

УДК 004.942

Цымбал В.П.¹, профессор, д.т.н.
Павлов В.В.², зам. ген. директора
Сеченов П.А.¹, ст. преподаватель
Оленников А.А.¹, доцент, к.т.н.
(1 – СибГИУ, г. Новокузнецк,
2 – ООО «Регионстрой», г. Новокузнецк)
Tsymbal V.P.¹, professor, doctor of engineering sciences
Pavlov V.V.², deputy general Director
Sechenov P.A.¹, senior lecturer
Olennikov A.A.¹, associate professor, doctor of engineering sciences
(1 – SibSIU, Novokuznetsk,
2 – LLC "Regionstroy", Novokuznetsk)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ СЕПАРАТОРОВ

SIMULATION AND OPTIMIZATION DESIGN OF GRAVITY SEPARATORS

Обогащительные фабрики и перерабатывающие комплексы относятся к числу основных объектов горнодобывающих предприятий, определяющих эффективность освоения минерально-сырьевых ресурсов страны [1].

В кемеровской области переработке угля уделяют особое внимание и постепенно вводят новые мощности, так в декабре 2012 г. открылась фабрика «Черниговская-Коксовая» производительностью 4,5 млн. т угля в год [2]. В 2017-2018 года в Кемеровской области планируют построить три новые обогатительные фабрики. Обогащение угля позволяет продавать его потребителям по более высокой цене – в 2-3 раза дороже рядового.

В Кузбассе, особенно в районе города Новокузнецка, накоплено большое количество шламов газо-отделок, пылевидных металлосодержащих отходов, как правило, перемешанных с отходами углеобогащения.

Применение компьютерных технологии на обогатительных фабриках, применяемых чаще всего в виде пакетов прикладных программ, позволяют решать ряд комплексных задач – от проектирования схем и выбора оборудования до оптимального управления процессами [3]. Моделирование процессов позволяет из множества рассмотренных вариантов выбрать те, которые позволяют минимизировать затраты и риски, следовательно для проектирования эффективных гравитационных сепараторов требуются современные методы моделирования.

Рассматриваемые в статье имитационная модель и программное обеспечение позволяет сократить стадию пред-проектного исследования и ОКР и уменьшить затраты на создание опытных физических установок.

Рассматриваемая имитационная модель основана на использовании метода статистических испытания Монте-Карло и «первых принципах». В качестве первых принципов рассматриваются дисперсные частицы шихты и продуктов реакций, а также все возможные варианты их превращений и взаимодействий. Ядром этой модели является процесс обтекания конденсированной частицы вертикальным потоком газа. Алгоритм позволяет имитировать витание большого числа частиц в потоке несущего газа, в том числе с учетом столкновений частиц и обмена векторными значениями импульсов. На основе подобной методики создана имитационная модель вертикального гравитационного сепаратора для разделения пылевидных материалов. Приведен также пример применения данной методики для разделения составляющих очень мелкодисперсной пыли из газоочистки марганцевого производства на два ценных, ликвидных продукта.

Представляемая статья является дальнейшим развитием многолетней работы коллектива ученых, производственников и проектировщиков, в процессе которой был создан и доведен до уровня крупномасштабной опытной установки на Запсибметкомбинате [4] новый металлургический процесс и агрегат СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор).

При создании этого агрегата была предпринята попытка использования некоторых идей теории самоорганизации (синергетики), таких как принципы подчинения и наименьшего принуждения, большого отклонения от термодинамического равновесия и др. [5]. Для реализации этих принципов удалось использовать ряд интересных физических эффектов, таких как диспергация шихты встречными струями газа, создание самоорганизующегося реактора-осциллятора за счет использования эффекта критического истечения двухфазного потока и обратной связи по изменению газосодержания продуктов реакций, нижняя подача рабочей смеси из реактора-осциллятора в колонный реактор, организация внутреннего пневмотранспорта рабочей смеси.

Сочетание этих факторов и мероприятий позволило создавать в агрегате динамические диссипативные структуры [6], что привело к резкому уменьшению удельного объема агрегата (в 10-15 раз) и обеспечило значительную гибкость управления, в том числе соотношением скоростей восстановительных и окислительных реакций, что дает возможность прямого получения металла с достаточно широким диапазоном содержаний углерода.

Важнейшим моментом реализации рассматриваемого процесса являются математические модели. Зонная модель процесса была рассмотрена

ранее [7, 8]. Ниже мы остановимся на одной из важнейших диссипативных структур – гравитационном сепараторе, который образуется в вертикальном колонном реакторе при определенных режимах течения двухфазного потока рабочей смеси, подготовленной в реакторе-осцилляторе.

