

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.10

УДК 66.047.59

Е.А. Шестаков, С.Х. Загидуллин, М.В. ТонковПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ АППАРАТОВ
С ВЗВЕШЕННЫМ ТРАНСПОРТИРУЕМЫМ СЛОЕМ
СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ**

Аппараты с взвешенным транспортируемым слоем (АВТС) относятся к новому перспективному оборудованию для сушки дисперсных материалов в многотоннажных химических и горно-химических производствах. Они работают в активном гидродинамическом режиме при фиктивных скоростях газа, приближающихся к скорости витания частиц среднего диаметра полидисперсного материала.

Гидродинамический режим, используемый в АВТС, занимает промежуточное положение между хорошо изученными режимами псевдооживления и пневмотранспорта, но заметно отличается от них и сравнительно мало изучен.

В настоящее время для получения данных для разработки конструкции экспериментальной установки, определения границ изучения гидродинамического режима в АВТС перспективным является использование средств вычислительной гидродинамики (CFD).

В связи с этим актуальным является рассмотрение основных подходов к моделированию движения двухфазных потоков (газ–твердое) во взвешенном транспортируемом слое, обоснование и выбор математической модели для расчетов этих аппаратов.

В данной работе рассмотрена классификация «имитационных» моделей в зависимости от их применения и описания взаимодействия фаз, выполнен анализ преимуществ и недостатков основных аналитических моделей, сделано обоснование выбора основной модели для описания гидродинамики в АВТС, обосновано применение программного продукта ANSYS CFX, имеющего универсальный CFD код.

С учетом особенностей использования ANSYS CFX с применением Eulerian-Eulerian multiphase flow и Particle Transport Modeling выполнено описание гидродинамики АВТС. Полученные результаты подтверждают работоспособность АВТС в заданных условиях процесса и геометрических размерах аппарата.

Ключевые слова: взвешенный транспортируемый слой, имитационные модели, модель дискретных частиц, континуальная модель, CFD–моделирование, ANSYS CFX.

E.A. Shestakov, S.H. Zagidullin, M.V. Tonkov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

RATIONALE FOR THE SELECTION OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR DESCRIPTION OF HYDRODYNAMICS OF APPARATUS WITH A WEIGHED TRANSPORTABLE LAYER BY MEANS OF COMPUTING HYDRODYNAMICS

Apparatus with a weighed transportable layer (AVTS) refer to a new perspective equipment for drying dispersed materials in multi-tonnage chemical and mining chemical plants. They operate in an active hydrodynamic regime at fictitious gas velocities approaching the velocity of the average particle diameter of a polydisperse material.

The hydrodynamic regime used in AVTS occupies an intermediate position between the well-studied processes of fluidization and pneumatic transport, but differs markedly from them and is comparatively little studied.

At present, promising is the use of computer fluid dynamics (CFD) tools to obtain preliminary data necessary for developing the design of an experimental setup, determining the boundaries of the study of the hydrodynamic regime in AVTs.

In this regard, it is relevant to consider the main approaches to modeling the motion of two-phase flows (gas-solid) in the suspended layer, the rationale and choice of a mathematical model for calculating apparatus with a weighed transportable layer.

In this paper, we consider the classification of "simulation" models depending on the place of application and the description of the phase interaction, analysis of the advantages and disadvantages of the main analytical models, substantiate the choice of the basic model for description of hydrodynamics in AVTS, select the software product ANSYS CFX, CFD code.

Taking into account the peculiarities of using ANSYS CFX with the application of "Eulerian-Eulerian multiphase flow" and "Particle Transport Modeling" models, the description of hydrodynamics of AVTS was performed. The obtained results confirm the AVTS operation in the given process conditions and the geometric dimensions of the apparatus.

