УДК 66.096.5
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.452-461

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МЕЖФАЗНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

© А. В. Сажин[1] ✉, И. С. Гуданов[1], Д. С. Долгин[1], А. А. Ватагин[1], А. Е. Лебедев[1]

[1] *Кафедра «Технологические машины и оборудование», sasha-sazhin@inbox.ru; ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация*

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика; катализатор; математическая модель; псевдоожижение; симуляция.

Аннотация: Исследование направлено на совершенствование методов вычислительной гидродинамики для моделирования процессов псевдоожижения. Проведен сравнительный анализ встроенных моделей сопротивления, реализованных в программном комплексе Ansys Fluent. На основе экспериментальных данных и известных теоретических зависимостей разработана усовершенствованная модель межфазного взаимодействия. Основное преимущество предложенной модели – способность воспроизводить реалистичное распределение фаз в псевдоожиженном слое. Практическая значимость модели продемонстрирована на примере симуляции псевдоожижения микросферического катализатора каталитического крекинга в цилиндрическом аппарате.

Введение

Техника псевдоожиженного слоя на основе многочисленных преимуществ при переработке и транспорте твердых материалов, а также при переработке жидкостей находит применение в разнообразных отраслях промышленности [1]. Псевдоожиженным называют состояние двухфазной системы (твердые частицы – газ или жидкость), которое характеризуется перемещением твердых частиц друг относительно друга. Под псевдоожижением понимают превращение слоя зернистого материала в псевдогомогенную систему под воздействием ожижающего агента. При этом двухфазная псевдогомогенная система получила название псевдоожиженного (кипящего) слоя [2].

Широкое применение процесса псевдоожижения обусловлено следующими преимуществами: интенсивным перемешиванием твердой фазы, что способствует выравниванию температур и концентраций по объему псевдоожиженного слоя; высокими значениями коэффициентов эффективной теплопроводности и теплоотдачи от двухфазной системы к поверхностям теплообмена, что позволяет экономить объемы аппаратов и поверхности теплообмена; применением твердых частиц малых размеров, что повышает удельную поверхность твердой фазы (до 300 $м^2/г$ у современных марок микросферического катализатора каталитического крекинга); текучесть такой системы позволяет вести процесс непрерывно.

Процесс псевдоожижения реализован в нефтеперерабатывающей (каталитический крекинг, гидроочистка, полимеризация, коксование), химической (производство полиолефинов, синтез каучуков, производство хлора), энергетической (сжигание твердого топлива в кипящем слое), металлургической (обжиг руд) и фармацевтической (сушка гранул, порошков) промышленности. Наибольшее распространение псевдоожижение получило в технологии каталитического крекинга применительно к микросферическому катализатору.

Одним из ключевых направлений в современной нефтеперерабатывающей промышленности является оптимизация существующих процессов и аппаратов, а также создание нового технологического оборудования повышенной эффективности. Для достижения этой цели в процессах, использующих псевдоожиженный слой, таких как регенерация катализатора каталитического крекинга, необходимо лучшее понимание особенностей гидродинамики дисперсного слоя. Для лучшего теоретического понимания физической картины двухфазного течения «газ – твердое тело» в качестве инструмента для детального изучения процесса, повышения эффективности регенерации катализатора и создания аппаратов новой конструкции может быть использовано численное моделирование. Для моделирования состояния подобных систем хорошо зарекомендовали программно-вычислительные комплексы (вычислительная гидродинамика (*англ*. Computational Fluid Dynamics (**CFD**)), основанные на методе конечных элементов.

