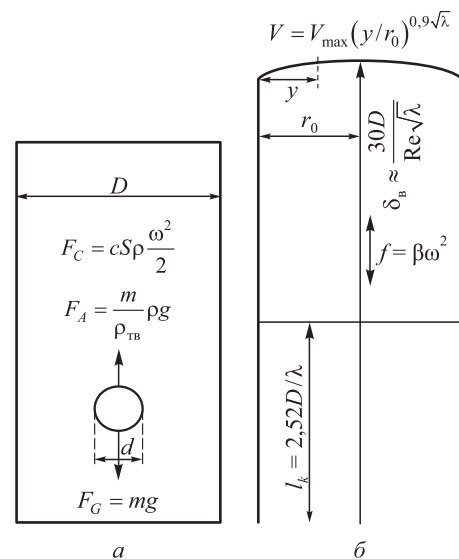


Рис. 2. Силы, действующие на частицу в гравитационном сепараторе (а), и эпюра скоростей для турбулентного течения (б)

Fig. 2. Forces, acting on a particle in a gravitational separator (a), and the diagram of velocities for the turbulent flow (b)

Параболическое распределение скоростей при турбулентном движении в круглых трубах наступает не у самого начала трубы, а на некотором расстоянии l_n от входного сечения, которое находят по формуле [9]

$$l_n = 2,52D/\lambda, \quad (6)$$

где D – диаметр канала; λ – коэффициент Дарси.

Для турбулентного движения определить коэффициент Дарси можно по формуле Г. Блазиуса:

$$\lambda = 0,3164/\text{Re}^{0,25}. \quad (7)$$

Эпюру скоростей рассчитываем по формуле Альшуля [10]:

$$V = V_{\text{макс}}(y/r_0)^{0,9\sqrt{\lambda}}; \quad (8)$$

здесь y – расстояние от точки, в которой рассчитывается скорость, до стенки трубы; r_0 – радиус колонного реактора.

Генерация нормального закона распределения granulометрического состава подаваемых частиц железной руды осуществляется с помощью метода Неймана. Сначала генерируются две случайные пары чисел x_1^n и x_2^n , из них формируются другие случайные числа по следующим правилам:

$$x_1^{n*} = a + (b - a)x_1^n; \quad (9)$$

$$x_2^{n*} = w_m x_2^n, \quad (10)$$

где a, b – границы интервала определения случайной величины (т.е. минимальное и максимальное значения радиусов частиц железной руды); w_m – максимальное значение функции распределения.

Для функции нормального закона распределения имеем

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}; \quad W(x)_{\text{макс}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}, \quad (11)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение.

В качестве реализации случайной величины берется число x_1^{n*} из тех пар чисел, для которых выполняется условие

$$x_2^{n*} \leq w(x_1^{n*}). \quad (12)$$

Пары, неудовлетворяющие этому неравенству, выбрасываются, и на шаге n происходит возврат к генерации новой пары чисел.

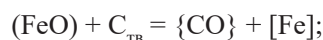
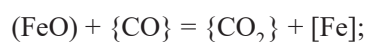
Перейдем к рассмотрению соударений частиц. В имитационной модели различают два типа соударений: упругие (для нерасплавленных частиц) и неупругие (для расплавленных частиц). Для неупругого соударения скорость объединенной частицы запишется как

$$\omega = \frac{m_1\bar{\omega}_1 + m_2\bar{\omega}_2}{m_1 + m_2}. \quad (13)$$

Для упругих ударов из закона сохранения импульса и энергии получим

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \bar{\omega}_1 \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{2m_2}{(m_1 + m_2)}; \\ \omega_2 &= \bar{\omega}_1 \frac{2m_1}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Процессы, происходящие в верхней части реактора [1, 2], определяют процесс изменения состава конденсированных веществ и являются преимущественно восстановительными. Здесь возможны следующие основные реакции:



С учетом этих реакций были выбраны следующие механизмы взаимодействия частиц.

Каждые две секунды в колонный реактор попадают частицы железной руды с диапазоном радиусов 0,1 – 2,0 мм, распределенные по нормальному закону. Состав железной руды и газов, поступающих в реактор, взят в соответствии с термодинамическими и балансовыми расчетами [11]. Зависимость скорости растворения частицы от радиуса заимствована из работы [12].

