

## Исследование гидродинамических процессов с помощью имитационной модели на примере аппарата фонтанирующего слоя

Е. В. Отрубянников<sup>1</sup>, О. И. Седяров<sup>1</sup>, А. П. Полифтова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

### Аннотация

В работе рассмотрен подход к исследованию гидродинамики аппаратов на базе имитационного моделирования. В качестве примера рассмотрен аппарат фонтанирующего слоя с активной периферийной зоной. В частности, выбранная для анализа конструкция аппарата фонтанирующего слоя отличается от классической конструкции наличием трех дополнительных подводов теплоносителя, расположенных в конической части аппарата. Выделены особенности гидродинамики и специфические зоны аппарата. Построена функциональная схема имитационной модели. Реализованы подходы к созданию базовых элементов — ячейки идеального смешения и ячейки идеального вытеснения. Выполнена программная реализация предложенных алгоритмов. Для иллюстрации возможностей реализована классическая ячеечная модель на базе алгоритма ячейки идеального смешения. Полученная модель показывает хорошую сходимость. Анализ полученных с помощью имитационной модели С-кривых отклика показывает, что в режиме фонтанирующего слоя с дополнительными хордальными вводами можно управлять структурой потоков в зависимости от стоящей технологической задачи. Выявлено, что изменение структуры потоков отражается на форме С-кривой отклика. Проведен анализ формирования вида С-кривой отклика в разработанной имитационной модели. Выявлены характерные точки кривой отклика, формируемые при импульсном возмущении на входе аппарата. Полученная модель позволяет определить оптимальные геометрические соотношения аппарата фонтанирующего слоя в зависимости от поставленной задачи.

### Ключевые слова

Гидродинамика, имитационное моделирование, фонтанирующий слой, активные гидродинамические режимы, ячеечная модель, С-кривые отклика

**Введение.** Имитационное моделирование — это построение алгоритмов, программная реализация которых на ЭВМ приводит к воспроизведению функционирования моделируемой системы во времени. По сути, этот вид моделирования является математическим, однако, он не обладает конечным набором математических

уравнений, но зачастую позволяет более наглядно исследовать моделируемую систему. Такого рода модель позволяет эффективно исследовать поведение системы с целью понимания ее физической сущности и определения количественных характеристик.

\*Для переписки

Email address: polieftova-ap@rguk.ru

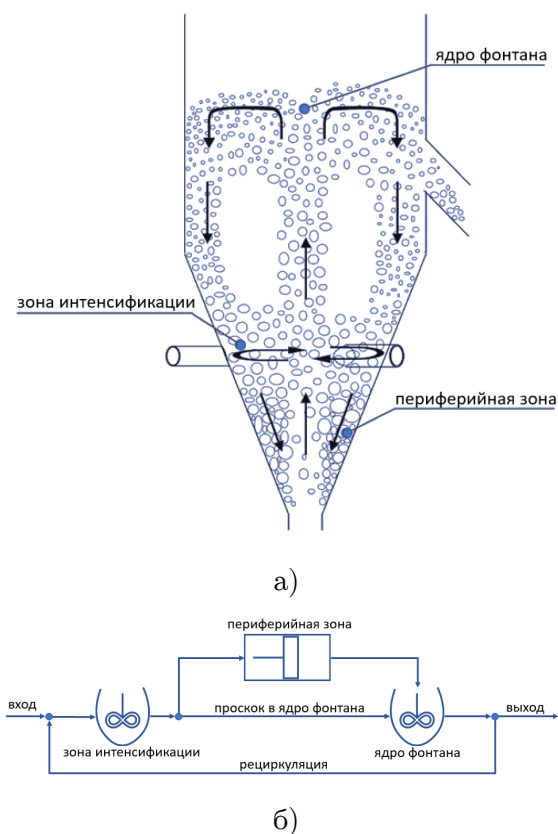
Для построения имитационной модели необходимо составить общее представление о структуре потоков в предложенной конструкции аппарата. Ряд авторов, оценивая гидродинамическую обстановку в аппаратах фонтанирующего слоя, отмечают, что данный аппарат по своей модели приближается к аппаратам идеального смешения [1]. Другие считают, что в периферийной зоне аппарата потоки скорее соответствуют ячейке идеального вытеснения [2, 3]. Поэтому чаще всего классический аппарат фонтанирующего слоя представляют в виде модели, состоящей из параллельно соединенных ячейки идеального смешения и ячейки идеального вытеснения, причем в ячейке идеального вытеснения материал движется от выхода аппарата к входу.