Keywords: *weighted transported layer, simulation models, discrete particles model, continuum model, CFD modeling, ANSYS CFX.*

Одним из перспективных аппаратов для сушки дисперсных материалов в многотоннажных химических и горно-химических производствах является аппарат с взвешенным транспортируемым слоем (АВТС) [1, 2]. Схема такой сушилки представлена на рис. 1. На верти-

кальную рабочую камеру 5, снабженную газораспределительной решеткой 6, подается исходный материал. Верхняя часть камеры заканчивается сепарационной зоной, снабженной системами продуктовыделения и пылеулавливания.

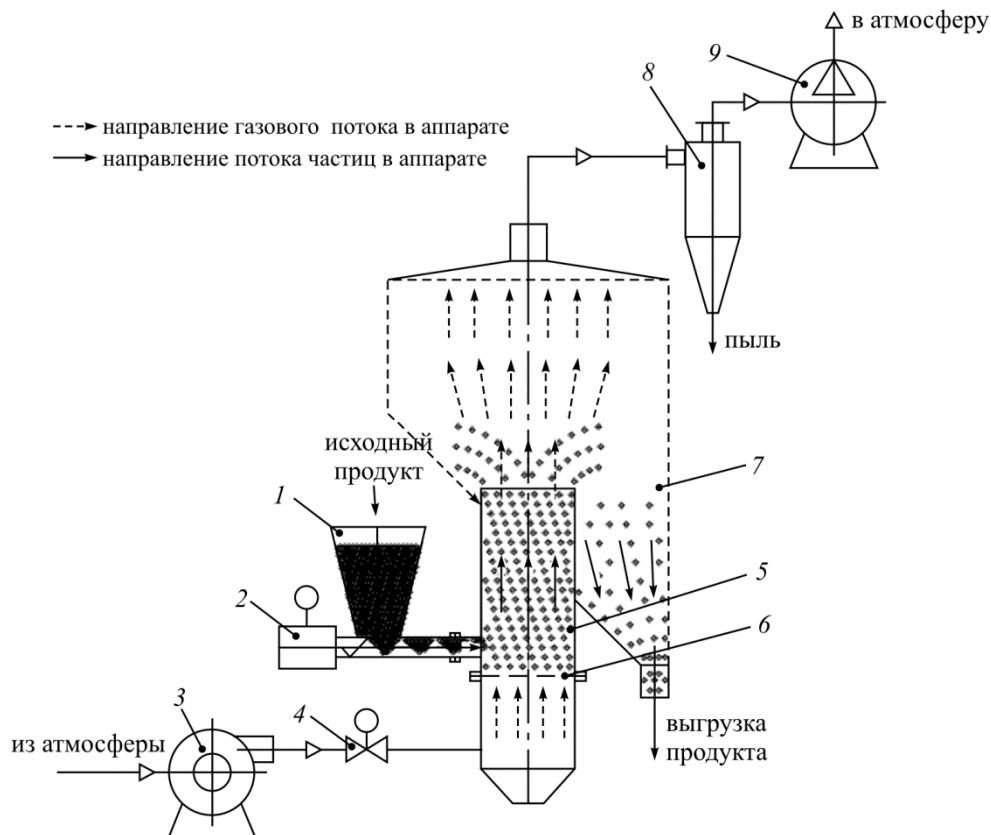


Рис. 1. Схема аппарата с взвешенным транспортируемым слоем:

1 – бункер; 2 – питатель; 3 – воздуходувка; 4 – регулирующее устройство; 5 – рабочая камера; 6 – газораспределительная решетка; 7 – сепарационная зона; 8 – циклон; 9 – вентилятор

Струи газового теплоносителя, выходящие из решетки, ожидают и транспортируют частицы материала в сепарационную зону. При этом поступление исходного материала на решетку и вытеснение его вверх осуществляется равномерно, без эффектов фонтанирования и поршнеобразования.

АВТС также характеризуются простотой конструкции, но при этом выгодно отличаются *значительно* меньшей высотой, по сравнению с ПТ, и имеют гораздо меньший диаметр, чем сушилки ПС. Вме-

сте с тем они обеспечивают практически одинаковое время пребывания частиц материала в зоне сушки.

