

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пятковский О. И.* Интеллектуальные компоненты автоматизированных информационных систем управления предприятием. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. 351 с.
2. *Adam Freeman, Matthew MacDonald, Mario Szpuszta.* Pro ASP.NET 4.5 in C#. APress, 2013. 1187 с.
3. *John Adams.* Learning Kendo UI Web Development. Packt Publishing, 2013. 274 с.
4. *Вайсфельд Мэтт.* Объектно-ориентированное мышление. СПб.: Питер, 2014. 304 с.



УДК 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ГОРНОМ ДЕЛЕ, ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И НАНОИНДУСТРИИ

Канд. физ.-мат. наук *Орлова Н. С.*^{1,2,3},
*Хостелиди В. Н.*²,
студ. *Качалкина Я. Н.*²,
студ. *Плиева А. Р.*³

¹ Южный математический институт Владикавказского научного центра
РАН и Правительства РСО-А;

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный
технологический университет);

³ Финансовый университет при Правительстве РФ,
г. Владикавказ, РСО-Алания, Россия

Приводятся примеры использования методов математического и компьютерного моделирования в решении инженерных задач. В частности, представлены задача моделирования процесса виброкипения адсорбента в аппарате для очистки технологических выбросов металлургических производств; задача моделирования теплообмена в барабанном агрегате горячего окомкования, который используется в горном деле и цветной металлургии; а также задача моделирования виброкипящего слоя наночастиц в технических аппаратах каталитического синтеза порошковых наноструктур.

Ключевые слова: математическое моделирование, компьютерное моделирование, виброкипящий слой, адсорбент, агрегат горячего окомкования, порошковые наноструктуры.

В целях экономии времени и средств, затрачиваемых на проведение натуральных экспериментов при решении инженерных задач, коллективы ученых и специалистов очень часто прибегают к методам математического и компьютерного моделирования. В настоящей работе в качестве таких примеров представлены результаты моделирования основных физических процессов, протекающих в технологических аппаратах. Результаты теоретического и экспериментального исследований позволили определить рекомендуемые параметры конструкции аппаратов, а также режимы их работы.

1. Моделирование динамики виброкипящего слоя в аппарате для очистки газов. Вредные технологические выбросы металлургических производств частично могут быть утилизированы, а частично должны поглощаться адсорбентами для того, чтобы не допустить их выброса в атмосферу. Одним из наиболее эффективных и экономичных методов поглощения является виброкипение адсорбента и пропускание через него вредных газообразных выбросов [1]. В Северо-Кавказском горно-металлургическом институте (государственном технологическом университете) разработан способ очистки газов с помощью виброкипящего слоя, на который получен патент РФ [2]. Технический результат заключается в увеличении времени контакта газа с адсорбентом и возможности очистки газа от различных компонентов в одном аппарате (адсорбере). Он достигается тем, что в заявляемом способе очистки газа, включающем пропускание газа через слой адсорбента, расположенного в объеме адсорбера, адсорбент используют в виде виброкипящего слоя, а подачу газа осуществляют перпендикулярно к направлению движения частиц адсорбента, причем адсорбент располагают на полках адсорбера горизонтально или наклонно. Конструкция адсорбера, имеющего многополочную структуру представлена на рис. 1.

Скорость газа между полками составляет 1–2 м/с, поэтому время контакта адсорбента с газом – 10–20 с. Этого времени достаточно, чтобы газ полностью очистился от вредного компонента. Степень очистки составляет около 100 %.

Для определения оптимальных (с точки зрения обеспечения наибольшей поверхности контакта газа с частицами адсорбента) значений параметров и режимов работы аппарата с виброкипя-

шим слоем адсорбента необходимо теоретическое исследование процесса виброкипения, которое должно осуществляться с помощью математического моделирования.

Под описание движения виброкипящего слоя между двумя полками были доработаны двухжидкостная модель на основе закона Дарси и гидродинамическая модель гранулярного газа [3]. Подробное описание условий вычислений представлено в работе [3]. В результате исследования динамики виброкипящего слоя между двумя полками с использованием двух различных моделей выявлено влияние основных параметров аппарата таких, как толщина слоя засыпки материала, расстояние между полками, амплитуда и частота колебаний полок, на распределение объемной доли частиц в слое. Как и ожидалось, с увеличением амплитуды и частоты колебаний полок слой частиц более равномерно распределяется в пространстве между полками, и соответственно растет площадь контакта фаз (газовой и твердой). В зависимости от толщины слоя засыпки материала и расстояния между двумя полками слой частиц в процессе виброкипения также может находиться в различных состояниях (в достаточно плотном состоянии или в разрыхленном). Чем тоньше слой (меньше отношение толщины слоя засыпки к характерному размеру частиц) и больше расстояние между полками, тем более разрыхленное состояние достигается в процессе виброкипения. При этом слишком тонкие слои не обеспечивают достаточной площади поверхности твердой фазы для контакта с газовой фазой (ввиду малого объема используемого материала), а слишком большие значения расстояния между полками могут приводить к тому, что частицы в процессе виброкипения не достигают верхней полки и степень расширения слоя даже немного уменьшается.