**Материалы и методы решения задачи.** Выбранная для анализа конструкция аппарата фонтанирующего слоя (рисунок 1а) отличается от классической конструкции наличием трех дополнительных подводов теплоносителя, расположенных в конической части аппарата, с хордальностью 0,6. Хордальные вводы позволяют интенсифицировать потоки в периферийной зоне, и тем самым решить проблему застойных зон в нисходящих потоках фонтана [4].

В данном аппарате выделено три основные зоны: ядро фонтана, включающее «шапку» фонтана, зона действия хордальных вводов и периферийная зона. Известно, что основное перемешивание в аппаратах фонтанирующего слоя происходит в ядре и «шапке» фонтана, что позволяет ставить в соответствие данной зоне ячейку идеального смешения. Зона действия хордальных вводов, с точки зрения поведения материала, также соответствует ячейке идеального смешения [5–7].

В периферийной области движение материала является поступательным (в

рассматриваемой конструкции аппарата периферийная зона мала) и ей в соответствии ставится ячейка идеального вытеснения [5, 8].



**Рисунок 1** — Аппарат фонтанирующего слоя: а) конструкция аппарата; б) схема гидродинамической модели.

Данная модель дополняется проскоком, образующимся в области действия хордальных вводов, так как часть метки под их действием выталкивается в ядро фонтана. Модель дополняется рециклом, образующимся за счет не попавшего в переливное отверстие материала. Рассматривать переход материала из начала периферийной зоны аппарата в ядро фонтана как проскок не имеет смысла, так как, во-первых, периферийная зона в аппарате мала, и, во-вторых, данный переход материала при моделировании будет сглажен уменьшением времени в ячейке идеального вытеснения. Полученная схема гидродинамической модели представлена на рисунке 1б.

Полученная функциональная схема аппарата состоит из идеальных представлений о структуре потоков, поэтому первоначальным этапом является моделирование поведения ячеек идеального смешения и идеального вытеснения.

Математическое описание ячейки идеального вытеснения имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -V \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $c$  — концентрация вещества,  $\tau$  — время,  $V$  — скорость потока,  $x$  — координата.

В соответствии с данной моделью принимается поршневое течение без перемешивания вдоль потока при равномерном распределении материала в направлении, перпендикулярном движению. Очевидно, что имитацией данной модели является алгоритм с задержкой. Математическое описание ячейки идеального смешения имеет вид:

$$\frac{dc_{\text{ВЫХ}}}{d\tau} = \frac{G_c}{m} (c_{\text{ВХ}} - c_{\text{ВЫХ}}). \quad (2)$$

Согласно данной модели, метка равномерно распределяется во всем объеме ячейки, при этом перемешивание происходит мгновенно.

