

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА КОЛОННОГО СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО РЕАКТОРА

*П.А. Сеченов, аспирант, pavesa89@mail.ru
(Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654007, Россия)*

В статье рассматривается технология создания имитационной модели процессов физического и химического взаимодействия дисперсных частиц шихты и продуктов реакций, витающих в потоке несущего высокотемпературного газа, выбранная на основе сравнения базовых концепций и готовых инструментальных решений имитационного моделирования (Vensim, GPSS, Simula, AnyLogic, MATLAB и др.) с объектно-ориентированными языками программирования (Delphi, Visual Basic, Visual C# и ActionScript 3.0). Для реализации поставленной задачи использован объектно-ориентированный язык программирования ActionScript 3.0. Отображены структура и алгоритм программной реализации имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного реактора: показан обмен данными между основным модулем и классами программы (конденсированных частиц, газовых частиц, класса расчетов, класса отображения графиков и класса для отображения времени). Обмен данными между дополнительными классами не осуществляется, следовательно, если необходима модификация одного класса, меняется сам класс и, если изменились параметры создания экземпляра класса, место вызова данного класса из основного модуля. Для каждого класса показаны основные возможности, предназначение, входные и выходные параметры, функции. Более подробно рассмотрены основные функции главного модуля, которые включают взаимодействие и вызов процедур и функции как внутри основного модуля (упругое и неупругое столкновение двух частиц), так и с функциями и процедурами выделенных классов (создание и удаление частиц из классов конденсированных и газовых частиц, проверка пересечения частиц в классе расчетов). Представлена получившаяся имитационная модель гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного реактора с описанием следующих возможностей: ввод параметров, наблюдение движения частиц в гравитационном сепараторе и отображение статистических данных и графиков в реальном времени, проведение исследований на модели (влияние начальных параметров: количество и соотношение подаваемых частиц руды и углерода, масштаб и скорость растворения частицы, начальная скорость потока газовой смеси), подбор оптимальных параметров.

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

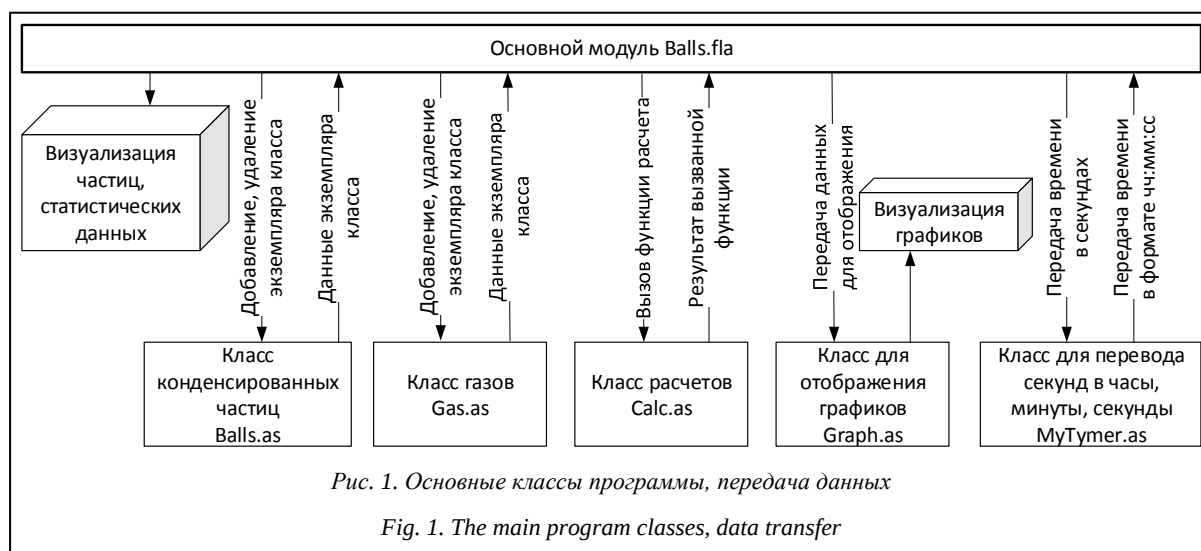
Целями данной работы являются выбор технологии разработки, описание алгоритмов и создание имитационной модели гравитационного сепаратора колонного *струйно-эмульсионного реактора* (СЭР) на основе физической постановки задачи, представленной в работе [1]. В статье сформулирована задача создания имитационной модели процессов физического и химического взаимодействия дисперсных частиц шихты и продуктов реакций, витающих в потоке несущего высокотемпературного газа. Основное внимание при этом уделяется взаимодействию сил, действующих на частицу; генерированию крупности частиц по нормальному закону распределения в заданном диапазоне; отражению скорости потока газа по высоте реактора при турбулентном движении; случайным скоростям, действующим на частицу по высоте реактора; скорости и массе двух частиц при упругом и неупругом соударении; схемам взаимодействия частиц железной руды, шлака, металла, углерода, газов; расчетам плотности газа и смеси по высоте реактора; определению массовых приходов и расходов частиц железной руды, шлака и металла. Как видим, рассматривается задача, не имеющая детерминированного решения. Одним из возможных путей ее решения является