В связи с тем, что гидродинамический режим в АВТС существенно отличается от режимов, используемых в ПТ и ПС, в данной работе была поставлена задача рассмотреть существующие в настоящее время подходы к моделированию движения двухфазных потоков (газ–твердое) (во взвешенном слое), а также обосновать выбор модели для описания гидродинамического режима в АВТС современными средствами вычислительной гидродинамики.

Основные подходы к моделированию движения двухфазных потоков (газ–твердое) во взвешенном слое

Подход к моделированию движения двухфазных потоков в значительной мере определяется интенсивностью взаимодействия фаз друг с другом и зависит от объемной доли твердой фазы в потоке [4, 5, 7].

При объемной доле твердых частиц менее 10^{-6} частицы не оказывают влияние на движение газового потока. С увеличением объемной доли твердых частиц до 10^{-3} наблюдается взаимодействие между газом и частицами, но при этом движение отдельных частиц считается независимым друг от друга [4]. При более высоких концентрациях твердых частиц в потоке возникают взаимодействия между частицами, а также между частицами и стенками аппарата, приводящие к изменениям движения газовой фазы.

В процессе изучения гидродинамики дисперсного материала во взвешенном слое сформулировано и уточнено несколько модельных подходов, отличающихся друг от друга способом рассмотрения взаимодействующих фаз и связью между ними. В работе [6] представлена классификация «имитационных» моделей в зависимости от места их применения и описания взаимодействия фаз (таблица). По мнению авторов [3–7], наибольшее практическое значение для моделирования взвешенного слоя имеют модель дискретных частиц (DPM) и континуальная модель (TFM), основным отличием между которыми является описание движения дискретных частиц, а общей проблемой является составление замыкающих соотношений и, в частности, определение механического взаимодействия фаз.

Движение газовой фазы для модели дискретных частиц (DPM) или эйлерово-лагранжевой модели решаются в эйлеровой постановке, как континуум в неподвижной системе координат, а движение частиц

описывается лагранжевыми уравнениями в подвижной системе координат, которые интегрируются вдоль их траектории [3, 5].

Модель DPM, решаемая путем интегрирования уравнений движения частиц в известном поле скоростей несущего газа, позволяет получить статистическую информацию о движении отдельных частиц с учетом плотности, размера, формы и полидисперсности частиц [3]. Однако повсеместное применение модели DPM в ее полном виде для взвешенного слоя при больших концентрациях частиц ограничено ввиду сложности и большой продолжительности вычислений, выполняемых в несколько итераций [10, 11].

Классификация «имитационных» моделей

№ п/п	Название модели	Уравнение описания движения		Описание механизма взаимодействия фаз	Место применения модели (масштаб модели)
		газовой (сплошной) фазы	твердой (дисперсной) фазы		
1	Дискретная пузырьковая модель	Уравнение Лагранжа	Уравнение Эйлера	Уравнения, описывающие сопротивление пузырьков газа	Промышленность
2	Континуальная модель или модель двух жидкостей (континуумов)	Уравнение Эйлера	Уравнение Эйлера	Уравнения, описывающие сопротивления газового потока с учетом движения твердых частиц	Опытный аппарат
3	Модель дискретных частиц (неразрешенная)	Уравнение Эйлера (не решенное)	Уравнение Лагранжа		Лабораторные установки
4	Модель дискретных частиц (разрешенная)	Уравнение Эйлера (решенное)	Уравнение Лагранжа	Уравнения, одним из граничных условия которых является поверхность частиц	
5	Модель молекулярной динамики	Уравнение Эйлера	Уравнение Эйлера	Уравнения, описывающие упругие столкновения на поверхности частиц	Макроскопические исследования

В рамках континуальной модели или модели двух жидкостей (TFM) принимается, что размеры частиц и расстояния между ними несоизмеримы с размерами ограничивающего среду пространства. В этих условиях изменение концентрации дисперсной фазы в пространстве и во времени

осуществляется монотонно от какой-то начальной величины до конечной. Данная физическая модель позволяет представить дисперсную фазу как непрерывный континуум и использовать для описания взаимопроникающего движения фаз систему уравнений, содержащую для обеих фаз уравнения сохранения количества движения, массы и энергии [4, 12–14].