Имитационная модель гравитационного сепаратора

При создании и математическом описании этой важной диссипативной структуры, предназначенной для разделения металла, шлака и газа, удалось реализовать имитационную модель, основанную на использовании метода Монте-Карло и «первых принципов». В данном случае в качестве первого (базового) уровня рассматриваются дисперсные частицы шихты и продуктов реакций, а также все возможные варианты их превращений и взаимодействий.

Метод Монте-Карло появился более чем полвека назад [9], но интерес к этому методу [10] и примеры его применения [11, 12] увеличиваются. Недавно в англоязычном издании вышло фундаментальное справочное руководство по методу Монте-Карло, которое по праву можно считать энциклопедией по теории вероятностей и математической статистике, настолько широк круг вопросов, рассмотренных в нем [13]. Наиболее сложные и близкие к рассматриваемой ниже имитационной модели задачи [12] связаны с прохождением пучков элементарных частиц через вещества (преграды). Как будет показано ниже, при разработке представленной модели пришлось решать еще более сложную задачу: имитация состояния частиц шихты и их ансамблей не только в пространстве, но и во времени, при непрерывно изменяющемся физическом и химическом составе, а также учет возможности изменения внутреннего состояния частицы (продукта реакции) после каждого акта встречи. В связи с этим, несмотря на то, что имеется достаточно большое число алгоритмов и даже языков программирования таких задач [14, 15], пришлось разработать специализированный алгоритм и программу.

Ядром рассматриваемой ниже модели является процесс обтекания конденсированной частицы вертикальным потоком газа.

Прежде всего, рассмотрим механизм витания и взаимодействия дисперсных частиц шихты и продуктов реакции в вертикальном потоке несущего газа.

На рисунке 1 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 [16]:

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

где ω_{ms} – скорость движения сферической частицы.

Сила тяжести выражается как:

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

Сила давления потока:

$$F_c = c \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{2} \quad (3)$$

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, коэффициент $c = 0,44$.

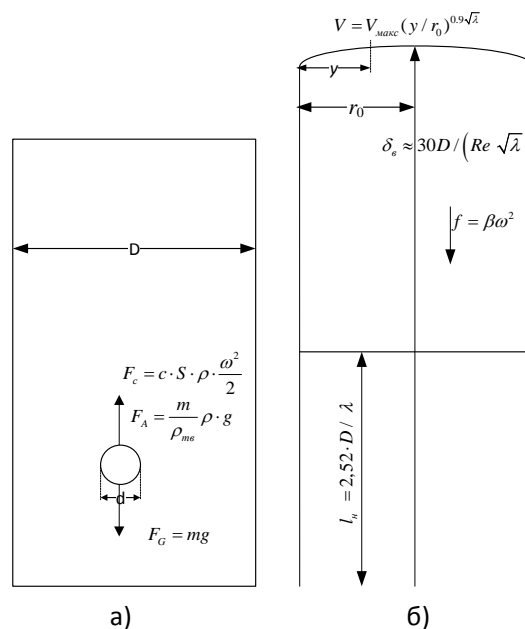


Рисунок 1 – Силы, действующие на частицу в гравитационном сепараторе а), эпюра скоростей для турбулентного течения б)

Подъёмная или архимедова сила:

$$F_A = \frac{m}{\rho_{ms}} \rho \cdot g \quad (4)$$

Из уравнений (1) – (4) получим:

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

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

$$\omega = \frac{m_1 \bar{\omega}_1 + m_2 \bar{\omega}_2}{m_1 + m_2} \quad (6)$$

Для упругих ударов из закона сохранения импульса и энергии получим:

$$\omega_1 = \bar{\omega}_1 \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{2m_2}{(m_1 + m_2)} \quad (7)$$

$$\omega_2 = \bar{\omega}_1 \frac{2m_1}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)}$$

На рисунке 2 представлен фрагмент работы созданной имитационной модели [17], а также графическое представление результатов моделирования.