имитационное моделирование с использованием подхода, аналогичного методу «первых принципов», в сочетании со стохастическим моделированием. Однако сложность задачи усугубляется необходимостью одновременного отражения процессов взаимодействия огромного числа элементов (частиц), в которых в это же время протекают непрерывные физические и химические процессы. Это накладывает определенный отпечаток на разработку технологии создания имитационной модели перечисленных процессов.

Рассмотрим базовые концепции и инструментальные решения имитационного моделирования:

- системная динамика (Vensim, iThink, Powersim, AnyLogic);
- дискретные системы – системы, основанные на описании процессов (GPSS, Simula, Arena, AutoMod, AnyLogic и др.);
- агентное моделирование (AnyLogic);
- динамические системы (MATLAB).

В каждом из этих направлений [2, 3] развиваются свои инструментальные средства, упрощающие разработку моделей и их анализ. В свою очередь, в каждой из описанных сред требуется знать инструментальную среду и язык программирования среды (например язык Java в среде AnyLogic).



С учетом сложности поставленной задачи разрабатываемая имитационная модель должна удовлетворять ряду требований: одновременное отражение динамики механического перемещения в пространстве и взаимодействия огромного числа частиц, в которых в то же время изменяются тепловое, химическое и фазовое состояния, реализация стохастического характера протекающих процессов, физическая адекватность и наглядность анимации, удобный для пользователя (исследователя) интерфейс статистических исследований и анализа. Если к тому же учесть целесообразность избавления пользователя от необходимости знать инструментальную среду и язык программирования среды, то приоритетным подходом для решения поставленной задачи является создание специализированной системы имитационного моделирования, ориентированной на определенный класс задач.

Было принято решение написать программу на объектно-ориентированном языке программирования, наиболее отвечающем этим требованиям. Рассматривались языки программирования Delphi, VisualBasic, Visual C# и ActionScript 3.0 [4–8]. В связи с тем, что разрабатываемая модель должна быть визуализирована и анимирована (движение, взаимодействие частиц в гравитационном сепараторе в реальном времени), был выбран объектно-ориентированный язык программирования ActionScript 3.0 [7, 8], 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 демонстрационной обучающей модели для системы дистанционного обучения).

Реализованная программа состоит из основного модуля и 5 классов (рис. 1). Как видно из рисунка, отображение частиц и статистических дан-

ных вызывается в основном модуле, а отображение графиков происходит в соответствующем классе. Передача данных осуществляется между основным модулем и классами (например, вызов функции класса расчета и возвращение результата из соответствующего класса), передача данных между классами не выполняется.