Кроме того, в реактор поступают твердые частицы углерода. При встрече двух частиц типа железная руда–железная руда, углерод–углерод и железная руда–углерод удары считаются упругими. Как только частица железной руды расплавилась более чем на 50 %, при встрече двух частиц железная руда–углерод, удар считается неупругим. При встрече двух частиц типа шлак–шлак и железо–железо удары неупругие. После того, как конкретная частица железной руды расплавилась, образуются две новые частицы: железо и шлак, средний состав и плотность которых принимается в соответствии с расчетами баланса и термодинамики, а затем разыгрываются по нормальному закону распределения. При встрече шлаковой частицы с газовой был реализован также вариант образования шарообразных полых частиц шлака, которые образуются (как показали эксперименты на опытной установке) в результате турбулизационно-инерционного механизма. Этот вопрос заслуживает отдельного рассмотрения.

Плотность газа по высоте рассчитывается по слоям; на n -ом слое вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_{\text{сл},n}^{\text{г}} = \frac{\sum \rho_{\text{сл},n}^{\text{г-ч}}}{c_{\text{сл},n}^{\text{г-ч}}} \frac{\sum V_{\text{сл},n}^{\text{г-ч}}}{V_{\text{сл},n}} + \rho_0^{\text{г}} \left(1 - \frac{\sum V_{\text{сл},n}^{\text{г-ч}}}{V_{\text{сл},n}} \right), \quad (15)$$

где $\sum \rho_{сл,n}^{\Gamma-ч}$ – сумма плотностей газовых частиц на n -ом слое; $c_{сл,n}^{\Gamma-ч}$ – количество газовых частиц на n -ом слое; $\sum V_{сл,n}^{\Gamma-ч}$ – сумма объемов газовых частиц на n -ом слое; $V_{сл,n}$ – объем n -го слоя; ρ_0^r – начальная плотность газа, рассчитываемая из материального баланса.

Объем газовой частицы определяется из объема расплавленной железной руды в результате реакций $(FeO) + \{CO\} = \{CO_2\} + [Fe]$; $(FeO) + C_{тв} = \{CO\} + [Fe]$:

$$V^{\Gamma-ч} = \frac{\rho_{ж.р.} V_{ж.р}}{M_{ж.р}} V_m, \quad (16)$$

где $\rho_{ж.р}$ и $V_{ж.р}$ – плотность и объем железной руды; $M_{ж.р.}$ и V_m – молярная масса железной руды и молярный объем газа.

Начальную плотность газа находим из выражения

$$\rho_0^r = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_k \chi_k}{1 + \frac{T - T_0}{T_0}}, \quad (17)$$

в котором ρ_k и χ_k – плотность и доля k -го компонента смеси газа при нормальных условиях; T – текущая температура газа, К.

Плотность среды по высоте канала делится на n частей и в n -ом слое вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_{сл,n} = \frac{\sum \rho_{сл,n}^ч}{c_{сл,n}^ч} \frac{\sum V_{сл,n}^ч}{V_{сл,n}} + \rho_{сл,n}^r \left(1 - \frac{\sum V_{сл,n}^ч}{V_{сл,n}} \right), \quad (18)$$

где $\sum \rho_{сл,n}^ч$ – сумма плотностей частиц в n -ом слое; $c_{сл,n}^ч$ – количество частиц на n -ом слое; $\sum V_{сл,n}^ч$ – сумма объемов частиц в n -ом слое; $\rho_{сл,n}^r$ – плотность газа в n -ом слое, рассчитываемая по формуле (15).

Для реализации поставленной задачи был выбран объектно-ориентированный язык программирования ActionScript 3.0 [13], имеющий возможность отображения большого числа объектов на сцене, встроенные функции добавления (удаления) из массива объектов; функции проектирования 3D объекта на плоскость и др. Выходной файл программы легко может быть встроен в страницу браузера или электронный учебник, например, в качестве демонстрацион-

ной обучающей модели для системы дистанционного обучения.

Реализованная программа состоит из основного модуля и четырех классов (рис. 3).

На рис. 4 представлен фрагмент работы созданной имитационной модели, а также графическое представление результатов моделирования. Наряду с дифференциацией результатов движения и взаимодействия частиц выводится следующая информация: об общем количестве частиц в реакторе; количестве частиц железной руды, углерода, шлака, железа, CO, CO₂; средние массы за минуту железной руды, шлака и железа; графики массового содержания соответствующих частиц. Также предусмотрена возможность менять количество подаваемых частиц железной руды и углерода.