Континуальная модель (TFM) описывается похожими уравнениями движения газовой и дисперсной фазы, что позволяет применять одинаковые численные методы решения всей системы уравнений. По сравнению с DPM модели TFM при расчетах требуют меньшего количества итераций, а значит, являются более простыми. Однако использование моделей TFM требует знания отдельных параметров процесса, определяемых эмпирическим путем, что делает их менее точными. Кроме того, при применении возникают сложности в постановке граничных условий для дисперсной фазы на ограничивающих течение поверхностях. Результаты вычислений моделей TFM не позволяют получить информацию о движении отдельных частиц, учитывать вращение частиц и трение между ними [4, 6, 8].

Для устранения указанных недостатков моделей TFM в последние два десятилетия для изучения гидродинамики взвешенного слоя применяют подход моделирования реологии твердой фазы на основе кинетической теории газов, называемой кинетической теорией гранулированных потоков (KTGF). KTGF предполагает, что движение частицы гранулированного потока аналогично хаотическому движению молекул идеального газа, следовательно, к ним могут быть применены соответствующие законы физики, описывающие столкновения между частицами аналогично упругим столкновениям между молекулами газа. В литературе [15–20] приводится множество результатов расчетов гидродинамики взвешенного слоя выполненных с применением моделей TFM KTGF, имеющих хорошую сходимость с эмпирическими данными.

Вышеуказанное подтверждает перспективность использования моделей TFM и TFM KTGF для расчетов аппаратов с транспортируемым взвешенным слоем.

Обоснование выбора модели для моделирования АВТС средствами вычислительной гидродинамики

Для получения предварительных данных, необходимых при разработке конструкции АВТС, перспективно использовать средства вычислительной гидродинамики (CFD). CFD базируется на решениях ма-

тематических уравнений, описывающих движение потоков, и позволяет моделировать движение потоков жидкостей и газов с учетом передачи тепла или массы, фазовых превращений и химических реакций. К наиболее распространенным пакетам вычислительной гидродинамики, имеющим универсальный CFD код, относят следующие программные продукты ANSYS CFX, SolidWorks Flow Simulation, FLUENT, PHOENIX.

Приложения для автоматизированного проектирования ANSYS CFX, SolidWorks Flow Simulation, позволяют решать уравнения Навье–Стокса, которые формализованы в виде законов сохранения массы, энергии и импульса. При этом учитывается природа потока, режим течения, а также эмпирические зависимости, связывающие плотность, вязкость и теплопроводность потока с его температурой. Для решения конкретной задачи необходимо задать геометрию течения, а также начальные и граничные условия. При этом точность решения напрямую связана с параметрами вычислительной сетки: чем больше количество ячеек, тем выше точность. Указанные приложения позволяют не только генерировать вычислительную сетку автоматически, но и вручную оптимизировать ее, приспособив к элементам решаемой задачи, чтобы лучше их разрешить [8, 9].

Ограничением CFD-моделирования в программах Flow Simulation, FLUENT, PHOENIX является то, что они не оценивают сопротивление аппарата с присутствием частиц твердой фазы в потоке, а также не определяют гидродинамику отдельных частиц твердой фазы. Исходя из этого основное CFD-моделирование гидродинамики процесса в АВТС целесообразно выполнять в программе ANSYS CFX.

Для моделирования многофазного потока в ANSYS CFX доступны две различные модели: Eulerian-Eulerian multiphase flow и Particle Transport Modeling.

Модель Eulerian-Eulerian multiphase flow относится к континуальным моделям, описывающим движение фаз при помощи уравнения Эйлера.