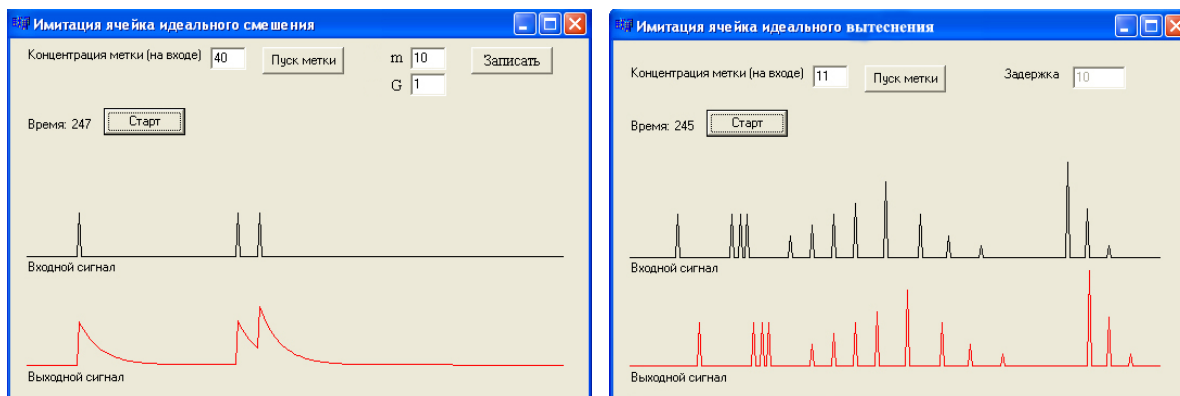
Каждый узел имитационной модели синхронизирован по времени. Это означает, что существуют дискретные моменты времени и состояние системы вычисляется с помощью алгоритма последовательно в каждый из них. Результат работы системы в определенный момент времени зависит от состояния системы в предыдущий момент времени. Для рассматриваемой модели работа системы начинается в нулевой момент времени, когда концентрация метки во всех узлах модели равна нулю. При моделировании принято, что концентрация метки соответствует поведению массовой скорости

потока, то есть в узлах, где поток разделяется, концентрация метки делится в том же соотношении.

В целях исследования полученной функциональной схемы необходимо определить её основные параметры. Основным параметром, характеризующим движение метки, можно считать массовую скорость всего потока через аппарат ( $G_0$ ). Так как условно система работает в непрерывном режиме, эта массовая скорость характерна для входа и выхода материала из аппарата. В разветвлениях поток делится в соответствии с некоторым соотношением. Пусть через ячейку смешения, описывающую зону действия хордальных вводов, проходит поток  $G_1$ . В начале периферийной зоны данный поток делится на два:  $G_2$  — поток, проходящий через ячейку идеального вытеснения, и  $G_3$  — проскок. Перед зоной ядра фонтана потоки объединяются и через ячейку идеального смешения проходит поток, равный  $G_1$ . На выходе поток делится на выходной  $G_0$  и  $G_4$  — поток рециркуляции. Исходя из вышесказанного, можно составить уравнения материального баланса:

$$G_1 = G_2 + G_3 \text{ и } G_1 = G_0 + G_4. \quad (3)$$

Реализация данных алгоритмов и общей функциональной схемы аппарата была выполнена на языке программирования C++ в визуальной среде Borland C++ Bulder. Интерфейс программы, имитирующей работу ячейки идеального смешения и ячейки идеального вытеснения, изображен на рисунках 2а и 2б соответственно. Особенностью данной программы является возможность установления массы ячейки ( $m$ ) и массовой скорости потока ( $G$ ). Для этого надо ввести значения в соответствующие поля и нажать кнопку «Записать» для сохранения параметров в алгоритме. Данное действие можно выполнять на работающем алгоритме.



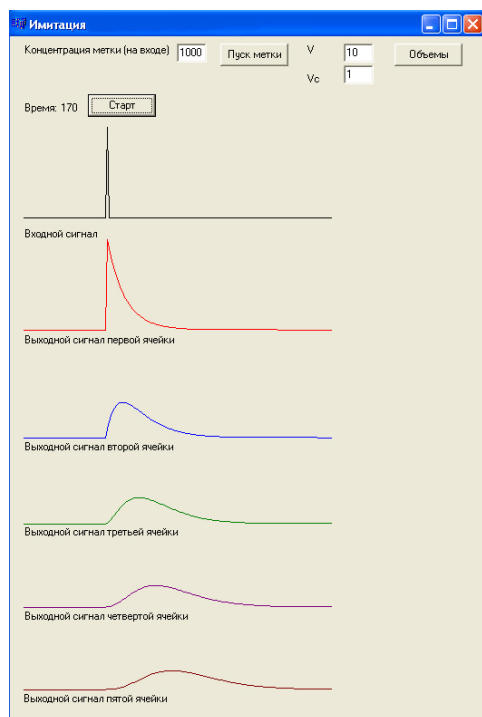
а)