Тестирование показало работоспособность этого алгоритма и удовлетворительное совпадение конечных результатов имитационного моделирования с законом сохранения вещества.

Выводы. Созданная имитационная модель, являющаяся в определенной степени заместителем объекта, позволяет наглядно изучить механизм процессов в гравитационном сепараторе при разном гранулометрическом составе, оценить среднее время пребывания частиц, определить средний расход частиц железа и шлака при различном заданном количестве частиц углерода. Алгоритмы и программная реализация процесса имитационного моделирования рассматриваются в отдельной статье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. – М.: Металлургия, 2014. – 488 с.
2. Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А. и др. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса. – В кн.: Сборник трудов 13-го Международного конгресса сталеплавыльщиков. г. Полевской, 12 – 18 октября 2014 г. – Москва – Полевской: 2014. С. 472 – 477.
3. Баптизмандский В.И., Кравченко В.А., Паниотов Ю.Е. и др. Исследование гидродинамических характеристик реактора установки непрерывного сталеплавленного процесса. – В кн.: Труды совещания «Непрерывные процессы выплавки черных и цветных металлов». – М.: Наука, 1975. С. 24 – 28.
4. Смирнов В.И., Василевичкий А.В., Франтова Э.С. и др. Исследование технологии выплавки стали в конвертерном САНД на