Выделяют два основных подхода описания многофазных потоков: Эйлера–Лагранжа и Эйлера-Эйлера. Первый подход использует гибридное описание: дисперсная фаза, например, твердые частицы, капли и пузыри моделируется как совокупность отдельных частиц, траектории которых отслеживаются в лагранжевой системе отсчета. Несущая фаза (газ или жидкость) описывается как континуум в эйлеровой системе. В рамках второго подхода все фазы (газ, жидкость, твердые частицы) рассматриваются как взаимопроникающие сплошные среды (континуумы). Для каждой фазы решается свой набор уравнений Навье–Стокса, усредненных по объему. Преимущество такого подхода в том, что можно отслеживать траекторию отдельных частиц, их взаимодействие, изменения размеров каждой частицы и т.д. Поэтому для моделирования псевдоожиженных процессов принято использовать метод Эйлера-Эйлера.

Несмотря на достаточно продолжительное и успешное применение метода расчета CFD, до сих пор не создано готовое решение для получения реалистичной картины распределения частиц микросферического катализатора, необходимой для расшивки «узких» мест технологического оборудования. Основной проблемой при моделировании является использование правильных зависимостей при расчете коэффициента сопротивления в определенных зонах аппарата. Однако развитие вычислительных мощностей позволяет вплотную подойти к решению поставленного вопроса.

Цель работы – исследование и совершенствование моделей межфазного сопротивления, встроенных в расчетные модули программы Ansys, и выявление их недостатков. На основе полученных данных необходимо построить собственную модель сопротивления, которая соответствует реальной картине распределения твердой фазы по объему модели.

Ansys Fluent – это ведущий коммерческий программный пакет для CFD, использующий решатель, основанный на методе конечных элементов, для моделирования широкого спектра задач механики жидкости и газа, тепломассообмена и химических реакций. Программа предоставляет комплексную среду для построения геометрии, генерации сеток, настройки физических моделей (таких как турбулентность, многофазные потоки, горение и пр.) и проведения расчетов с последующей визуализацией результатов. Благодаря высокой точности и обширно-

му набору верифицированных моделей, Fluent является стандартом индустрии для инженерного анализа и оптимизации процессов в аэрокосмической, автомобильной, энергетической и химической отраслях.

Математическое моделирование процесса псевдоожижения

В качестве исследуемого объекта выбран двухмерный цилиндрический аппарат. Диаметр аппарата равен 0,5 м, высота – 4 м.

Для дискретизации расчетной области применена структурированная прямоугольная сетка, состоящая из 20 000 равномерных ячеек. Разбиение осуществлено на 200 элементов по высоте и 100 элементов по диаметру аппарата. Также на этом этапе заданы граничные условия граничным линиям аппарата: нижняя граница – вход газа (inlet), верхняя – выход газа с унесенным катализатором (outlet), боковые стороны – стенки (walls). Для большей наглядности и проверки работоспособности моделей расчет проводился в двух скоростных режимах газовой фазы с шагом 0,2 м/с.

После настройки модели необходимую выбрать требуемую модель сопротивления. В качестве встроенных в программный комплекс Ansys Fluent моделей расчета коэффициента сопротивления выбраны наиболее популярные: Syamlal–O'Brien и Gidaspow.

Приведем основные настройки модели (параметры CFD симуляции):

Модель	Granular
Решатель	Pressure-Based Transient
Временной шаг, с	0,01
Максимальное число итераций	40
Критерий сходимости	1×10^{-3}
Максимальная объемная доля твердой фазы	0,6
Насыпная плотность катализатора, кг/м^3	1500
Диаметр частицы катализатора, мкм	60
Коэффициент сопротивления	0,95
Модель турбулентности	K – ε model
Начальная высота катализатора в аппарате, м	1
Скорость газа на входе в аппарат, м/с	0,4; 0,6

В первом опыте используется модель сопротивления Syamlal–O'Brien [3].

Коэффициент межфазного обмена импульсом определяется по формуле

$$\beta = \frac{3\rho_g \alpha_g \alpha_p}{2v_{r,p}^2 d_p} C_D \left| \vec{u}_p - \vec{u}_g \right|, \qquad (1)$$

где ρ_g – плотность газовой фазы, кг/м^3; α_g, α_p – объемные доли газа и твердой фазы соответственно; $v_{r,p}$ – предельная скорость твердых частиц, м/с; d_p – диамнтр твердых частиц, м; C_D – коэффициент сопротивления; $\vec{u}_p, \vec{u}_g$ – скорости твердых частиц и газа соответственно, м/с.

Коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле

$$C_D = \left(0{,}63 + \frac{4{,}8}{\sqrt{\mathrm{Re}_p / u_{r,p}}} \right)^2, \qquad (2)$$

где Re – критерий Рейнольдса.

Критерий Рейнольдса вычисляется по формуле

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho_g d_p \left| \vec{u}_p - \vec{u}_g \right|}{\mu_g}, \tag{3}$$

где μ_g – динамическая вязкость газовой среды, Н·с/м^2.

Предельная скорость твердых частиц определяется по формуле

$$v_{r,p} = 0{,}5\left(A - 0{,}06\,\mathrm{Re}_p + \sqrt{(0{,}06\,\mathrm{Re}_p)^2 + 0{,}12\,\mathrm{Re}_p(2B + A) + A^2} \right), \tag{4}$$

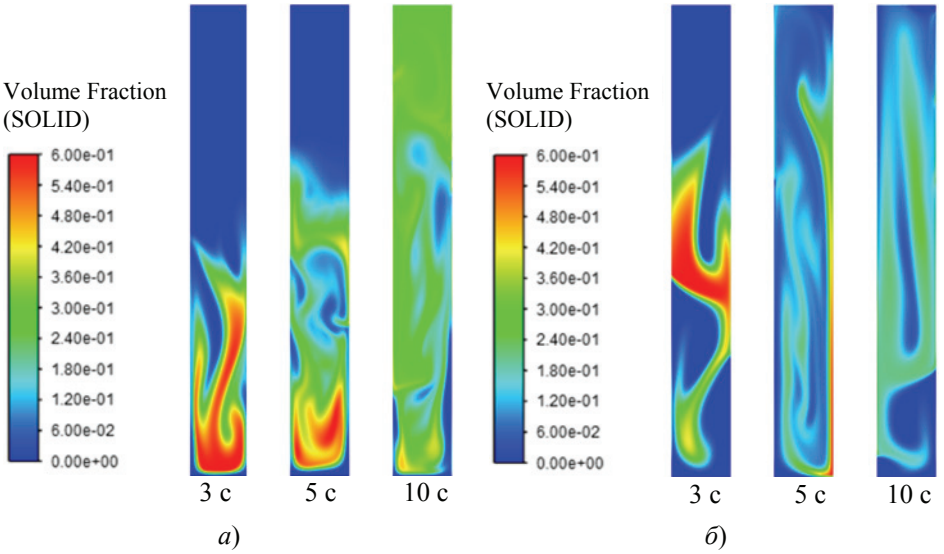
где A, B, P, Q – параметры модели сопротивления Syamlal–O'Brien (5):

$$A = \alpha_g^{4{,}14}; \quad B = \begin{cases} P\alpha_g^{1{,}28}\left(\alpha_g \le 0{,}85\right) \\ \alpha_g^{Q}\left(\alpha_g > 0{,}85\right); \end{cases} \quad P = 0{,}8; \quad Q = 2{,}65. \tag{5}$$

На рисунке 1 изображены результаты опыта с использованием модели Syamlal–O'Brien [3].

Анализируя результаты, наблюдаем отсутствие четкого разделения фаз, характерных для псевдоожиженного слоя. Течение характеризуется быстрым псевдоожижением и значительным уносом катализатора.