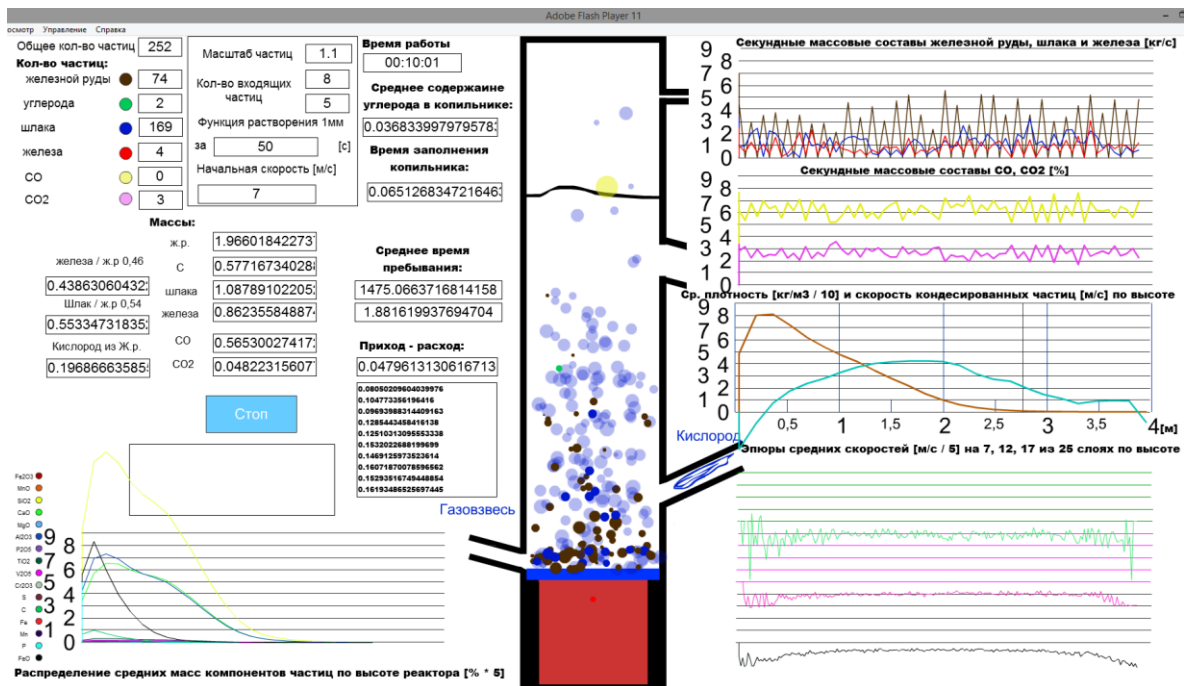


Рисунок 2 – Фрагмент реализации имитационной модели гравитационного сепаратора

Алгоритм, разработанный для реализации этой модели [18], имеет развитую систему графического представления информации и интерактивный интерфейс, что позволяет проводить большой объем статистических исследований, добываясь приближения к генеральной совокупности. Наряду с отображением результатов движения и взаимодействия частиц, выводится 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 изучения влияния количества подаваемых частиц железной руды, углерода и других параметров на состав металла, шлака и газа.

Тестирование показало работоспособность данного алгоритма и удовлетворительное совпадение конечных результатов имитационного моделирования с законом сохранения вещества. Созданная имитационная модель, являющаяся своеобразной «виртуальной реальностью», то есть, в определенной степени, заместителем объекта, позволяет наглядно изучать механизм процессов в гравитационном сепараторе при разном гранулометрическом составе, оценивать среднее время пребывания частиц, определять средний расход частиц железа и шлака, при различном заданном количестве частиц углерода и др.

Разделение составляющих пыли из газоочистки марганцевого производства

После успешного решения задачи создания описанной выше модели была поставлена задача оценки возможности разделения составляющих мелкодисперсной пыли Новокузнецкого марганцевого завода.

Гранулометрический состав пыли распределен по нормальному закону в очень узком диапазоне 1 – 4 микрона, что пока не позволило найти приемлемый способ разделения входящих в ее состав очень ценных составляющих. В настоящее время известно большое количество разного рода конструкций пневматических и других сепараторов, их подробный сравнительный анализ заслуживает отдельного рассмотрения. Эти сепараторы позволяют получать удовлетворительные результаты, как правило, при условии достаточно значительных различий в плотностях и размерах частиц.

В данном исследовании в качестве исходного рассматривается вариант вертикального гравитационного сепаратора высотой 4м и диаметром 1м с использованием для разделения механизмов, протекающих в кипящем слое и надслоевом пространстве. Для решения этой задачи был использован рассмотренный выше подход и несколько модифицированный алгоритм, который позволяет имитировать витание большого числа частиц в потоке несущего газа, в том числе с учетом столкновений частиц и обмена векторными значениями импульсов. Проведенные с помощью разработанного исследовательского интерфейса многовариантные статистические эксперименты на имитационной модели вертикального гравитационного сепаратора, позволили получить оптимизированные параметры и результаты разделения компонентов, представленные в таблице 1.

Как видно из таблицы, на нижнем выходе сепаратора получен продукт с суммарным содержанием MnO, ZnO, PbO равным 94%, который может быть использован в качестве сырья для свинцово-цинкового производства, а на верхнем выходе – продукт с содержанием $K_2O=62\%$ и $Na_2O=13\%$, по существу, ценное калийное удобрение.