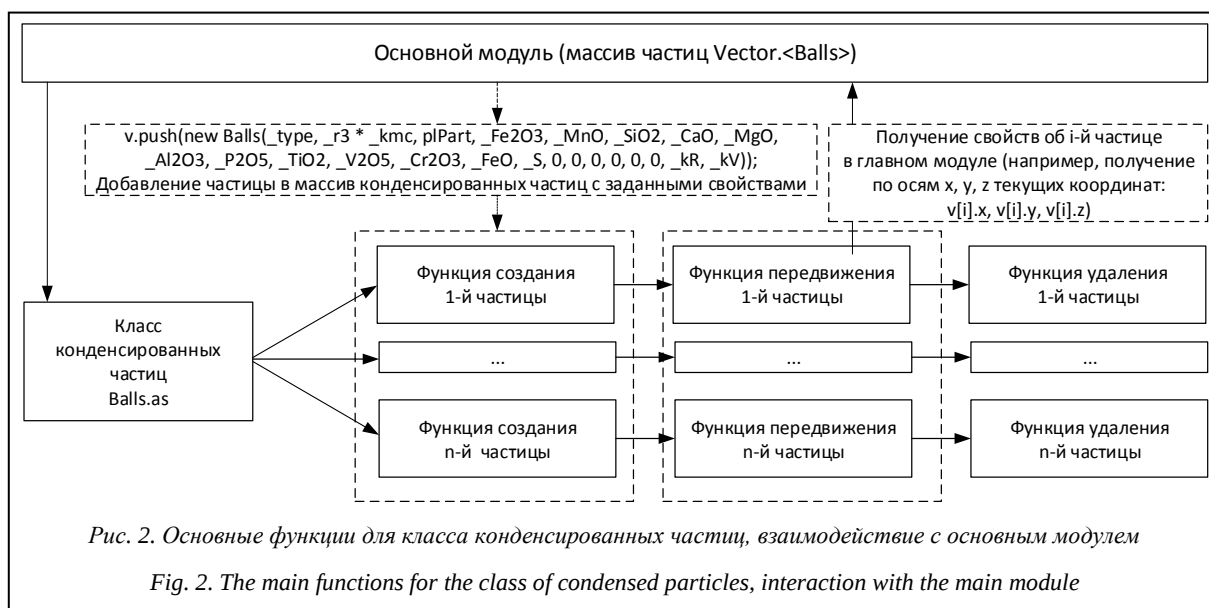
Рассмотрим каждый из классов подробнее. На рисунке 2 представлены основные функции для класса конденсированных частиц.

Функция создания частицы включает следующие параметры: идентификатор частицы, радиус частицы, коэффициент увеличения радиуса, коэффициент скорости, плотность и массовые проценты возможных веществ конденсированных частиц (Fe_2O_3 , MnO , SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , FeO , S , Fe , C , Mn).

Данная функция вызывается основным модулем, после чего вызывается функция передвижения частицы.

Функция передвижения частицы в зависимости от типа включает следующее: расчет плавления для железной руды в соответствии с данными, полученными ранее [9], сжигания угля; движение по спирали (радиус колебаний меняется случайно на каждом шаге), средний радиус зависит от положения частицы по высоте реактора (в нижних слоях реактора радиус движения по окружности больше) [10]; определение скорости частицы в реакторе с учетом сил, действующих на частицу, и скоростей потока, рассмотренных в предыдущей статье; проверка того, что частица не вылетела за границы реактора (если частица долетела до уровня шлакового канала, скорость частицы увеличивается пропорционально отношению внутренних площадей колонного реактора и площади шлакового канала).

Функция удаления частицы вызывается из основного модуля, например, при вылете частицы в шлаковое отверстие или при полном расплавлении частицы железной руды.