Для квадратных полок с размерами $1,8 \text{ м} \times 1,8 \text{ м}$ (с учетом средней скорости газа 1 м/с , расстояния между полками 140 мм и времени контакта фаз 10 с) достаточно наличие 5–6 полок в адсорбере. С учетом вышеизложенного была рассчитана примерная производительность адсорбера. Получено, что общий объемный расход газа равен приблизительно $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$; а массовый расход – приблизительно 1200 кг/ч . Следует отметить, что эти результаты получены для адсорбера с пятью полками, на которых расположены частицы адсорбента, средний диаметр которых равен 1 мм .

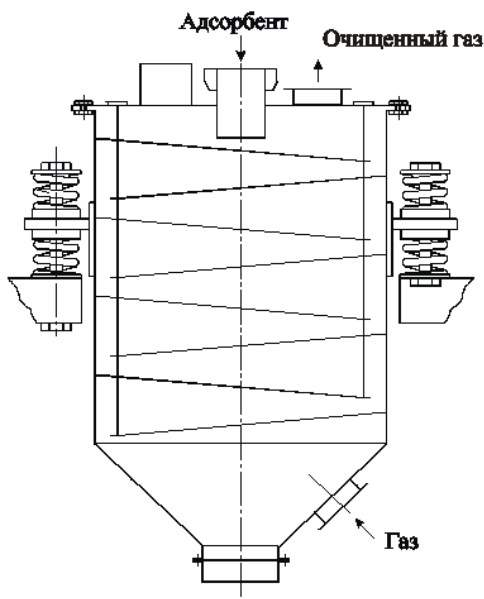


Рис. 1. Адсорбер с наклонными полками.

Если использовать адсорбер для очистки от каких-либо конкретных химических соединений (например, от оксидов азота или хлоридов) с меньшим значением времени контакта фаз, то можно сократить число полок, что приведет к более высоким значениям расхода газа, то есть к более высокой производительности аппарата ввиду увеличения скорости газа. Использование более крупных частиц адсорбента, диаметром 1,5 мм, также может способствовать увеличению производительности адсорбера. При этом использование частиц с размерами больше 1,5 мм нежелательно, так как с увеличением среднего диаметра частиц происходит уменьшение общей площади поверхности адсорбента в вибрирующем слое.

Таким образом, с использованием математического и компьютерного моделирования были определены следующие рекомендуемые значения параметров конструкции адсорбера, а также режимов его работы [4]:

- размер частиц адсорбента 1–1,5 мм;
- толщина слоя засыпки адсорбента 50–80 мм;
- расстояние между двумя полками в адсорбере 100–160 мм;
- количество полок в адсорбере 5–6 (размер полки 1,8 м × 1,8 м);
- амплитуда колебаний полок 3–6 мм;
- частота колебаний полок 20–50 Гц.

2. Моделирование теплообмена в барабанном агрегате горячего окомкования. С использованием методов математического и компьютерного моделирования были определены рекомендуемые параметры конструкции барабанного агрегата горячего окомкования [5], который предназначен для совмещения процессов окомкования и обжига окатышей. По сравнению с отдельными процессами окомкования и последующего обжига совмещенный процесс в одном агрегате имеет следующие преимущества: сокращение числа агрегатов и повышение качества окатышей за счет отсутствия разрушения их части при транспортировке (особенно при перегрузке). В агрегате создаются зоны рекомендуемой последовательности технологических операций: получения сырых окатышей, сушки, подогрева, обжига и охлаждения за счет размещения блока горелок внутри агрегата на определенном расстоянии от разгрузочного конца. Для проектирования агрегата необходима разработка методики расчета температурного поля внутри агрегата и, особенно, в зоне расположения блока горелок. В связи с тем, что для определения рекомендуемых параметров конструкции агрегата необходимо исследование процесса теплового нагрева сыпучего материала, было проведено теоретическое и экспериментальное исследование распределения температуры на внутренней поверхности трубы в ее нижней части (под горелкой) [6].