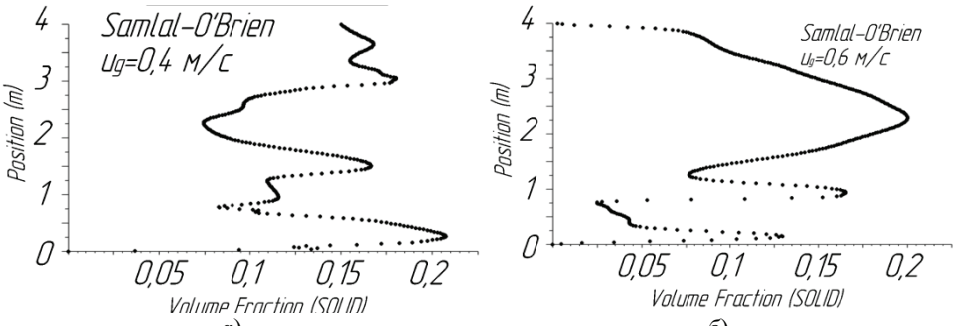
На рисунке 2 показано распределение твердой фракции по высоте аппарата с использованием модели Syamlal–O'Brien. Согласно экспериментальным данным, видно, что концентрация катализатора в нижней зоне значительно ниже требуемой, а в верхней – выше (рис. 3). По данным исследований [4], отклонения от экспериментальных данных в модели Syamlal–O'Brien связаны с завышением прогноза обмена импульсами между газовой и твердой фазами для мелких частиц. Происходит это из-за пренебрежения силами сцепления и агломерации между частицами. Поэтому уравнения Syamlal–O'Brien не могут быть использованы для предсказания и моделирования гидродинамики микросферических частиц катализатора.



а) *б*)

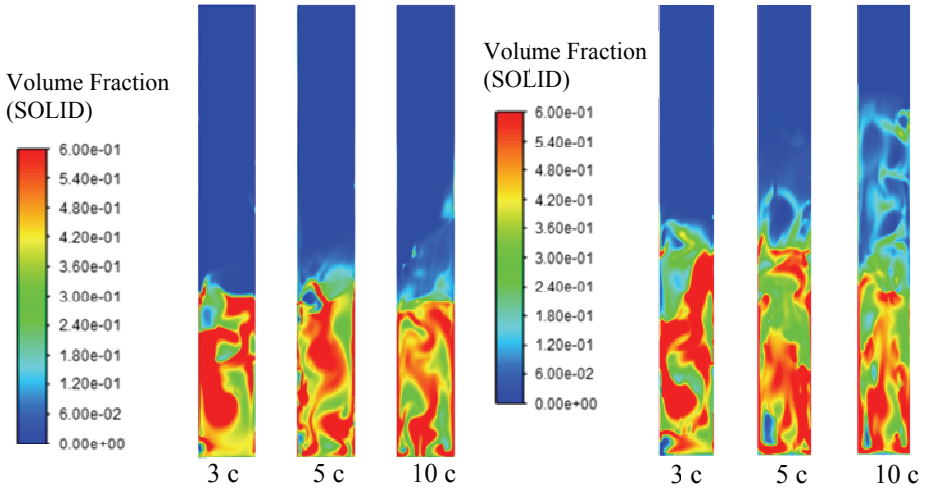
Рис. 1. Структура потока с классической моделью сопротивления Syamlal–O'Brien при различных скоростях газовой фазы:

а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с



а) *б*)

Рис. 2. Профиль распределения твердой фракции по высоте колонны с классической моделью сопротивления Syamlal–O'Brien при различных скоростях газовой фазы:
а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с



а) *б*)

Рис. 3. Структура потока с четырехзонной моделью сопротивления при различных скоростях газовой фазы:
а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с

Приступим ко второму опыту. В эксперименте в качестве модели для расчета коэффициента сопротивления используется модель Gidaspow [5]. Остальные параметры расчета модели прежние.

Модель сопротивления Gidaspow использует различные формулы для расчета коэффициента межфазного обмена в зависимости от объемной доли газовой фазы в каждой расчетной точке.