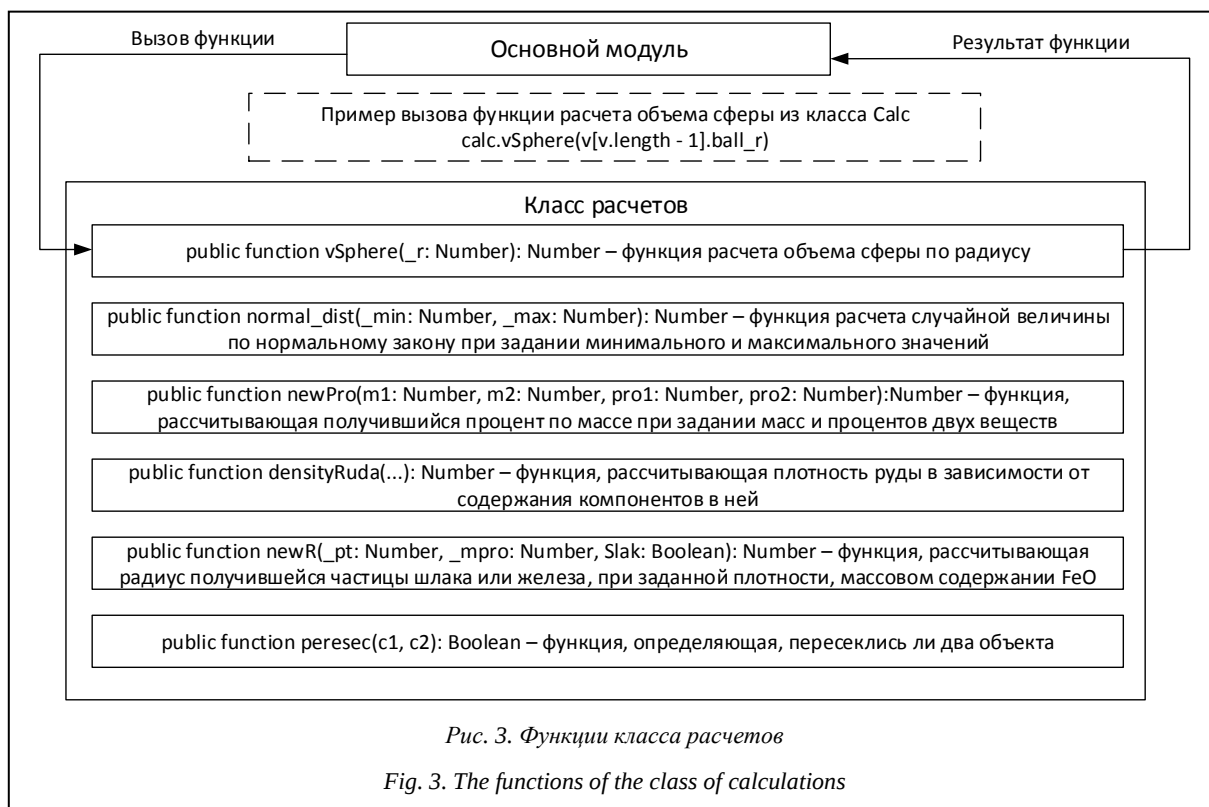
Класс газов содержит те же основные функции, что и класс конденсированных частиц (создание частицы, передвижение и удаление). Функция создания газовой частицы включает идентификатор, радиус частицы и логическую переменную, которая указывает, зародился ли пузырек газа на границе шлак–металл или нет.

Функция передвижения газовой частицы учитывает эпюру скоростей (в центре потока скорость выше), место возникновения газовой частицы (на границе шлак–металл или в газовой среде). Частицы газа движутся со скоростью потока по высоте

канала, совершают колебательные движения по осям x и z.

Класс расчетов содержит в себе часто используемые функции для решения поставленной задачи, которые могут быть использованы и в других программах. На рисунке 3 показаны основные функции расчета, а также пример вызова функции расчета объема из основного модуля для последнего в массиве экземпляра конденсированных частиц.

Класс для отображения графиков позволяет строить графики по входным данным (рис. 4).