Результаты исследования, подробно представленные в работах [6, 7], позволили разработать методику расчета температурного поля в барабанном агрегате. Методика учитывает нагревание материала за счет излучения факела, а также за счет футеровки, которая также нагревается от факела (и соответственно передает тепло материалу). Предполагалось, что с нагреваемой поверхности материала осуществлялся теплоотвод в воздух, движущийся в трубе. Был создан программный комплекс. Резуль-

таты вычислений, полученные с использованием программного комплекса, позволили определить параметры конструкции агрегата, в частности количество газовых горелок (5), расположение горелок в агрегате (на входе и выходе из зоны обжига, внутри зоны обжига), расстояние от каждой горелки до поверхности материала (2,3–2,7 м), параметры горелок (диаметр сопла 4,5 мм, скорость истечения топлива из сопла 250 м/с, в качестве топлива используется пропан), скорость воздуха в барабане (1 м/с). Длина барабанного агрегата L равна десяти диаметрам (диаметр барабана D равен 2,8 м). При перечисленных значениях параметров достигается необходимое для каждой зоны распределение температурного поля на поверхности материала вдоль барабанного агрегата, которое обеспечивает получение на выходе из агрегата окатышей высокого качества. На рис. 2 представлено распределение температуры на поверхности материала вдоль барабанного агрегата. Цифрами 1, 2, ..., 5 обозначено расположение горелок вдоль агрегата.

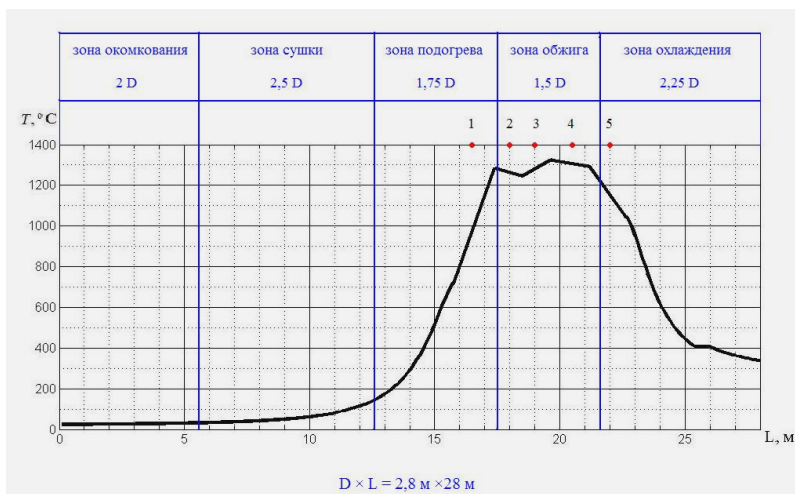


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности материала в барабанном агрегате.

3. Моделирование виброкипящего слоя наночастиц в аппаратах каталитического синтеза порошковых наноструктур. Сегодня нанотехнология охватывает широкую область

исследований неорганических и органических частиц и их систем, характерный размер которых находится в диапазоне от размера атома до сотен нанометров. Наночастицы и наноструктурированные объекты обладают особыми, часто уникальными свойствами, отличающимися от свойств макрообъектов. Это позволяет создавать принципиально новые материалы и устройства на их основе. Ожижение наночастиц (продувание газового потока через слой наночастиц) используется в процессах каталитического синтеза порошковых наноструктур, которые могут использоваться в химических технологиях, фармацевтической и косметической промышленности, энергетической промышленности и при изготовлении биоматериалов. Например, одним из ценных материалов являются углеродные наноструктурные материалы (УНМ), которые получают при каталитическом пиролизе углеводородосодержащих газов [8]. В качестве катализатора могут выступать композиции, полученные на основе металлов семейства железа (Fe, Co, Ni). Эти металлы являются активными центрами роста, при этом они распределяются по поверхности носителей, в качестве которых могут выступать оксиды Mg, Al, Si, а также различные подложки, например, керамические, позволяющие равномерно распределить активный компонент по своей поверхности. В качестве углеродосодержащего сырья наиболее часто используются такие углеводороды как метан, пропан, бутан, ацетилен.

В процессе ожижения образуются агломераты, газовые пузыри и газовые каналы, препятствующие гомогенному ожижению. Воздействие вибраций и тепловое воздействие на ожиженный слой наночастиц способствуют разрушению образовавшихся агломератов и увеличению площади поверхности контакта фаз. Это, в свою очередь, приводит к тому, что реакция разложения идет во всем объеме мелкодисперсного материала.