Кроме представленных выше результатов, с помощью разработанной методики определены также основные режимные параметры: начальная

скорость двухфазного потока, его плотность, распределение скорости и плотности по высоте и др.

Таблица 1. Результаты разделения компонентов смеси, полученные за 5 минут эксперимента при начальной скорости 0,34 м/с

Наименование компонентов	Исходный состав компонентов	Состав компонентов после разделения		Состав в % от продуктов	
		Нижний выход	Верхний выход	Нижний выход	Верхний выход
SiO ₂	5,08	1,02	4,07	1,66	10,51
MnO	11,58	10,92	0,95	17,81	2,45
Na ₂ O	5,08	0,17	4,92	0,27	12,71
K ₂ O	25,40	1,29	24,14	2,10	62,39
ZnO	30,48	29,33	1,19	47,83	3,07
PbO	17,78	17,53	0,14	28,59	0,36
Остальные	4,33	1,05	3,29	1,71	8,50
Итого	100	61,31	38,69	100	100

Выводы

1. Рассмотрена имитационная модель диссипативного гравитационного сепаратора для колонного реактора агрегата СЭР, позволяющая оценивать в динамике разделенные потоки металла, шлака и газа, что дает возможность замкнуть цикл расчетов круговорота веществ в агрегате. Создан алгоритм и программная реализация разработанной методики.

2. На основе подобной методики создана имитационная модель вертикального гравитационного сепаратора для разделения компонентов пылевидных материалов, в экспериментах на которой показана возможность разделения мелкодисперсной пыли из газоочистки марганцевого производства на два ценных ликвидных продукта.

3. Моделирование процессов позволяет из множества рассмотренных вариантов выбрать те, которые позволяют минимизировать затраты и выбрать оптимальные параметры гравитационных сепараторов, что в дальнейшем скажется на эффективности разделения продуктов.

Список литературы

1. Мязин В.П. Геосистемный подход к классификации обогатительных фабрик и перерабатывающих комплексов. Вестник Забайкальского государственного университета. – 2012. – № 4. – С. 14-20.

2. Санникова Н.М. ОАО «СДС-Уголь»: Переработке угля – особое внимание / Уголь. – 2013. – № 2 (1043). – С. 4-7.

3. Николаева Н.В. Компьютерные технологии в исследования процессов на обогатительных фабриках / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 8. – С. 347-348.
4. Цымбал В.П. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и [др.]. – М: «Металлургиздат», 2014. – 488 с.
5. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: Пер. с англ./ Общ. ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича и Ю.В.Сачкова. – 4-е изд., стер. – М.: УРСС, 2003. – 310с.
6. Сеченов П.А. Модели диссипативных структур струйно-эмульсионного металлургического реактора / Металлургия: технологии, инновации, качество. – Новокузнецк: СибГИУ: 2015. – С. 164-168.
7. Tsymbal V.P., Mochalov S. P., Shakirov K. M. Controlling the Composition of the Metal in the Direct Reduction of Dust-Sized Materials and Waste Products in a Jet-Emulsion Reactor. Springer Journals, 2015, Vol. 59, pp 119-125: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11015-015-0070-0>.
8. Ore enrichment required for a self-organizing Jet-EmulsionReactor / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, M.S. Parovinchak и др. // SteelinTranslation. – 2009. – Vol. 39 No 4. – 310-312 с.
9. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method, – J. Amer. statistical assoc. 1949 Vol 44 № 247. 335 – 341 pp.
10. Kroese, D.P.; Brereton T.; Taimre T.; Botev Z. I. Why the Monte Carlo method is so important today. WIREs Comput Stat 6, 2014. – 386 – 392 pp.
11. Dunn W.L., Shultis J.K. Exploring Monte Carlo Methods. Elsevier, 2011. – 398 p.
12. Маликов Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 [Текст]: учеб. Пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. – 296с.
13. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. Wiley, 2011. – 743 p.
14. ActionScript 3.0 Reference for the Adobe Flash Platform URL: http://help.adobe.com/en_US/FlashPlatform/reference/actionscript/3/index.html.
15. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
16. Лавренко А.Т. Автореферат диссертации магистра: «Анализ работы сепаратора прямого коксового газа». [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua>.
17. Сеченов П.А. Имитационная модель разделения составляющих пыли марганцевого производства / П.А. Сеченов, В.П. Цымбал, А.А. Оленников // Кибернетика и программирование. – 2016. – № 2. – С. 34-41.
18. Сеченов П.А. Алгоритм и программная реализация имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-

эмульсионного реактора // Программные продукты и системы. – 2015. – № 3 (111). – С. 214-219.