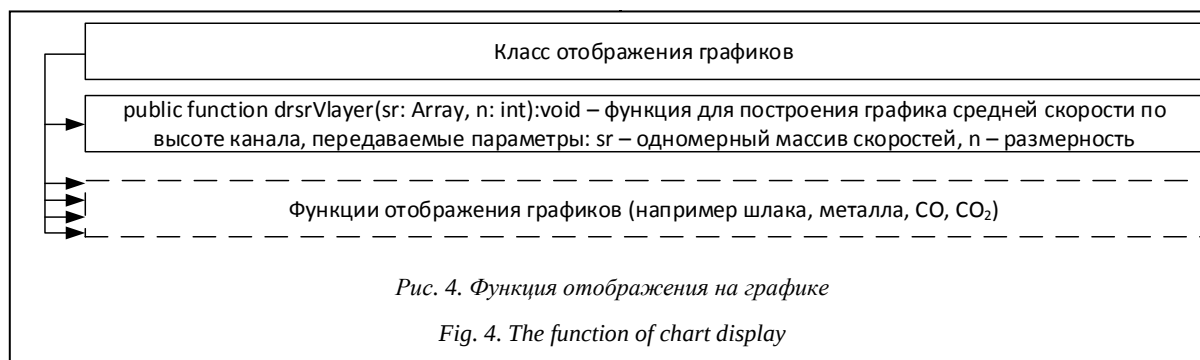
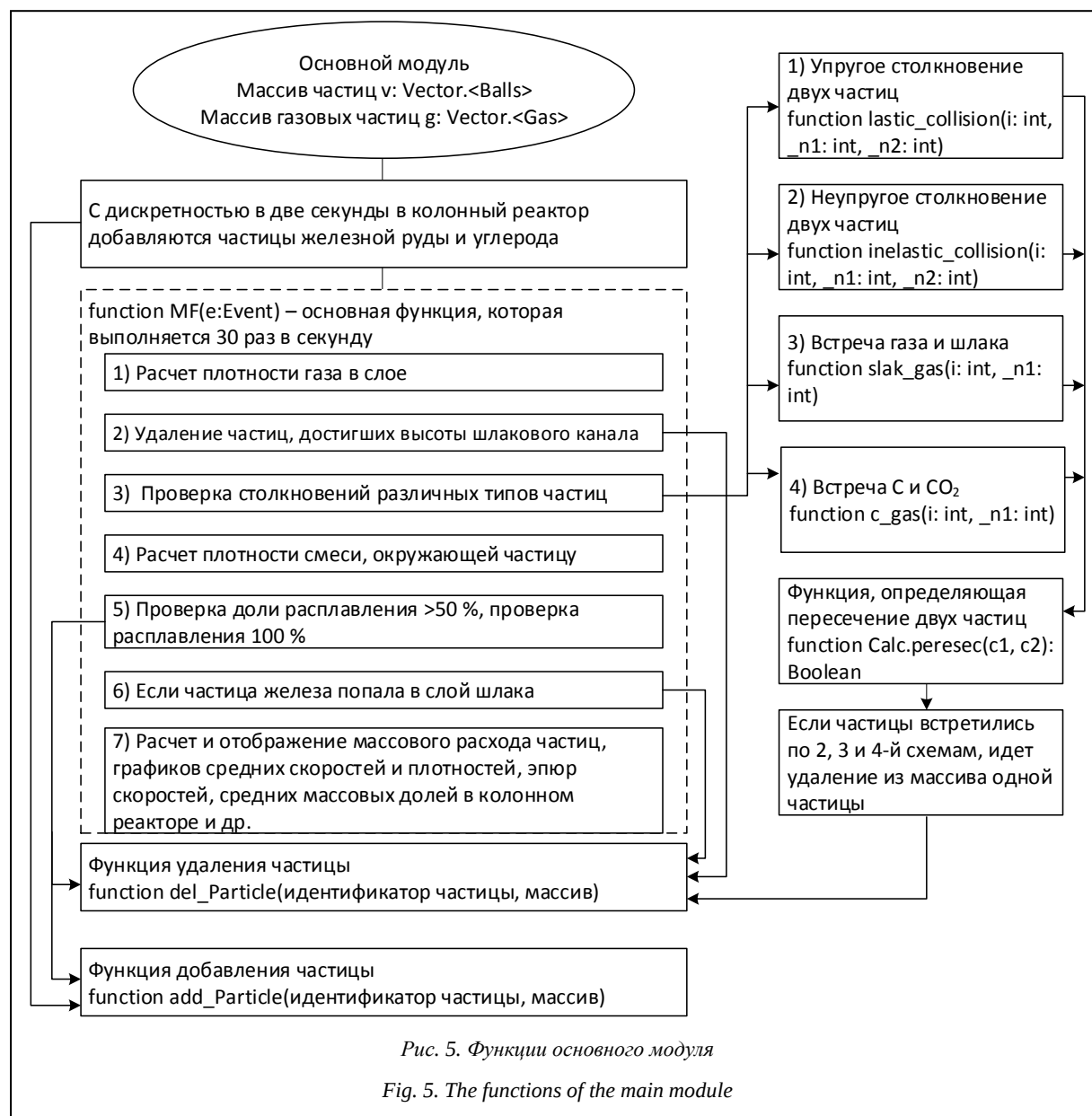