б)

**Рисунок 2** — Интерфейс программы, имитирующей работу ячейки а) идеального смешения; б) идеального вытеснения.

Значение введенной метки немедленно отображается на графике входного сигнала, и в соответствии с работой алгоритма отображается на графике выходного сигнала.

Для примера иллюстрации возможностей данного подхода на рисунке 3 показано функционирование ячейочной модели на базе имитации работы ячеек идеального смешения.



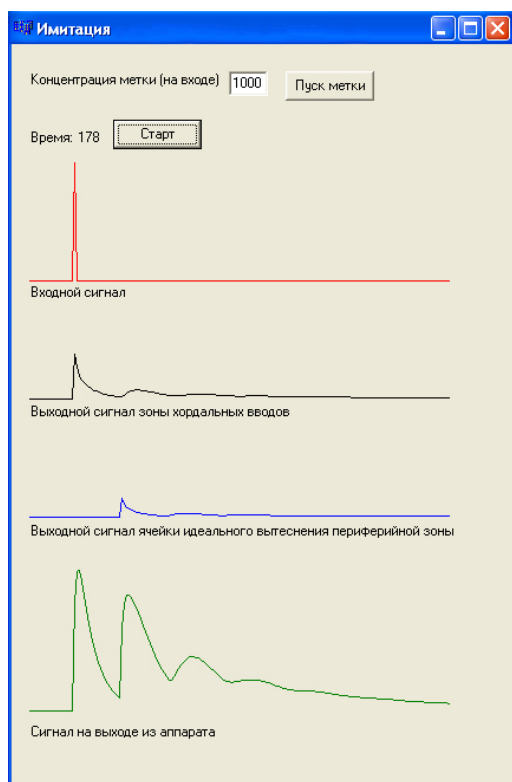
**Рисунок 3** — Имитация работы ячейочной модели, количество ячеек 1-5.

Как известно [2, 9, 10] основой ячейочной модели является представление об ячейках идеального смешения, которые соединены последовательно и не имеют перемешивания между ячейками. Параметром данной модели является число ячеек —  $n$ . Для проиллюстрированной ячейочной модели  $n=1-5$ . Сравнение работы модели с данными, представленными в [5], показывают хорошую сходимость.