В модели Particle Transport Modeling движение дисперсных частиц описывается уравнением Лагранжа, движение основной среды – уравнением Эйлера. В данной модели каждая частица взаимодействует с основной средой и другими частицами дискретно. Эта модель необходима для расчета поведения частиц, а также для отслеживания движения нескольких отдельных частиц в потоке основной фазы. Каждая

частица представляет собой образец частиц, которые имеют идентичное поведение. На основании поведения «отслеживаемых» частиц возможно составление описания усредненного поведения дисперсной фазы, получившее название Separated flow analysis.

Обе указанные модели в ANSYS CFX описывают многофазный поток, состоящий из двух и более компонентов. Каждый компонент (поток) может иметь свое собственное поле скоростей, а также другие характеристики или использовать общие характеристики многофазного потока. В многофазном потоке отсутствует смешивание компонентов на микро-скопическом уровне, между ними всегда имеется различимая граница раздела, учитывающаяся при расчете. Выбор одной из указанных моделей зависит от требуемых результатов моделирования процесса, а также допущений, которые можно сделать во время моделирования.

Ввиду того, что в аппарате с взвешенным транспортируемым слоем наблюдается средняя и высокая концентрация твердой фазы, основное моделирование гидродинамики процесса в ANSYS CFX необходимо осуществлять с применением Eulerian-Eulerian multiphase flow. Для определения отдельных характеристик потоков возможно применение Particle Transport Modeling.

Результаты моделирования АВТС средствами вычислительной гидродинамики

Некоторые результаты моделирования в ANSYS CFX с применением модели Eulerian-Eulerian multiphase flow приведены на рис. 2–5, с применением модели Particle Transport Modeling – на рис. 6, 7.

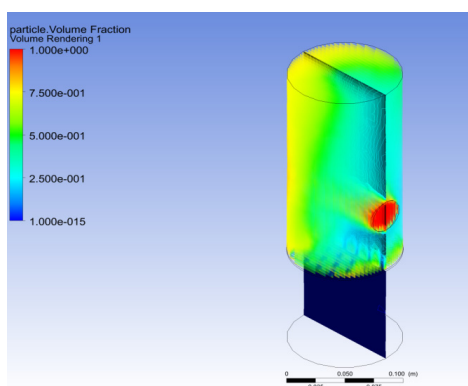


Рис. 2. Изменение доли твердых частиц в аппарате

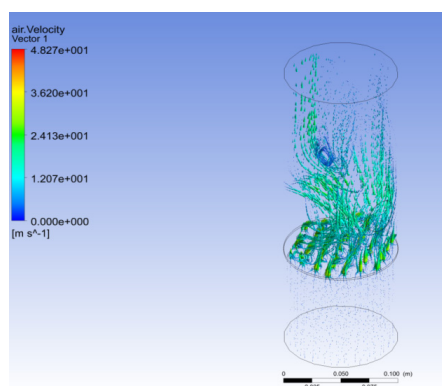


Рис. 3. Изменение скорости газа в аппарате

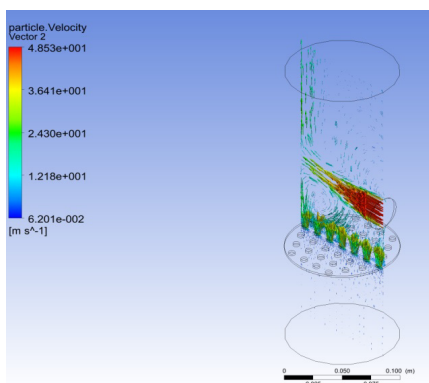


Рис. 4. Изменение скорости частиц в аппарате

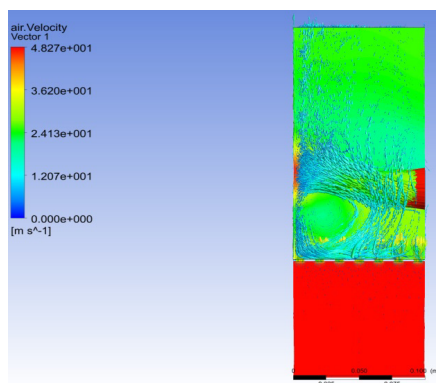


Рис. 5. Изменение скорости газового потока и твердых частиц на фоне изменения давления в аппарате