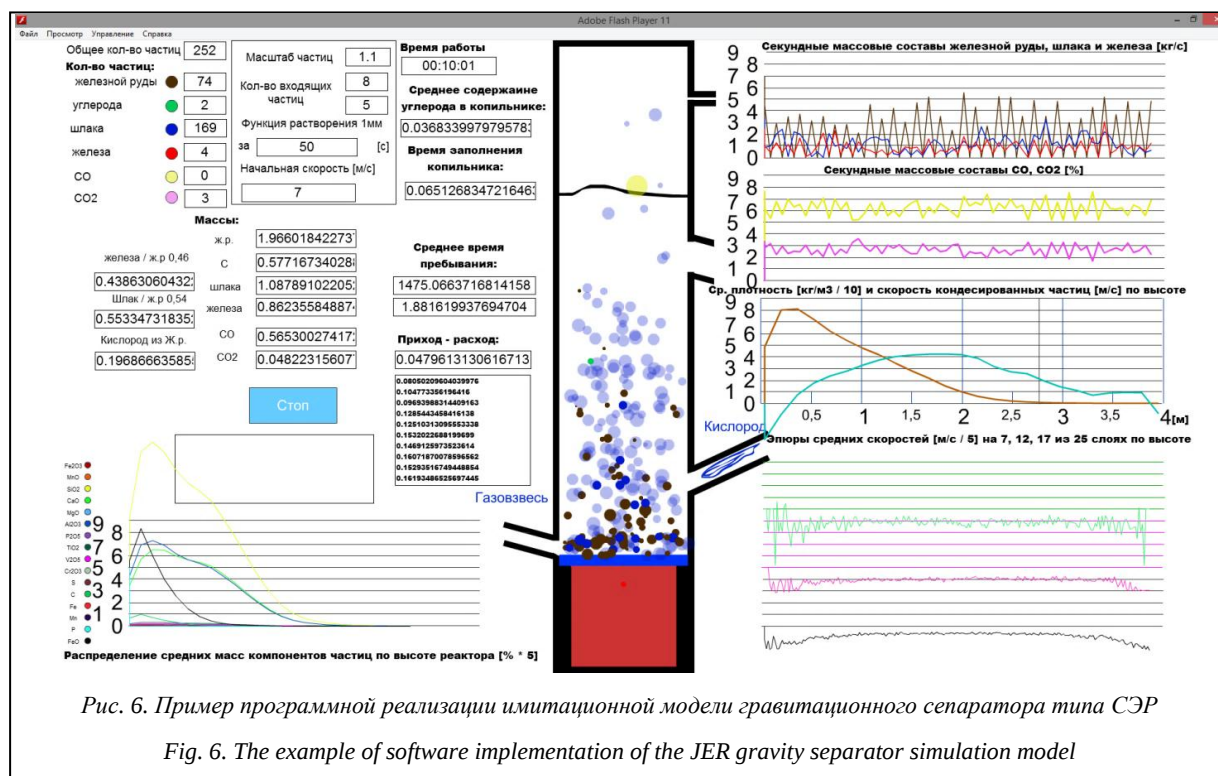
Схема функций основного модуля показана на рисунке 5.

Рассмотрим различные варианты взаимодействия между частицами основного модуля.

Функция упругого столкновения конденсированных частиц сначала проверяет на пересечение

i -ю частицу с частицами, начинающимися с позиции $i+1$ и до конца массива частиц. Если есть пересечение между частицами, то по плотностям и радиусам частиц находят их массы, после чего в соответствии с законом сохранения импульса находят новые векторы скоростей частиц.