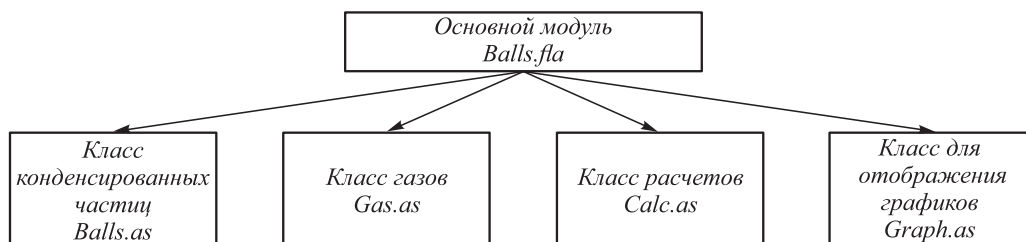


Рис. 3. Основные классы программы

Fig. 3. Main program classes

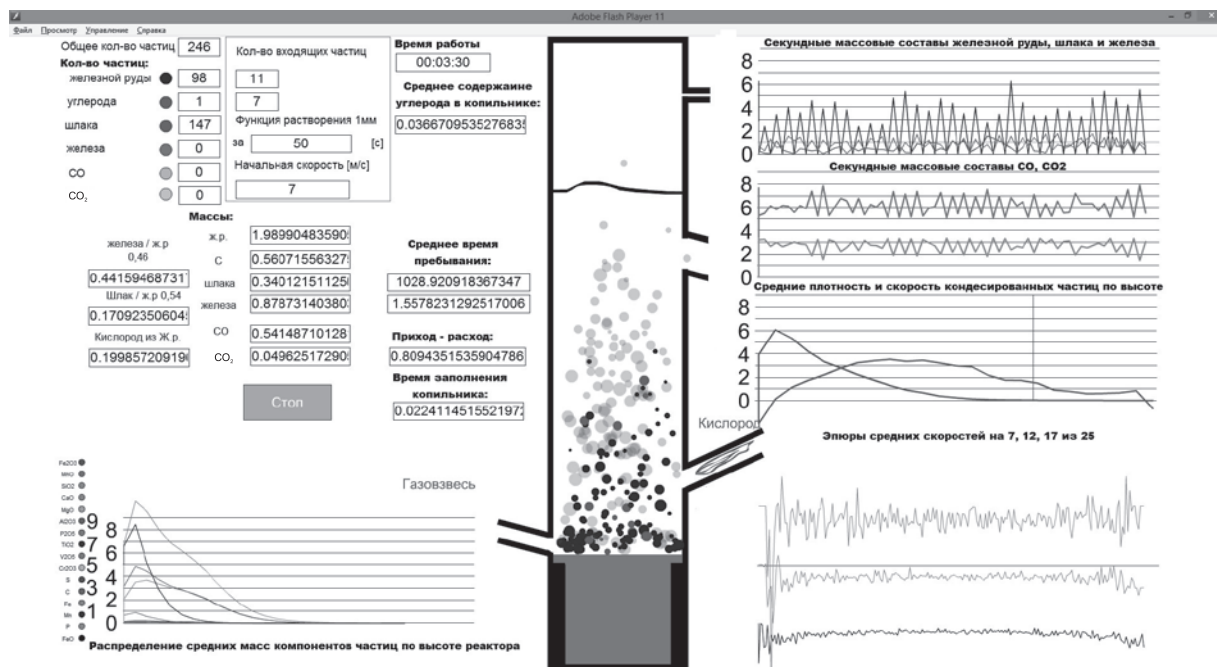


Рис. 4. Пример программной реализации имитационной модели гравитационного сепаратора типа СЭР

Fig. 4. Example of software implementation of a simulation model of a gravitational separator of a jet-emulsion reactor (JER) type

опытном агрегате ЦНИИЧМ-ВНИИметмаш. – В кн.: Труды совещания «Непрерывные процессы выплавки черных и цветных металлов». – М.: Наука, 1975. С. 57 – 65.

5. Андреев Г.К., Новиков В.Н., Василивицкий А.В. и др. Проектно-конструкторские разработки САНД конвертерного типа. – В кн.: Труды совещания «Непрерывные процессы выплавки черных и цветных металлов». – М.: Наука, 1975. С. 163 – 167.
6. Бигеев А.М. Непрерывные сталеплавильные процессы. – М.: Металлургия, 1986. – 136 с.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
8. Лавренко А.Т. Анализ работы сепаратора прямого коксового газа. Автореф. дисс. магистра: [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.urgn.donetsk.ua>. Заглавие с экрана. (дата обращения 18.02.2015 г.).
9. Крамаренко В.В., Савичев О.Г. Гидравлика. Ч. 1. Методические материалы по курсу «Гидравлика». – Томск: изд. Томского политех. ун-та, 2009. – 124 с.

10. Примеры расчетов по гидравлике. Учебное пособие для вузов / Альтшуль А.Д., Калицун В.И., Майрановский Ф.Г., Пальгунов П.П. – М.: Стройиздат, 1977. – 248 с.
11. Ore enrichment required for a Self-organizing jet-emulsion reactor / V.P. Tsybmal, S.P. Mochalov, M.S. Parovinchak etc. // *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39, no. 4, pp. 310 – 312.
12. Сеченов П.А., Оленников А.А., Цымбал В.П. Исследование динамики изменения состава шлака в зонной модели колонного струйно-эмульсионного реактора. – В кн.: *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве*. – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2014. С. 105 – 110.
13. Справочник по ActionScript 3.0 для платформы AdobeFlash [Электронный ресурс]/URL:http://help.adobe.com/ru_RU/FlashPlatform/reference/actionscript/3/ (дата обращения: 18.02.2015).

Поступила 24 апреля 2015 г.

SIMULATION MODELING OF GRAVITY SEPARATOR IN A COLUMN JET-EMULSION REACTOR

P.A. Sechenov, V.P. Tsybmal

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The article discusses the formulation of the problem of creating a simulation model of the gravity separator in the column jet-emulsion reactor. The main attention is paid to the forces acting on the particle and generation of particle size on the normal distribution within a predetermined range. The flow rate of gas through the reactor at a height of the turbulent motion and random velocities acting on the particle height of the reactor are considered as well as the velocity and mass of the two particles in elastic and inelastic collisions. The patterns of interaction of particles of iron ore, slag, metal, carbon emissions CO and CO₂ and the calculation of the density of gas and the reactor mixture

adjustment were made. The authors have determined the defining costs and mass arrivals of iron ore particles of slag and metal.