Коэффициент межфазного обмена импульсом определяется по формуле:

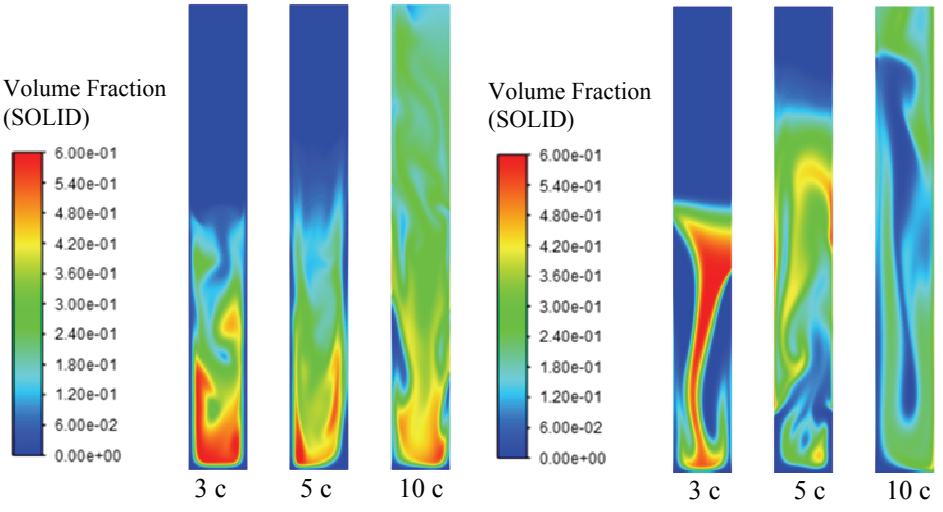
$$\begin{cases} \beta = 150\dfrac{\mu_g(1-\alpha_g)\alpha_p}{\alpha_g d_p^2} + \dfrac{\rho_g \alpha_p \left|\vec{u}_p - \vec{u}_g\right|}{d_p}, & \text{если} \quad \alpha_g \le 0{,}8\,; \\ \beta = \dfrac{3}{4} C_D \dfrac{\rho_g \alpha_g \alpha_p \left|\vec{u}_p - \vec{u}_g\right|}{d_p} \alpha_g^{-2{,}65}, & \text{если} \quad \alpha_g > 0{,}8\,. \end{cases} \tag{6}$$

Коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле

$$C_D = \begin{cases} \dfrac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1 + 0{,}15\,\mathrm{Re}_p^{0{,}687}\right) & (\mathrm{Re} \le 1000); \\ 0{,}44 & (\mathrm{Re} > 1000). \end{cases} \qquad (7)$$

Анализируя результаты расчета потока, с использованием модели Gidaspow видим, что модель имеет аналогичные с моделью Syamlal–O'Brien проблемы: отсутствует образование плотной фазы, а концентрация катализатора в разбавленной фазе избыточная (рис. 4, 5).

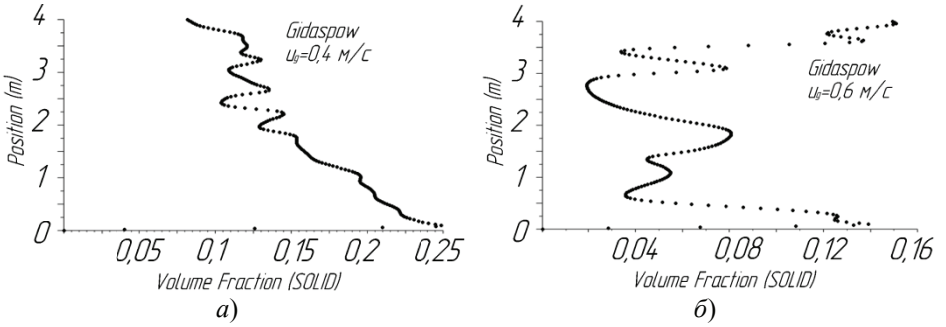
Псевдоожиженный слой микросферического катализатора характеризуется двумя основными областями: плотной и разбавленной, и двумя промежуточными областями: субплотной и субразбавленной [6]. Существующие модели не способны продемонстрировать сосуществование основных фаз, поэтому для корректного моделирования псевдоожижения мелкосферического катализатора требуется строгое определение расчетных зон и выбор соответствующих уравнений. В качестве решения предложена комбинированная четырехзонная модель сопротивления (табл. 1).