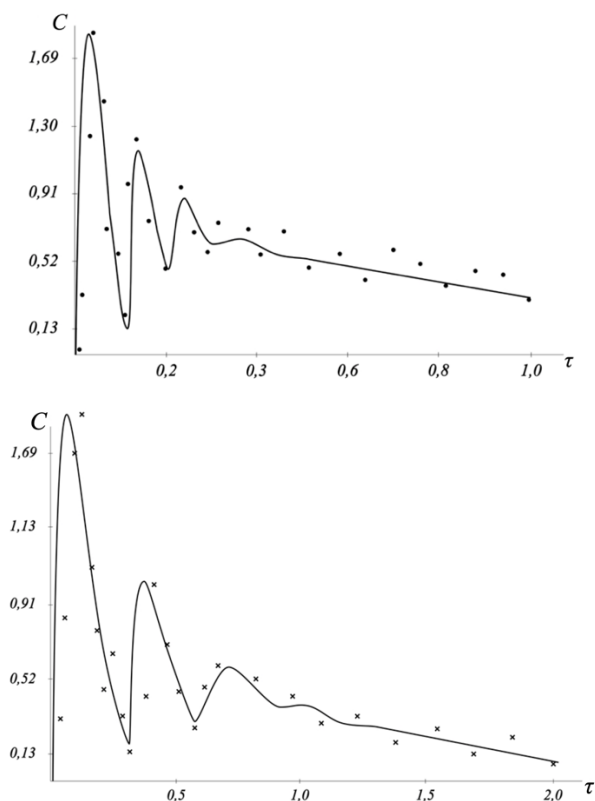
### Результаты и обсуждение

Результатом реализации модели является программа, пример работы которой представлен на рисунках 4а и 4б.

Анализ полученных с помощью данной модели  $S$ -кривых отклика показывает, что в режиме фонтанирующего слоя с дополнительными хордальными вводами можно управлять структурой потоков в зависимости от стоящей технологической задачи, что является очень важным [8]. Изменение структуры потоков отражается на форме  $S$ -кривой отклика, поэтому целесообразно рассмотреть формирование вида  $S$ -кривой отклика в разработанной имитационной модели. В общем случае  $S$ -кривая имеет характерные точки, которые четко отражены на рисунке 5.



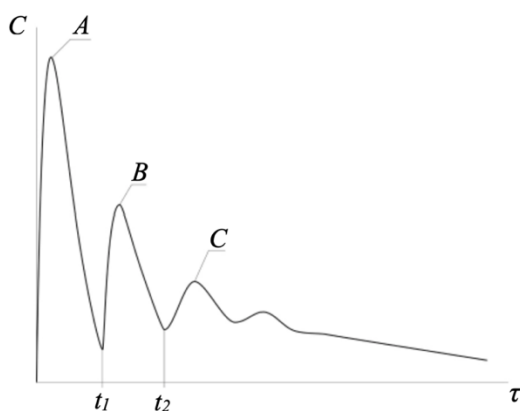
а)



б)

**Рисунок 4** — Пример программной реализации модели (а) в сравнении с экспериментальными данными (б).

Важно отметить, что представленный на рисунке 5 вид  $C$ -кривой отклика характерен для исследуемого аппарата по экспериментальным данным и хорошо согласуется с предложенной реализацией. На ее примере можно рассмотреть влияние различных параметров на структуру потоков и результат работы модели.



**Рисунок 5** — Общий вид  $C$ -кривой отклика для аппарата фонтанирующего слоя с дополнительным подводом теплоносителя.

Точка А — является первым пиком кривой отклика, который появляется за счет метки, прошедшей через ячейку идеального смешения в зоне действия хордальных вводов, проскок, ячейку идеального смешения в ядре фонтана и попавшую в переливное отверстие. Анализ показывает, что на пик в точке А влияет масса ячейки идеального смешения в области хордальных вводов, доля метки, попавшей в ячейку идеального вытеснения в периферийной области, и масса ячейки идеального смешения в области ядра фонтана.

От того, в каком соотношении делится метка на выходе из аппарата (доля рецикла и доля на выходе), величина пика в точке А не зависит, так как в принятой модели это соотношение во времени линейно. В случае использования более сложных зависимостей существует возможность появления существенного влияния и этого фактора. Можно

предположить, что увеличение массы материала, находящегося в области действия хордальных вводов при прочих равных условиях, приведет к незначительному уменьшению пика и сдвигу точки А в правую сторону относительно оси времени. Это связано с тем, что количество отводимой метки из ячейки идеального смешения уменьшится (соотношение массы ячейки к массовому расходу), тем самым «растягивая» поступление метки в ячейку идеального смешения ядра фонтана. Увеличение объема ячейки идеального смешения в ядре фонтана будет иметь такой же эффект для выхода из аппарата. Особо стоит отметить долю метки, попавшую в ячейку идеального вытеснения в периферийной зоне. Чем больше эта доля, тем меньше метки будет на выходе из аппарата. Можно предположить, что наиболее целесообразным с точки зрения эффективности обработки материала аппаратом фонтанирующего слоя является аппарат, обладающий ячейкой идеального вытеснения в периферийной зоне равной ячейке идеального смешения в области действия хордальных вводов, и не имеющий проскока в этой области. Для большей эффективности аппарат должен обладать тороидальным переливным отверстием. Тогда С-кривая будет иметь один явный пик, выходящий из аппарата в момент времени, соответствующий времени задержки в ячейке идеального смешения.

Второй пик кривой отклика (в точке В) соответствует материалу, прошедшему через ячейку идеального вытеснения. Возрастание концентрации на выходе аппарата начинается в момент  $t_1$ , соответствующий времени задержки в ячейке идеального вытеснения. Метка начинает поступать из периферийной зоны в ячейку идеального смешения ядра фонтана, смешивается с меткой в самой ячейке и меткой, поступающей из проскока.

Таким образом, в момент времени  $t_1$  концентрация на выходе из аппарата начинает возрастать и достигает своего максимума в точке В, где концентрация метки, входящая в ячейку, становится равной концентрации на выходе из ячейки. При увеличении доли материала, находящегося в периферийной области (например, при увеличении длины нижнего конуса аппарата), пик в точке В будет более выраженным, а уменьшение проскока за счет вставки ограничивающих проскок конструктивных элементов, позволит получить в точке В более высокую концентрацию, чем даже в точке А.

В дальнейшем С-кривая убывает до момента времени  $t_2$ , когда рецикл пройдя ячейку идеального смешения в области хордальных вводов, проскок и ячейку идеального смешения в ядре фонтана, проявит себя на выходе из аппарата. Кривая отклика приобретает периодические экстремумы, которые постепенно сглаживаются за счет сдвига каждого следующего пика из-за задержки в ячейке идеального вытеснения.

На основе анализа полученной модели возможно определить оптимальные геометрические соотношения аппарата фонтанирующего слоя в зависимости от поставленной задачи. Например, для сушки широкопористых материалов целесообразно использовать аппараты с небольшим временем пребывания материала. Для этого достаточно уменьшить угол конуса нижней части аппарата, тем самым уменьшая долю материала, находящегося в ячейке идеального вытеснения периферийной зоны. Однородность обработки материала можно повысить за счет использования переливного отверстия тороидальной формы, что так же решает проблему рецикла материала.



### Заключение

В работе показаны возможности использования имитационного моделирования для исследования гидродинамических процессов. Предложенная модель позволяет подобрать оптимальные геометрические соотношения аппарата фонтанирующего слоя в зависимости от поставленной задачи и среднего времени пребывания материала в аппарате. Например, для сушки широкопористых материалов целесообразно использовать аппараты с небольшим временем пребывания, для чего достаточно уменьшить угол конуса нижней части аппарата, уменьшая долю материала, находящегося в ячейке идеального вытеснения периферийной зоны, а однородность обработки материала можно повысить за счет использования переливного отверстия тороидальной формы. С другой стороны, для материалов, проявляющих аутогезионные свойства, целесообразно увеличить объем материала, находящегося в ячейке идеального смешения в области хордальных вводов, для чего достаточно увеличить соотношение теплоносителя, подаваемого в область интенсификации, по отношению к теплоносителю основного ядра фонтана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Моделирование тепло- и массообменных процессов в фонтанирующем слое. Теоретические основы химической технологии, 1986, №2. с. 163–168.
- [2]. Долидович А.Ф. Некоторые вопросы внутренней гидродинамики и теплообмена аппаратов фонтанирующего слоя, Тепло-массообмен — ММФ. Тез. докл. Минского международного форума. – Минск: ИТМО, 1971, с. 75–84.
- [3]. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. Л., Химия, 1968. 272 с.
- [4]. Пат. 2377487 Российская Федерация, МПК F26B 17/10. Аппарат фонтанирующего слоя со встречным дополнительным подводом теплоносителя / Сажин Б. С., Кочетов О. С., Отрубянников Е. В., Апарушкина М. А.; заявитель и патентообладатель Кочетов Олег Савельевич. – № 2008151526/06; заявл. 25.12.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36. – 5 с.
- [5]. Bridwater J., Mathur K.B. Prediction of spout diameter in a spouted bed — a theoretical model. Powder Technology, 1972, №4, pp. 183–187.
- [6]. Zhou L., Han C., Bai L., et al. CFD-DEM bidirectional coupling simulation and experimental investigation of particle ejections and energy conversion in a spouted bed. Energy, 2020, vol. 211, p. 118672. DOI 10.1016/j.energy.2020.118672
- [7]. Batista J., Béttega R. Evaluation of different mathematical models in the CFD-DEM simulation of conical spouted bed fluid dynamics. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 2021, OnLine-First Issue 00, 33 p. DOI 10.2298/CICEQ110707002B
- [8]. Ahmadabadi E. F., Haghshenasfard M., Esfahany M. N. CFD simulation and experimental validation of nanoparticles fluidization in a conical spouted bed. Chemical Engineering Research and Design, 2020, vol. 160, pp. 476–485. DOI 10.1016/j.cherd.2020.06.018
- [9]. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: 4-е изд., перераб., доп. М., Химия, 1985, 448 с.