В связи с этим важную роль в конструировании технических аппаратов каталитического синтеза порошковых наноструктур играет исследование режимов, при которых обеспечивается гомогенное ожижение материала. Провести такое исследование возможно с помощью математического и компьютерного моделирования.

Следует отметить, что в отечественной литературе принято разделять два процесса: процесс виброожижения (когда интен-

сивность вибраций в пределах амплитудных значений ускорений, не превышающих ускорение свободного падения) и процесс виброкипения (когда ускорения вибраций значительно превышают ускорение свободного падения). Соответственно используются два понятия: «виброожиженный слой» и «виброкипящий слой». В зарубежной литературе, в том числе по исследованию динамики наночастиц, понятия «виброожиженный слой» и «виброкипящий слой» объединяют под одним термином «vibrofluidized bed (layer)». В связи с этим далее используется термин «виброожиженный слой». Под термином «vibrofluidized bed (layer)» часто также подразумевают состояние сыпучей среды, в которое она переходит при комбинированном воздействии газового потока и вибраций.

На рис. 3 представлены результаты моделирования кипящего (ожиженного) слоя (*a*), виброожиженного слоя без воздействия газовым потоком (*б*) и виброожиженного слоя при одновременном воздействии газового потока и вибраций (*в*) в разные моменты времени. Начальная толщина слоя равна 50 мм, диаметр частиц равен 0,3 мм. Из рис. 3*a* видно, что в процессе ожигения (воздействия на слой частиц только газовым потоком в вертикальном направлении снизу вверх со скоростью 0,25 м/с) образуются крупные газовые пузыри, и в некоторых областях концентрация частиц (α) увеличивается примерно до 78 %, что препятствует гомогенному ожигению. На рис. 3*б* представлен виброожиженный слой (амплитуда вибраций равна 3 мм, частота колебаний 25 Гц). Видно, что в процессе виброожижения (рассматриваются вибрации только в вертикальном направлении) наблюдается относительно однородная структура слоя с волнообразной поверхностью, но степень расширения слоя при этом меньше, т. к. отсутствует воздействие газовым потоком. Из рис. 3*в* видно, что комбинированное воздействие на слой газового потока и вибрации позволяет увеличить степень расширения слоя и сократить количество газовых пузырей, если сравнивать с ожигенным слоем на рис. 3*a*. При этом пузыри менее ярко выражены, и максимальная концентрация меньше (примерно 66 %).

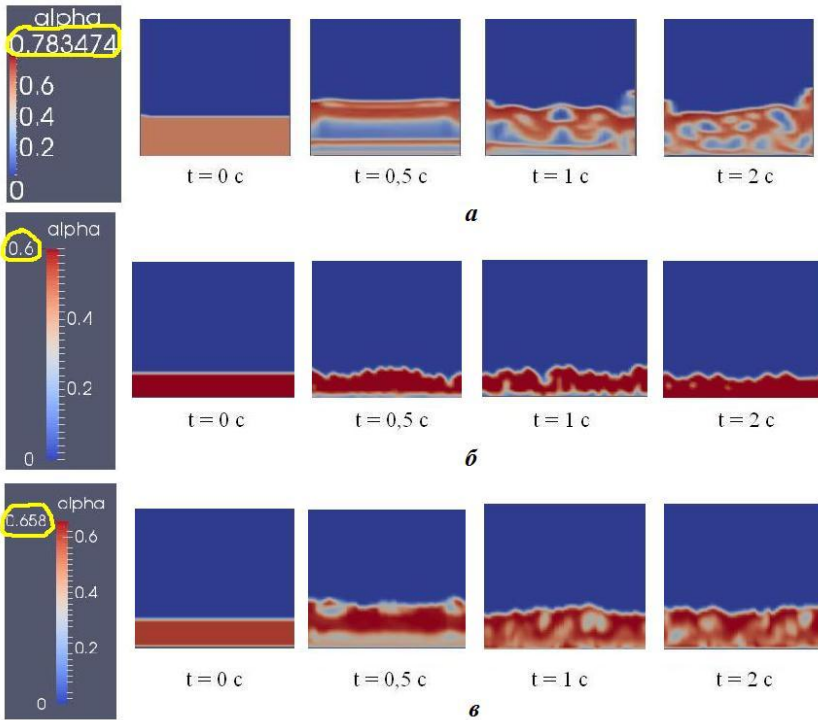


Рис. 3. Кипящий (ожиженный) слой (а), виброожиженный слой (б), комбинированное воздействие газового потока и вибраций (в).