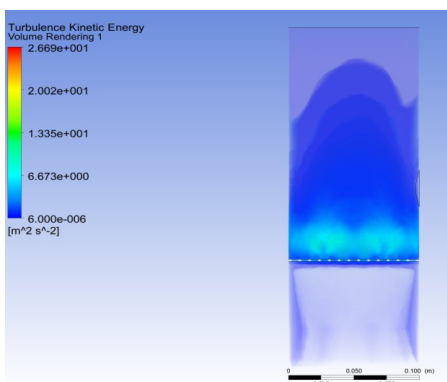


Рис. 6. Изменение кинетической энергии газового потока в аппарате

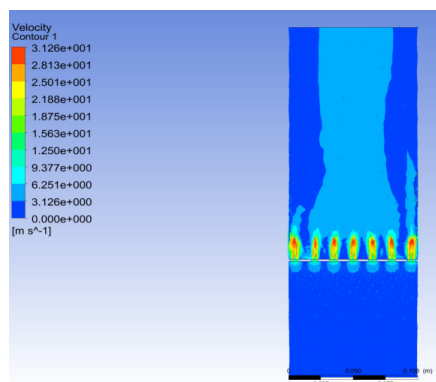


Рис. 7. Изменение скорости газа в аппарате

Выводы

Полученные результаты моделирования при помощи ANSYS CFX подтверждают правильность приведенных обоснований выбора модели для описания гидродинамики АВТС средствами вычислительной гидродинамики.

Использование данного программного продукта позволяет выполнить предварительный выбор диапазона исследований, установить границы существования устойчивого процесса и значительно сократить время на проведение экспериментальных исследований и установление необходимых зависимостей для расчета гидродинамики АВТС.

Список литературы

1. Новые конвективные сушилки для многотоннажных производств / А.А. Селиверстов, И.Е. Тимофеев, С.Х. Загидуллин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2014. – № 3. – С. 67–75.
2. Пат. 2529763 РФ, МПК F26B 17/10. Способ сушки дисперсного материала во взвешенно-транспортируемом слое и установка для его осуществления / И.Е. Тимофеев, Е.А. Шестаков, А.А. Селиверстов, С.Х. Загидуллин, С.А. Шестаков, И.И. Тимофеев. – № 2013136317/06; заявл. 01.08.2013.
3. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. – М.: Физматлит, 2003. – 192 с.
4. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
5. Schreiber M. Modellierung von Hydrodynamik und Wärmeübertragung in blasenbildenden Wirbelschichten zur Trocknung von Braunkohle: akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation. – Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus., 2013. – 167 p.
6. Numerical Simulation of Dense Gas-Solid Fluidized Beds: A Multiscale Modeling Strategy / M.A. van der Hoef, M. van Sint Annaland, N.G. Deen, J.A.M. Kuipers // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2008. – № 40. – P. 47–70.
7. Multiscale Modeling of Gas-Fluidized Beds / M.A. van der Hoef, M. Ye, M. van Sint Annaland, A.T. Andrews, S. Sundaresan, J.A.M. Kuipers // Advances in Chemical Engineering. – 2006. – № 31. – P. 65–149.
8. Elghobashi S. Particle-Laden Turbulent Flows: Direct Simulation and Closure Models // Applied Scientific Research. – 1991. – № 48. – P. 301–314.
9. Flow Simulation 2014 Technical Reference. – Dassault Systemes, 2014. – 204 p.
10. DEM-LES Study of 3-D Bubbling Fluidized Bed with Immersed Tubes / N.Gui, J.R.Fan, K. Luo // Chemical Engineering Science. – 2008. – Vol. 63, no. 14. – P. 3654–3663.
11. Numerical Simulation of Particulate Flow by the Eulerian-Lagrangian and the Eulerian-Eulerian Approach with Application to a

Fluidized Bed / M. Chiesa, V. Mathiesen, J.A. Melheim, B. Halvorsen // Computers & Chemical Engineering. – 2005. – Vol. 29, no. 2. – P. 291–304.