а) *б*)

Рис. 4. Структура потока с классической моделью сопротивления Gidaspow при различных скоростях газовой фазы:

а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с



а) *б*)

Рис. 5. Профиль распределения твердой фракции по высоте колонны с классической моделью сопротивления Gidaspow при различных скоростях газовой фазы:

а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с

Таблица 1

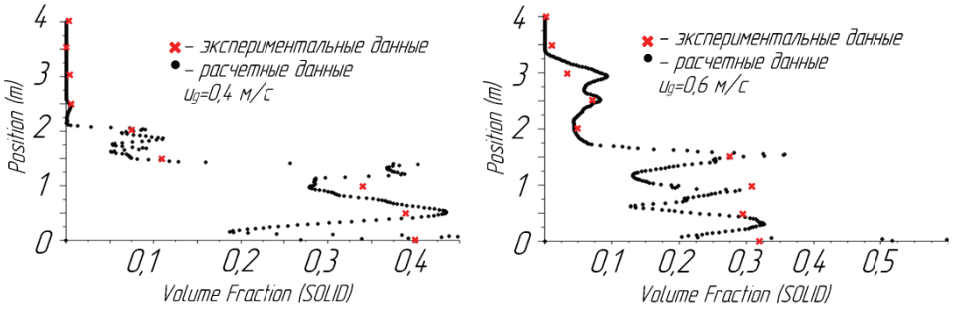
Четырехзонная модель сопротивления

Объемная доля газа	Модель, взятая за основу	Коэффициент сопротивления
$\le 0{,}80$	Ergun	$\beta_1 = 150\frac{\mu_g(1-\alpha_g)\alpha_p}{\alpha_g(d_p^*)^2} + 1{,}75\frac{\rho_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p^*}$
0,8…0,933	ZP	$\beta_2 = \frac{5}{72}C_D\frac{\rho_g\alpha_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p^*(1-\alpha_g)^{0,293}}$; $C_D = \begin{cases}\frac{24}{\mathrm{Re}_p^*}\left(1+0{,}15\mathrm{Re}_p^{*0,867}\right) & (\mathrm{Re}\le 1000);\\ 0{,}44 & (\mathrm{Re}>1000);\end{cases}$ $\mathrm{Re}_p^* = \frac{\alpha_g\alpha_p d_p^*\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{\mu_g}$
0,933…0,990	Wen & Yu	$\beta_3 = \frac{3}{4}C_D\frac{\rho_g\alpha_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p}\alpha_p^{-2,65}$
0,99…1,00	Schiller & Naumann	$\beta_4 = \frac{3}{4}C_D\frac{\rho_g\alpha_p\lvert\vec{u}_p-\vec{u}_g\rvert}{d_p}$; $C_D = \begin{cases}\frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1+0{,}15\mathrm{Re}_p^{0,687}\right) & (\mathrm{Re}_p\le 1000)\\ 0{,}44 & (\mathrm{Re}_p>1000)\end{cases}$

Данная модель использует четыре модели расчета в зависимости от объемной доли газа α_g в каждой ячейке. Она включает плотную ($\alpha_g \le 0{,}80$), субплотную ($\alpha_g = 0{,}8\ldots0{,}933$), субразбавленную ($\alpha_g = 0{,}933\ldots0{,}990$) и разбавленную ($\alpha_g = 0{,}99\ldots1{,}00$) зоны. Поскольку изменения коэффициента лобового сопротивления в этой системе проходят ступенчато (от одной формуле к другой), то могут наблюдаться проблемы с численной сходимостью. Чтобы решить эту проблему, необходимо использовать корреляционное уравнение со специальным сшивающим коэффициентом φ. Для реализации данной математической модели была создана пользовательская функция UDF на языке программирования C.