Функция неупругого столкновения конденсированных частиц в случае пересечения находит радиус, плотность, состав и вектор скорости образовавшейся частицы, при этом одна частица меняет свой радиус и плотность, а вторая удаляется из массива частиц.

Функция встречи шлака с газом рассматривает ситуацию, когда шлак «наматывается» на газ [10], при этом рассчитываются плотность и радиус образовавшейся частицы, одна частица меняет свойства, другая удаляется.

Функция встречи C с CO_2 в случае нахождения пересечения удаляет две текущие частицы и создает новую частицу газа CO в соответствии с количеством вещества исходных частиц.

Отметим, что наиболее медленная часть программы – функция проверки пересечения двух частиц. Сложность данной функции, а следовательно, и программы $O(N^2)$, где O – функция скорости алгоритма от N – количества обрабатываемых частиц.

На рисунке 6 представлены фрагмент работы созданной имитационной модели и результаты моделирования.

Наряду с дифференциацией результатов движения и взаимодействия частиц в программе выводится следующая информация: общее количество частиц в реакторе, количество частиц железной руды, углерода, шлака, железа, CO , CO_2 ; средняя масса железной руды, шлака и железа за минуту; графики массового содержания соответствующих частиц; график распределения средних масс компонентов частиц в реакторе, среднее время пребы-

вания частиц шлака и железа, соотношение приход-расход масс в реакторе. Также предусмотрена возможность изменения количества подаваемых частиц железной руды и углерода, размера подаваемых частиц, начальной скорости потока в реакторе, скорости растворения частицы.

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

Полученная модель в определенной степени является заместителем объекта, в частности, на ней можно изучать время пребывания частиц в реакторе, распределение плотностей по высоте канала, влияние на процесс гранулометрического состава подаваемой шихты и другие задачи.

Литература

1. Сеченов П.А., Цымбал В.П. Постановка задачи создания имитационной модели гравитационного сепаратора в колонном реакторе агрегата СЭР // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. С. 114–119.
2. Лычкина Н.Н. Современные технологии имитационного моделирования и их применение в информационных бизнес-системах и системах поддержки принятия решений // Имитационное моделирование. Теория и практика ИММОД-2005: сб. докл. II Всерос. науч.-практич. конф. СПб: Изд-во ЦНИИТС, 2005. Т. 1. С. 25–31.
3. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб: БХВ-Петербург, 2009. 400 с.
4. Кожмяченко В.И., Климов В.Ю. Программирование в среде Delphi. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2011. 47 с.
5. Кожмяченко В.И., Красноперов С.Ю. Программирование в среде Visual C#. В 2-х ч. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. 85 с.

6. Справочник по Visual Basic. URL: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/25kad608.aspx> (дата обращения: 16.05.2015).
7. Справочник по ActionScript 3.0 для платформы AdobeFlash. URL: http://help.adobe.com/ru_RU/FlashPlatform/reference/actionscript/3/ (дата обращения: 16.05.2015).
8. Изучение ActionScript 3.0. URL: http://help.adobe.com/ru_RU/as3/learn/as3_learning.pdf (дата обращения: 16.05.2015).
9. Сеченов П.А., Оленников А.А., Цымбал В.П. Исследо-

вание динамики изменения состава шлака в зонной модели колонного струйно-эмульсионного реактора // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее. В 2 ч. Ч. 2: Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Екатеринбург: Изд-во УрФУ. 2014. С. 105–110.

10. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Рыбенко И.А. и др. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор. М.: Металлургиздат, 2014. 488 с.

DOI: 10.15827/0236-235X.111.214-219

Received 05.06.15

THE ALGORITHM AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE SIMULATION MODEL OF THE COLUMN JET-EMULSION REACTOR GRAVITY SEPARATOR

Sechenov P.A., Postgraduate Student, paves89@mail.ru

(Siberian State Industrial University, Kirov St. 42, Novokuznechsk, 654007, Russian Federation)

Abstract. The article shows a development technology to create a simulation model of physical and chemical interaction of dispersed particles of the charge and reaction products floating in the stream of carrier high temperature gas. This technology is based on the comparison of basic concepts and finished tooling simulation solutions (Vensim, GPSS, Simula, AnyLogic, MATLAB, etc.) with object oriented programming languages (Delphi, Visual Basic, Visual C#, and ActionScript 3.0). In order to accomplish the task, an object-oriented programming language ActionScript 3.0 was used. The paper shows the structure and the algorithm of the simulation model software implementation for a column jet-emulsion reactor (JER) gravity separator: it shows the data exchange between the main module and program classes (condensed particles class, gas particles class, class of calculations, a schedules display class and a time display class). Data exchange between additional classes is not performed. Therefore, if there is a need to modify one class, then the class itself changes, and if the instantiating class parameters changed, then this class callsite from the main module also changes. For each class the paper shows the main features, purpose, input and output parameters, functions. The main module functions are considered in more detail. They include the interaction and invocation of procedures and functions inside the main module (elastic and inelastic collision of two particles), as well as with the functions and procedures of selected classes (creating and deleting particles from the classes of condensed matter and gas particles, checking the intersection of particles in the class of calculations). The authors present the resulting simulation model of the column JER gravity separator with description of the following possibilities: input parameters, observation of the particle motion in the gravity separator and display of statistical data and graphs in real time, research on the model (the influence of the initial parameters: the number and ratio of supplied particles of ore and carbon, the extent and rate of particles dissolution, the initial velocity of a gas suspension flow) and optimal parameters selection.

Keywords: simulation model, gravity separator, jet-emulsion reactor, particles interacting ones, algorithm, software implementation.

References

1. Sechenov P.A., Tsymbal V.P. Setting up a problem of creating a simulation model of a gravitational separator in a column reactor of jet-emulsion reactor. *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve* [Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production]. UrFU Publ., Ekaterinburg, 2015, pp. 114–119 (in Russ.).
2. Lychkina N.N. Modern technologies of simulation modeling and their application in information business systems and decision-making systems. *Sbornik dokladov II Vseross. nauch.-praktich. konf. "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika" (IMMOD-2005)* [Simulation. Theory and Practice: Proc. of the 2nd All-Russian Scientific-Practical Conf. IMMOD 2005]. St. Petersburg, TsNIITS Publ., 2005, vol. 1, pp. 25–31 (in Russ.).
3. Karpov Yu.G. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5* [Simulation systems. Introduction to Modeling with AnyLogic 5]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2009, 400 p.
4. Kozhemyachenko V.I., Klimov V.Yu. *Programmirovaniye v srede Delphi* [Programming in Delphi]. Novokuznetsk Univ. SibSIU Publ., 2011, 47 p.
5. Kozhemyachenko V.I., Krasnoperov S.Yu. *Programmirovaniye v srede Visual C#* [Programming in Visual C#]. In 2 parts. Novokuznetsk Univ. SibSIU Publ., 2012, 85 p.
6. *Spravochnik po Visual Basic* [Visual Basic Reference]. Available at: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/25kad608.aspx> (accessed May 16, 2015).
7. *Spravochnik po ActionScript 3.0 dlya platformy AdobeFlash* [ActionScript 3.0 Reference for AdobeFlash Platform]. Available at: http://help.adobe.com/ru_RU/FlashPlatform/reference/actionscript/3/ (accessed May 15, 2015).
8. *Izucheniye ActionScript 3.0* [Learning ActionScript 3.0]. Available at: http://help.adobe.com/ru_RU/as3/learn/as3_learning.pdf (accessed May 15, 2015).
9. Sechenov P.A., Olennikov A.A., Tsymbal V.P. *Tvorcheskoe nasledie V.E. Grum-Grzhimaylo: istoriya, sovremennoe sostoyaniye, budushchee. V 2 ch. Chast 2. Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve* [The Artistic Heritage of V.E. Groom-Grzhimailo: History, Current Status and Future. In 2 parts. Part 2: Heat engineering and Computer Science in Education, Science and Production]. Ekaterinburg, Ural Federal Univ. Publ., 2014, pp. 105–110 (in Russ.).
10. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Rybenko I.A. *Protsess SER – metallurgicheskyy struyno-emulsiyonnyy reaktor* [JER process – metallurgical jet emulsion reactor]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2014, 488 p.