Keywords: simulation model, gravity separator, spray-emulsion reactor, particles interaction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-4-278-283

REFERENCES

1. Tsybmal V.P., Mochalov S.P., Rybenko I.A., etc. *Protsessy SER – metallurgicheskii struino-emul'sionnyi reaktor* [JER process – metallurgical jet-emulsion reactor]. Moscow: Metallurgiya, 2014, 488 p. (In Russ.).
2. Tsybmal V.P., Kozhemyachenko V.I., Rybenko I.A., etc. Using the principles of self-organization and dissipative structures when creat-

- ing a new jet-emulsion metallurgical process. In: *Sbornik trudov 13-go Mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov. g. Polevskoi, 12 – 18 oktyabrya 2014 g.* [Proceedings of the 13th International Congress of Steelmakers (Polevskoi, 12 – 18 October 2014)]. Moscow – Polevskoi: 2014, pp. 472–477. (In Russ.).
3. Baptizmanskii V.I., Kravchenko V.A., Paniotov Yu.E., etc. The research of hydrodynamic characteristics of reactor for continuous steel-making process. In: *Trudy soveshchaniya "Neprieryvnye protsessy vyplavki chernykh i tsvetnykh metallov"* [Proceedings of the conference "Continuous smelting processes of ferrous and non-ferrous metals"]. Moscow: Nauka, 1975, pp. 24–28. (In Russ.).
 4. Smirnov V.I., Vasilivitskii A.V., Frantova E.S., etc. The research of steel-making technology in a SAND converter on an experimental unit of Central Research and Development Institute of Ferrous Metallurgy-All-Union research and Development Institute of Metallurgical Machine-Building. In: *Trudy soveshchaniya "Neprieryvnye protsessy vyplavki chernykh i tsvetnykh metallov"* [Proceedings of the Conference "Continuous smelting processes of ferrous and non-ferrous metals"]. Moscow: Nauka, 1975, pp. 57–65. (In Russ.).
 5. Andreev G.K., Novikov V.N., Vasilivitskii A.V. etc. Engineering efforts of SAND unit of converter type. In: *Trudy soveshchaniya "Neprieryvnye protsessy vyplavki chernykh i tsvetnykh metallov"* [Proceedings of the conference "Continuous smelting processes of ferrous and non-ferrous metals"]. Moscow: Nauka, 1975, pp. 163–167. (In Russ.).
 6. Bigeev A.M. *Neprieryvnye staleplavil'nye protsessy* [Continuous steelmaking processes]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 136 p. (In Russ.).
 7. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Ch. 1* [The dynamics of multiphase media. Part. 1]. Moscow: Nauka, 1987, 464 p. (In Russ.).
 8. Lavrenko A.T. *Analiz raboty separatora pryamogo koksovogo gaza. Avtoref. diss. magistra* [Analysis of the separator of direct coke gas. Extended Abstract of of MA student diss.]. Electronic resource. Available at URL: <http://www.uran.donetsk.ua>
 9. Kramarenko V.V., Savichev O.G. *Gidravlika. Ch. 1. Metodicheskie materialy po kursu "Gidravlika"* [Hydraulics. Part 1. Training materials for the course "Hydraulics"]. Tomsk: izd. Tomskogo politekh. un-ta, 2009, 124 p. (In Russ.).
 10. Al'tshul' A.D., Kalitsun V.I., Mairanovskii F.G., Palgunov P.P. *Primery raschetov po gidravlike. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Sample calculations on hydraulics. A manual for schools]. Moscow: Stroiizdat, 1977, 248 p. (In Russ.).
 11. Tsybmal V.P., Mochalov S.P., Parovinchak M.S. etc. Ore enrichment required for a Self-organizing jet-emulsion reactor. *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39, no. 4, pp. 310–312. (In Russ.).
 12. Sechenov P.A., Olennikov A.A., Tsybmal V.P. The study of the dynamics of changes in composition of the slag in the band model of column jet-emulsion reactor. In: *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve* [Heat engineering and computer science in education, science and industry]. Ekaterinburg: izd. UFU, 2014, pp. 105–110. (In Russ.).
 13. *Spravochnik po ActionScript 3.0 dlya platformy AdobeFlash* [ActionScript 3.0 Reference for the Adobe Flash Platform]. Electronic resource. Available at URL: http://help.adobe.com/ru_RU/Flash-Platform/reference/actionscript/3/ (accessed date: 18/02/2015). (In Russ.).
- Information about the authors:**
- P.A. Sechenov**, Senior Lecturer of the Chair of Applied Information Technologies and Programming (pavesas89@mail.ru)
- V.P. Tsybmal**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Applied Information Technologies and Programming (tsymbal33@mail.ru)

Received April 24, 2015