12. Gidaspow D., Ettehadieh B. Fluidization in Two-Dimensional Beds with a Jet – 2 Hydrodynamic Modeling // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. – 1983. – Vol. 22, no. 2. – P. 193–201.

13. Gidaspow D.I. Multiphase flow and fluidization Continuum and Kinetic Theory Descriptions. – San Diego: Academic Press Harcourt Brace & Company, 1994. – 467 p.

14. Протождконов И.О., Чесноков Ю.Г. Гидромеханика псевдоожигенного слоя. – Л.: Химия, 1982. – 264 с.

15. Ding J., Gidaspow D. A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow // AIChE Journal. – 1990. – Vol. 36, no. 4 – P. 523–538.

16. Comparative Analysis of CFD Models of Dense Gas-Solid Systems / van B.G.M. Wachem, J.C. Schouten; C.M. van den Bleek, R. Krishna, J.L. Sinclair // AIChE Journal. – 2001. – Vol. 47, no. 5. – P. 1035–1051.

17. Patil D.J. Critical Comparison of Hydrodynamic Models for Gas-Solid Fluidized Beds. – Part I: Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds Operated with a Jet / D.J. Patil, M. van Sint Annaland, J.A.M. Kuipers // Chemical Engineering Science. – 2005. – Vol. 60, no. 1. – P. 57–72.

18. Patil D.J. Critical Comparison of Hydrodynamic Models for Gas-Solid Fluidized Beds. – Part II: Freely Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds / D.J. Patil, M. van Sint Annaland, J.A.M. Kuipers // Chemical Engineering Science. – 2005. – Vol. 60, no. 1. – P. 73–84.

19. Experimental Validation of CFD Models for Fluidized Beds: Influence of Particle Stress Models, Gas Phase Compressibility and Air Inflow Models // K. Johansson, B.G.M. van Wachem, A.-E. Almstedt // Chemical Engineering Science. – 2006. – Vol. 61, no. 5. – P. 1705–1717.

20. Eulerian Two-Phase Flow Theory Applied to Fluidization / H. Enwald, E. Peirano, A.-E. Almstedt // International Journal of Multiphase Flow. – 1996. – Vol. 22, Suppl. 1 – P. 21–66.

References

1. Seliverstov A.A., Timofeev I.E., Zagidullin S.H. Novye konvektivnye sushilki dlya mnogotonagnych proizvodstv [New convective dryers for large-tonnage production]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2014, no. 3, pp. 67-75.