[10]. Кафаров В. В., Перов В. Л., Мешалкин В. П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М., Химия, 1974, 344 с.

[11]. Белоусов А. С., Сажин Б. С., Отрубьянников Е. В. Структура потоков в аппаратах со взвешенным слоем. Известия ВУЗов. Химия и химическая технология, 2008, №7, с. 332–337.

**Отрубьянников Егор Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

**Седляров Олег Иванович** — канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

**Полиефтова Анна Павловна** — аспирант, старший преподаватель кафедры «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).



## Investigation of hydrodynamic processes using a simulation model apply the example of a spouted bed apparatus

**E. V. Otrubyannikov<sup>1</sup>, O. I. Sedlyarov<sup>1</sup>, A. P. Polieftova<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>*The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

---

### **Abstract**

The paper considers an approach to the study of the hydrodynamics of apparatus based on simulation modeling. As an example, the apparatus of a spouted bed with an active peripheral zone is considered. In particular the design of the spouting bed apparatus chosen for the analysis differs from the classical design by the presence of three additional coolant inlets located in the conical part of the apparatus. The features of hydrodynamics and specific zones of the apparatus has been distinguished. A functional diagram of the simulation model has been built. Approaches to the creation of basic elements (ideal mixing cells and ideal displacement cells) have been implemented. The software implementation of the proposed algorithms has been completed. To illustrate the possibilities, a classical cell model is implemented based on the ideal mixing cell algorithm. The resulting model shows a good convergence. Analysis of the C-response curves obtained with the help of the simulation model shows that in the mode of a gushing layer with additional chordal inputs, it is possible to control the structure of flows depending on the technological task at hand. It was revealed that the change in the structure of flows is reflected in the shape of the C-curve of the response. The analysis of the formation of the form of the C-response curve in the developed simulation model is carried out. The characteristic points of the response curve formed during impulse disturbance at the input of the apparatus, are revealed. The resulting model makes it possible to determine the optimal geometric ratios of the apparatus of the gushing layer depending on the task at hand.

### **Keywords**

Hydrodynamics, simulation, spouted bed, active hydrodynamic modes, cell model, C-response curves

---

### **REFERENCES**

- [1]. Kafarov V. V., Dorokhov I. N. Modelirovanie teplo- i massoobmennyykh protsessov v fontaniruiushchem sloe [Modeling heat and mass transfer processes in the spouted bed]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology]. 1986. №2. pp. 163–168. (In Russ.)
- [2]. Dolidovich A.F. Nekotorye voprosy vnutrennei gidrodinamiki i teploob-mena apparatov fontaniruiushchego sloia [Some issues of internal hydrodynamics and heat transfer of devices of the spouted bed], *Teplo-massoobmen — MMF. Tez. dokl. Minskogo mezhdunarodnogo foruma* [Heat and mass transfer - MMF. Abstracts of the Minsk

---

*\*Corresponding author*

*Email address: polieftova-ap@rguk.ru*

- International Forum]. – Minsk: ITMO Publ., 1971, pp. 75–84. (In Russ.)
- [3]. Romankov P. G., Rashkovskaia N. B. Sushka vo vzveshennom sostoianii [Drying in suspension]. Leningrad, Khimiia, 1968. 272 p. (In Russ.)
- [4]. Pat. 2377487 Russian Federation, MPK F26B 17/10. Apparat fontaniruiushchego sloia so vstrechnym dopolnitel'nym podvodom teplonositel'nykh podvodom teplonositel'nykh [Spouting bed apparatus with counter additional coolant supply] / Sazhin B. S., Kochetov O. S., Otrubiannikov E. V., Aparushkina M. A.; applicant and patentee Kochetov Oleg S. – № 2008151526/06; application 25.12.2008; publ. 27.12.2009, Bulletin. № 36. – 5 p. (In Russ.)
- [5]. Bridwater J., Mathur K.B. Prediction of spout diameter in a spouted bed — a theoretical model. Powder Technology, 1972, №4, pp. 183–187.
- [6]. Zhou L., Han C., Bai L., et al. CFD-DEM bidirectional coupling simulation and experimental investigation of particle ejections and energy conversion in a spouted bed. Energy, 2020, vol. 211, p. 118672. DOI 10.1016/j.energy.2020.118672
- [7]. Batista J., Béttega R. Evaluation of different mathematical models in the CFD-DEM simulation of conical spouted bed fluid dynamics. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 2021, OnLine-First Issue 00, 33 p. DOI 10.2298/CICEQ110707002B
- [8]. Ahmadabadi E. F., Haghshenasfard M., Esfahany M. N. CFD simulation and experimental validation of nanoparticles fluidization in a conical spouted bed. Chemical Engineering Research and Design, 2020, vol. 160, pp. 476–485. DOI 10.1016/j.cherd.2020.06.018
- [9]. Kafarov V. V. Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoi tekhnologii: 4-e izd., pererab., dop. [Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology: 4th ed., Revised, add.] Moscow, Khimiia Publ., 1985, 448 p.
- [10]. Kafarov V. V., Perov V. L., Meshal'kin V. P. Printsipy matematicheskogo modelirovaniia khimiko-tekhnologicheskikh sistem [Principles of mathematical modeling of chemical technological systems]. Moscow, Khimiia Publ., 1974, 344 p. (In Russ.)
- [11]. Belousov A. S., Sazhin B. S., Otrubiannikov E. V. Struktura potokov v apparatakh so vzveshennym sloem [The structure of flows in devices with a suspended bed]. Izvestiia VUZov. Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiia [Proc. of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology], 2008, №7, pp. 332–337. (In Russ.)

**Otrubyannikov E. V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya ul. 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

**Sedlyarov O. I.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya ul. 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

**Polieftova A. P.** — Postgraduate Student, Lecturer, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya ul. 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Исследование гидродинамических процессов с помощью имитационной модели на примере аппарата фонтанирующего слоя / Е. В. Отрубьянников, О. И. Седляров, А. П. Полиефтова // *Промышленные процессы и технологии*. 2021. № 2. С. 70 – 80.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-2-70-80

**Please cite this article as:**

Otrubyannikov E. V., Sedlyarov O. I., Polieftova A. P. Investigation of hydrodynamic processes using a simulation model apply the example of a spouted bed apparatus. *Industrial processes and Technologies*, 2021, no. 2, pp. 70 – 80

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-2-70-80