Формулы для расчета корреляционного уравнения и сшивающего коэффициента предоставлены ниже:

$$\beta = (1-\varphi_1)\beta_1 + \varphi_1\left((1-\varphi_2)\beta_2 + \varphi_2\left((1-\varphi_3)\beta_3 + \varphi_3\beta_4\right)\right); \quad (8)$$



а) *б*)

Рис. 6. Профиль распределения твердой фракции по высоте колонны при различных скоростях газовой фазы:

а – u_g = 0,4 м/с; *б* – u_g = 0,6 м/с

$$\varphi_i = \frac{\arctan\left(150 \cdot 1{,}75\left(\alpha_g - \alpha_i\right)\right)}{\pi} + 0{,}5\,, \tag{9}$$

где $\alpha_i = \alpha_{1,2,3}$; $\alpha_1 = 0{,}8$; $\alpha_2 = 0{,}933$; $\alpha_3 = 0{,}99$.

Результаты и обсуждения

Анализируя рисунок 3 видно, что при скорости газовой фазы u_g = 0,4 м/с на 5-й с моделирования происходит образование разбавленной фазы, а на 10-й с расчета – и плотная, и разбавленная фазы четко сформированы. При скорости газовой фазы u_g = 0,6 м/с наблюдаем аналогичную ситуацию. На рисунке 6 крестами отмечены экспериментальные данные, а точками – полученные расчетным путем. Наблюдаем практически идентичное распределение у модели и эксперимента, что показывает корректность проведенного расчета процесса псевдоожижения. При начальной высоте слоя, равной 1 м, высота стабильного плотного слоя в первом случае (u_g = 0,4 м/с) примерно равна 1,25 м, а во втором случае (u_g = 0,6 м/с) – около 1,5 м. Средняя высота разбавленной фазы равна 0,5 и 1,75 м соответственно. Распределение объемных долей твердой фракции по фазам следующее: при u_g = 0,4 м/с в плотной фазе 0,37, в разбавленной 0,1; при u_g = 0,46 м/с в плотной фазе 0,3, в разбавленной 0,08.

Заключение

В работе исследованы встроенные в программу Ansys Fluent модели сопротивления: Syamlal–O'Brien и Gidaspow. Исследование показало, что модели не могут быть использованы для моделирования процесса псевдоожижения применительно к микросферическому катализатору каталитического крекинга. Также предложена и протестирована собственная, модифицированная модель сопротивления, соответствующая реальной картине распределения твердой фазы по объему расчетного аппарата. Четырехзонная модель расчета коэффициента сопротивления может быть использована для проектирования нового и усовершенствования действующего технологического оборудования, исключающего образования застойных зон и «узких» мест.

Список литературы

1. Беранек, Я. Техника псевдоожижения / Я. Беранек, Д. Сокол ; пер. с чешского В. Г. Айнштейна ; под ред. Н. И. Гельперина. – Москва : Гостоптехиздат, 1962. – 160 с.

2. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдоожижения / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша ; под ред. Н. И. Гельперина. – Москва : Химия, 1967. – 664 с.

3. Syamlal, M. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed / M. Syamlal, T. J. O'Brien // AIChE Symposium Series. – 1989. – Vol. 85, No. 1. – P. 22–31.

4. McKeen, T. Simulation and Experimental Validation of a Freely Bubbling Bed of FCC Catalyst / T. McKeen, T. Pugsley // Powder Technology. – 2003. – Vol. 129, No. 1-3. – P. 139–152. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00294-2

5. Gidaspow, D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description / D. Gidaspow. – New York : Academic Press, 1994. – 467 p.

6. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed Risers: A Review / F. Berruti, J. Chaouki, L. Godfroy, T. S. Pugsley, G. S. Patience // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1995. – Vol. 73. – P. 579–602. doi: 10.1002/CJCE.5450730502

Research and Improvement of Interfacial Resistance Models for Numerical Simulation of Fluidized Bed

© A. V. Sazhin[1] ✉, I. S. Gudanov[1], D. S. Dolgin[1], A. A. Vatagin[1], A. E. Lebedev[1]

[1] *Department of Technological Machines and Equipment, sasha-sazhin@inbox.ru; Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: computational fluid dynamics; catalyst; mathematical model; fluidization; simulation.