2. Timofeev I.E., Shestakov E.A., Seliverstov A.A., Zagidullin S.H., Shestakov S.A., Timofeev I.I. Sposob sushki dispersnogo materiala vo vzveshennom transportiruемом слое i ustanovka dlya ego osushestvleniya [A method for drying a particulate material in a suspended-transported layer and an installation for its implementation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2013136317/06 (2013).
3. Varaksin A.Yu. Turbulentnye techeniya gaza s tverdymi chasticami [Turbulent flows of gas with solid particles]. Moscow, Fizmatlit, 2003, 192 p.
4. Ostrovsky G.M. Pnevmaticheskiy transport sypuchih materialov v himicheskoy promyshlennosti [Pneumatic transport of loose materials in the chemical industry]. Leningrad, Khimiia, 1984, 104 p.
5. Schreiber M. Modellierung von Hydrodynamik und Wärmeübertragung in blasenbildenden Wirbelschichten zur Trocknung von Braunkohle: akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation. Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 2013. 167 p.
6. Hoef M.A. van der, Sint Annaland M. van, Deen N.G., Kuipers J.A.M. Numerical Simulation of Dense Gas-Solid Fluidized Beds: A Multiscale Modeling Strategy. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 40, pp. 47-70.
7. Hoef M.A. van der, Ye M., Annaland M. van Sint, Andrews A.T., Sundaresan S., Kuipers J.A.M. Multiscale Modeling of Gas-Fluidized Beds. *Advances in Chemical Engineering*, 2006, vol. 31, pp. 65-149.
8. Particle-Laden Turbulent Flows: Direct Simulation and Closure Models. S. Elghobashi. *Applied Scientific Research*, 1991, vol. 48, pp. 301-314.
9. Flow Simulation 2014 Technical Reference. Dassault Systemes, 2014, 204 p.
10. Gui N., Fan J.R., Luo K. DEM-LES Study of 3-D Bubbling Fluidized Bed with Immersed Tubes. *Chemical Engineering Science*, 2008, vol. 63, no. 14, pp. 3654-3663.
11. Chiesa M., Mathiesen V., Melheim J.A., Halvorsen B. Numerical Simulation of Particulate Flow by the Eulerian-Lagrangian and the Eulerian-Eulerian Approach with Application to a Fluidized Bed. *Computers & Chemical Engineering*, 2005, vol. 29, no. 2, pp. 291-304.
12. Gidaspow D., Ettehadieh B. Fluidization in Two-Dimensional Beds with a Jet – 2 Hydrodynamic Modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1983, vol. 22, no. 2, pp. 193-201.
13. Gidaspow D.I. Multiphase flow and fluidization Continuum and Kinetic Theory Descriptions. San Diego: Academic Press Harcourt Brace & Company, 1994, 467 p.

14. Protodyakonov I.O., Chesnokov Yu.G. *Gidromekhanika psevdooigennogo sloya* [Hydromechanics of the fluidized bed]. Leningrad, Chemistry, 1982, 264 p.

15. Ding J., Gidaspow D. Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow. *AIChE Journal*, 1990, vol. 36, no. 4, pp. 523-538.

16. Wachem van B.G.M., Schouten J.C., Bleek C.M. van den, Krishna R., Sinclair J.L. Comparative Analysis of CFD Models of Dense Gas-Solid Systems. *AIChE Journal*, 2001, vol. 47, 5, pp. 1035-1051.

17. Patil D.J., van Sint Annaland M., Kuipers J.A.M. Critical Comparison of Hydrodynamic Models for Gas-Solid Fluidized Beds – Part I: Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds Operated with a Jet. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, 1, pp. 57-72.

18. Patil D.J., Annaland M. van Sint, Kuipers J.A.M. Critical Comparison of Hydrodynamic Models for Gas-Solid Fluidized Beds – Part II: Freely Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, 1, pp. 73-84.

19. Johansson K., Wachem B.G.M. van, Almstedt A.-E. Experimental Validation of CFD Models for Fluidized Beds: Influence of Particle Stress Models, Gas Phase Compressibility and Air Inflow Models. *Chemical Engineering Science*, 2006, vol. 61, 5, pp. 1705-1717.

20. Enwald H., Peirano E., Almstedt A.-E. Eulerian Two-Phase Flow Theory Applied to Fluidization. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, vol. 22, Suppl.1, pp. 21-66.

Получено 23.10.2017

Об авторах

Шестаков Евгений Александрович (Пермь, Россия) – аспирант, кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shestakov180180@gmail.com).

Загидуллин Сафар Хабибуллович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mapp@pstu.ru).

Тонков Михаил Владимирович (Пермь, Россия) – магистрант, кафедры «Машины и аппараты производственных процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mtonkov159@gmail.com).

About the authors

Evgeniy A. Shestakov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Department of «Machinery and equipment manufacturing processes», Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: shestakov180180@gmail.com).

Safar H. Zagidullin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Machinery and equipment manufacturing processes», Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: mapp@pstu.ru).

Mihail V. Tonkov (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student of the 2 year of study, Department of «Machinery and equipment manufacturing processes», Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: mtonkov159@gmail.com).