Для описания динамики ожигения частиц, размер которых измеряется в нанометрах, существует несколько относительно простых моделей, разработанных зарубежными авторами [9]. Следует отметить, что имеется также достаточно большое количество работ по экспериментальному исследованию ожигения наночастиц, опубликованных, в основном, зарубежными научными коллективами. Несмотря на огромное практическое значение и разнообразие работ в этом направлении, общепринятой универсальной теории пока нет. В связи с выше изложенным можно сделать вывод о том, что разработка трехмерной математической модели виброожижения наночастиц и ее компьютерная реализация с целью выявления эффективных режимов ожигения в настоящее время являются актуальным фундаментальным исследованием.

В заключение можно отметить, что в процессе разработки модели для описания какого-либо физического процесса очень важно получить математические оценки (такие как оценка точности решения уравнений, оценка сходимости решения, оценка устойчивости численной схемы, которая используется для решения уравнений, и т. д.). Но также важно осуществлять верификацию модели, т. е. сравнивать полученные с использованием модели результаты вычислений с экспериментальными данными. Если удастся получить математические оценки, и результаты вычислений при этом качественно и количественно (с определенной погрешностью) описывают результаты экспериментов, то можно в дальнейшем использовать данную модель для конструирования различных технических аппаратов, основанных на физическом процессе, который описывает модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ветошкин А. Г.* Процессы и аппараты газоочистки: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. ПГУ, 2006. 201 с.
2. Пат. 2132222 РФ В01D53/06, В01J8/40, В01J8/16. Способ очистки газов.
3. *Каменецкий Е. С., Свердлик Г. И., Орлова Н.С., Тряпицын И. В.* Исследование динамики виброкипящего слоя между двумя полками с использованием математического моделирования // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. № 2. С. 993–999.
4. *Каменецкий Е. С., Свердлик Г. И., Орлова Н.С., Тряпицын И. В.* Определение параметров и режимов работы аппарата с виброкипящим слоем адсорбента для очистки газов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 3 (178) С. 80–83.
5. Пат. 2163645 РФ С22В1/24. Барабанный агрегат для получения обожженных окатышей.
6. *Каменецкий Е. С., Свердлик Г. И., Орлова Н.С., Хостелиди В. Н.* Расчетно-экспериментальное исследование распределения температурного поля в стационарной установке цилиндрической формы при радиальном расположении факела // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 4 (179) С. 25–28.
7. *Каменецкий Е. С., Свердлик Г. И., Орлова Н. С., Хостелиди В. Н.* Разработка методики расчета температурного поля в барабанном агрегате горячего окомкования // V Международная научно-практическая конференция «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки»: Сборник работ молодых ученых. Владикавказ, 2014. С. 38–41.

8. Меметов Н. Р., Ткачев А. Г., Зеленин А. Д. Методика расчета реакторов для получения углеродных наноструктурных материалов в виброоживленном слое // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2006. № 3(5). С. 124–130.

9. Zhou L., Wang H., Zhou T., Li K., Kage H., Mawatari Y. Model of estimating nano-particle agglomerate sizes in a vibro-fluidized bed // Advanced Powder Technology. 2013. V. 24. P. 311–316.



УДК 519.6

О ПРИБЛИЖЕННОМ ВЫЧИСЛЕНИИ ГИПЕРСИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ НА ОТРЕЗКЕ ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Мл. научн. сотр. **Плиева Л. Ю.**

Южный математический институт

Владикавказского научного центра РАН и РСО-А,

Северо-Осетинский государственный университет

им. К. Л. Хетагурова,

г. Владикавказ, РСО-Алания, Россия

В работе строятся квадратурные формулы интерполяционного типа для приближенного вычисления гиперсингулярных интегралов на отрезке интегрирования с весовыми функциями. Дается оценка погрешности.

Ключевые слова: гиперсингулярный интеграл, оценка погрешности, квадратурная формула, интерполяционный многочлен.

Рассмотрим гиперсингулярные интегралы вида:

$$H^{(1/2; 1/2)}(\varphi, x) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \frac{\varphi(t)}{(t-x)^2} dt, \quad (1)$$

$$H^{(-1/2; 1/2)}(\varphi, x) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\sqrt{1+t}}{\sqrt{1-t}} \frac{\varphi(t)}{(t-x)^2} dt, \quad (2)$$

$$x \in (-1, 1)$$

где $\varphi(t)$ достаточно гладкая функция, принадлежащая классу $H_r(\alpha)$ ($r \geq 1, 0 < \alpha \leq 1$).