Abstract: The study aims to improve computational fluid dynamics methods for modeling fluidization processes. A comparative analysis of built-in resistance models implemented in the Ansys Fluent software package has been conducted. Based on experimental data and known theoretical relationships, an improved model of interfacial interaction has been developed. The main advantage of this model is its ability to reproduce a realistic phase distribution in a fluidized bed. The practical significance of the model has been demonstrated through the simulation of fluidization of a microspherical catalyst for catalytic cracking in a cylindrical apparatus.

References

1. Beranek Ya., Sokol D.; Gel'perin N.I. (Ed.), *Tekhnika psevdoozhizheniya* [Fluidization Technique], Moscow: Gostoptekhizdat, 1962, 160 p. (In Russ.)

2. Gel'perin N.I. (Ed.), Aynshteyn V.G., Kvasha V.B. *Osnovy tekhniki psevdoozhizheniya* [Fundamentals of Fluidization Technique], Moscow: Khimiya, 1967, 664 p. (In Russ.)

3. Syamlal M., O'Brien T.J Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed, *AIChE Symposium Series*, 1989, vol. 85, no. 1, pp. 22-31.

4. Gidaspow D. *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description*, New York : Academic Press, 1994, 467 p.

5. McKeen T., Pugsley T. Simulation and Experimental Validation of a Freely Bubbling Bed of FCC Catalyst, *Powder Technology*, 2003, vol. 129, no. 1-3, pp. 139-152. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00294-2

6. Berruti F., Chaouki J., Godfroy L., Pugsley T.S., Patience G.S. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed Risers: A Review, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1995, vol. 73, pp. 579-602. doi: 10.1002/CJCE.5450730502

Forschung und Verbesserung von Grenzflächenwiderstandsmodellen für die numerische Simulation des Fließbetts

Zusammenfassung: Ziel dieser Studie ist die Verbesserung von CFD-Methoden (Computational Fluid Dynamics) zur Modellierung von Fluidisierungsprozessen. Es ist eine vergleichende Analyse der in der Software Ansys Fluent implementierten Widerstandsmodelle durchgeführt. Basierend auf experimentellen Daten und bekannten theoretischen Zusammenhängen ist ein verbessertes Modell für die Phaseninteraktion entwickelt. Der Hauptvorteil des vorgeschlagenen Modells liegt in seiner Fähigkeit, eine realistische Phasenverteilung in einem Wirbelschichtbett abzubilden. Die praktische Relevanz des Modells ist am Beispiel der Simulation der Fluidisierung des mikrosphärischen Katalysators für das katalytische Cracken in einer zylindrischen Apparatur demonstriert.

Étude et amélioration des modèles de résistence interphasée pour la modélisation numérique de la couche pseudo-fluidisé

Résumé: L'étude vise à perfectionner les méthodes d'hydrodynamique numérique pour la modélisation des processus de liquéfaction pseudo-fluid. Est effecuée une analyse comparative des modèles de résistance intégrés, réalisés dans le logiciel Ansys Fluent. A la base des données expérimentales et des dépendances théoriques connues, est développé un modèle amélioré d'interaction interphasique. Le principal avantage du modèle proposé réside dans sa capacité à reproduire une répartition réaliste des phases dans une couche pseudo-liquide. Est démontrée la pertinence pratique du modèle par la simulation de la liquéfaction pseudo-liquide d'un catalyseur microsphérique pour le cracking catalytique dans un appareil cylindrique.

Авторы: ***Сажин Александр Валентинович*** – аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Гуданов Илья Сергеевич*** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование»; ***Долгин Дмитрий Сергеевич*** – старший преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Ватагин Александр Александрович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование»; ***Лебедев Антон Евгеньевич*** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация.