Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 10–17.
Cherepovets State University Bulletin, 2022, no. 1 (106), pp. 10–17.

Научная статья
УДК 536.423:532
https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-1

Численное моделирование газожидкостного потока на основе Эйлерова подхода

Айдар Ахатович Валеев[1]✉, Борис Александрович Снигерев[2]

[1,2]ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия,
[1]valei93@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-2084-9813
[2]snigerev@imm.knc.ru, https://orcid.org/0000-0003-2134-3355

Аннотация. В статье рассматривается задача внедрения монодисперсного пузырькового потока в жидкость при различных скоростях. Представлены результаты численного моделирования структуры двухфазного течения газожидкостной пузырьковой смеси в вертикальном прямоугольном канале. Математическая модель основана на использовании Эйлерова описания сохранения массы, количества движения для жидкой и газовой фаз, записанных в рамках теории взаимодействующих континуумов. Установлена зависимость водяного столба от скорости потока. Получена структура смешения сред.

Ключевые слова: многофазные среды, пузырьковые колонны, численное моделирование

Для цитирования: *Валеев А. А., Снигерев Б. А.* Численное моделирование газожидкостного потока на основе Эйлерова подхода // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 10–17. https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-1.

Numerical modeling of gas-liquid flow based on the Euler approach

Aidar A. Valeev[1]✉, Boris A. Snigerev[2]

[1, 2]IME – Subdivision of FIC KazanSC of RAS, Kazan, Russia,
[1]valei93@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0003-2084-9813
[2]snigerev@imm.knc.ru, https://orcid.org/0000-0003-2134-3355

Abstract. The authors consider the problem of introducing a monodisperse bubbly flow into a liquid at different speeds; present the numerical simulation results for the structure of a two-phase flow of a gas-liquid bubble mixture in a vertical rectangular channel. The mathematical model is based on the Euler description of the mass conservation, momentum for the liquid and gas phases, written within the theory of interacting continua. The dependence of the water column on the flow rate has been established and the structure of media mixing has been obtained.

Keywords: multiphase media, bubble columns, numerical modeling

For citation: Valeev A. A., Snigerev B. A. Numerical modeling of gas-liquid flow based on the Euler approach. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 1 (106), pp. 10–17. (In Russ.). https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-1.

© Валеев А. А., Снигерев Б. А., 2022

Введение

Газожидкостные потоки очень распространены в химической, фармацевтической, пищевой и биохимической промышленности. Многие газожидкостные реакции, такие как окисление, гидрирование, галогенирование и биологическое брожение, обычно выполняются в аэрированных реакторах с перемешиванием и барботажных колоннах, которые в типичных условиях работы генерируют турбулентные полидисперсные многофазные потоки. Турбулентность необходима для обеспечения оптимальных скоростей передачи импульса, тепла и массы[1].

Существуют различные подходы к численному моделированию многофазных потоков: прямое численное моделирование (DNS), лагранжевое отслеживание частиц и многофазное моделирование. В данном исследовании используется многофазное моделирование, где обе фазы рассматриваются как взаимопроникающие континуумы и поэтому имеют одинаковые базовые уравнения непрерывности (неразрывности) и моментов[2].

Основная часть

В работе рассматривается двухфазное трехмерное газожидкостное течение в элементе колонного аппарата (см. рис. 1). Представлена расчетная область, которая являет собой вертикальный сосуд прямоугольного сечения, изначально на ¾ заполненный жидкостью, в его основании выделена прямоугольная область вдува газа. На границе раздела фаз образуется свободная поверхность, выше – открытый участок для свободного выхода газа.

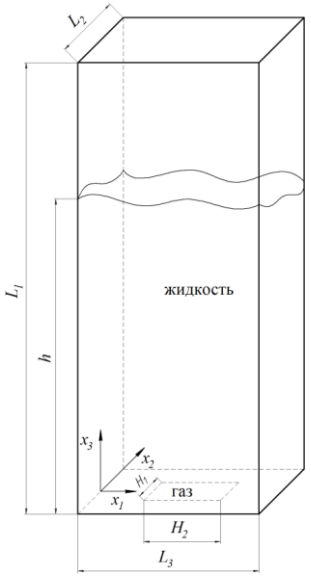

Рис. 1. Расчетная схема элемента колонного аппарата

[1] Броунштейн Б. И., Щеголев В. В. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах. Ленинград: Химия, 1988. 336 с.

[2] Седов Л. И. Механика сплошной среды: в 2 т. Санкт-Петербург: Лань, 2004. Т. 1.

В колонну в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами L_1 = 0,8 м, L_2 = 0,05 м, L_3 = 0,2 м, заполненную жидкостью на высоту h = 0,6 м, через входное сечение со сторонами H_1 = 0,025 м и H_2 = 0,05 м подается поток газожидкостной смеси α_g = 0,1, где α_g – коэффициент объемной концентрации газа. Характеристики плотности (ρ) и динамического коэффициента вязкости (μ) каждой из фаз постоянны.

Эксперименты проводились на двух расчетных сетках (со 100 тыс. и 500 тыс. ячеек); для отработки задачи, получения адекватных результатов и экономии временных ресурсов использовалась сетка со 100 тыс. ячеек.

Для математического описания пространственного движения двухфазной среды применяется Эйлеров подход, основанный на модели взаимопроникающих и взаимодействующих континуумов; он характеризует условия разделенного движения фаз и позволяет определить величины, отражающие межфазное взаимодействие. Динамика газожидкостного потока описывается уравнением неразрывности и системой уравнений Навье – Стокса[1].

Индексы l относятся к жидкости, g – к газу, т. е. α_l – объемная концентрация жидкости, α_g – газа. Двухфазный пузырьковый поток рассматривается как система с одним давлением.

Приведем систему уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l\rho_l)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_l\rho_l V_{l,j})=0;(\alpha_g\rho_g)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_g\rho_g V_{g,j})=0;\alpha_l+\alpha_g=1;i,j=1,2,3; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_m\rho_m V_{m,j})+\frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_m\rho_m V_{m,i}V_{m,j})=$$

$$-\alpha_m\frac{\partial P}{\partial x_i}+\alpha_m\rho_m g_i+M_{m,i}+\frac{\partial}{\partial x_j}[\alpha_m\mu_{eff,m}(\frac{V_{m,i}}{\partial x_j}+\frac{V_{m,j}}{\partial x_i})]-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_m\mu_{eff,m}\frac{V_{m,n}}{\partial x_n}\delta_{ij}), \quad (2)$$

где t – время; ρ_l, ρ_g – плотности сплошной и газовой фаз; α_l, α_g – объемная концентрация несущей и дисперсной фаз соответственно; g_i – сила тяжести; δ_{ij} – символ Кронекера; $V_{m,i}$ – компоненты скорости m фазы; $M_{m,i}$ – силы межфазного взаимодействия m фазы, P – давление; $\mu_{eff,m}$ – эффективная динамическая вязкость m фазы.

Далее по формуле (3) определяется эффективная вязкость $\mu_{eff,m.}$ Для описания турбулентных характеристик газожидкостного потока применяется расширенная двухпараметрическая модель турбулентности k – ε, модифицируемая для двухфазных сред, посредством которой рассчитывается кинетическая энергия турбулентности k и скорости диссипации жидкой фазы ε. Вязкость вычисляется на основе сведений о динамической вязкости несущей среды μ_l, турбулентной вязкости $\mu_{t,l}$, вязкости $\mu_{BI,l}$, определяющей дополнительную диссипацию за счет пульсационного движения пузырьков.

$$\mu_{eff,l}=\mu_l+\mu_{t,l}+\mu_{BI,l}, \quad (3)$$

[1] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. Москва: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.

$$\mu_{t,l} = \frac{C_\mu \rho_l k_l^2}{\varepsilon_l}, \mu_{BI,l} = C_{\mu b} \alpha_l \rho_l d_s \, | V_{gi} + V_{li} \, |, \mu_{eff,g} = \frac{\rho_g}{\rho_l} \mu_{eff,l}, C_{\mu b} = 0,6.$$

Двухпараметрическая модель турбулентности k – ε представлена далее.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l k_l) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_l \rho_l V_{l,i} k_l) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_l \frac{\mu_{eff,l}}{\sigma_l} \frac{\partial k_l}{\partial x_j} \right) + \alpha_l (G_l - \rho_l \varepsilon); \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \varepsilon_l) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_l \rho_l V_{l,i} \varepsilon_l) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_l \frac{\mu_{eff,l}}{\sigma_l} \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial x_j} \right) + \alpha_l \frac{\varepsilon_l}{k_l} (C_{\varepsilon_1} G_l - C_{\varepsilon_2} \rho_l \varepsilon), \quad (5)$$

где $G_l = \frac{1}{2} \mu_{eff,m} \left[\frac{V_{m,i}}{\partial x_j} + \left(\frac{\partial V_{m,j}}{\partial x_i} \right)^T \right]^2$.

Значения постоянных коэффициентов таковы: C_μ = 0,09, C_{ε_1} = 1,44, C_{ε_2} = 1,92, σ_{ε_1} = 1,0.

Связь турбулентной вязкости с двухпараметрической моделью турбулентности k – ε (4)–(5) представлена в формуле Колмогорова (6):

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (6)$$

На вертикальных стенках канала используются граничные условия прилипания частиц вязкой жидкости к твердой стенке, на выходе из канала – граничное условие свободного выхода.

Силы межфазного взаимодействия $M_{l,i}$ и $M_{g,i}$ (7), в основе которых лежат сила сопротивления M^D, а также добавленные для расчета в алгоритм вращательно подъемная сила M^L и сила присоединенных масс M^{VM}, учитывающая предысторию потока, рассчитываются по формуле:

$$M_{l,i} = -M_{g,i} = -(M_{g,i}^D + M_{g,i}^L + M_{g,i}^{VM}), \quad (7)$$

$$M_{g,i}^D = \frac{3}{4} \alpha_g \rho_l \frac{C_d}{d_s} \left| V_{gi} - V_{li} \right| (V_{gi} - V_{li}),$$

$$M_{g,i}^L = C_L \alpha_g \rho_l (V_{gi} - V_{li}) \cdot (\nabla \cdot V_{li}),$$

$$M_{g,i}^{VM} = C_{VM} \alpha_g \rho_l \left| \frac{\partial V_{li}}{\partial t} - \frac{\partial V_{gi}}{\partial t} \right|, \text{ где } C_{VM} = 0,5.$$

Кроме того, определим значения следующих показателей:

– коэффициент сопротивления частицы: $C_d = \begin{cases} \frac{24(1 + 0,15 Re^{0,687})}{Re}, Re < 1000, \\ 0,44, Re \geq 1000; \end{cases}$

– число Рейнольдса относительно движения фаз: $Re = 2\rho_l \left|V_{gi} - V_{li}\right| \frac{d_s}{\mu_l}$;

– коэффициент подъемной силы: $\begin{cases} min[0,288tahn(0,121Re);\ f(Eo_d)],\ Eo_d < 4, \\ f(Eo_d),\ 4 < Eo_d \le 10, \\ -0,29,\ Eo_d > 10, \end{cases}$

где $f(Eo_d) = 0,00105Eo_d^3 - 0,0159Eo_d^2 - 0,0204Eo_d + 0,474$; $Eo_d = g(\rho_l - \rho_g)\frac{d_s^2}{\sigma}$, где d_s – средний диаметр пузырьков; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Для численных расчетов использовался открытый пакет OpenFOAM, предназначенный для решения задач механики сплошных сред, и алгоритм twoPhaseEulerFoam, позволяющий решать задачи многофазных сред[1]. При работе с данной задачей варьировали скорости вдуваемого потока, тем самым оценивая влияние скорости вдува на структуру и характеристики перемешивания в указанном объеме, а также распределение поля скоростей и объемной концентрации сред.

Далее представлено сравнение структуры пузырькового шлейфа в момент времени t = 0,5 в центральном сечении канала x_2 = 0 м (см. рис. 2). Скорости вдува газожидкостной смеси на входе равны: 0,05 м/с (см. рис. 2а), 0,1 м/с (см. рис. 2б), 0,2 м/с (см. рис. 2в), 0,3 м/с (см. рис. 2г). На рисунке показаны значения коэффициента объемной концентрации α_g.

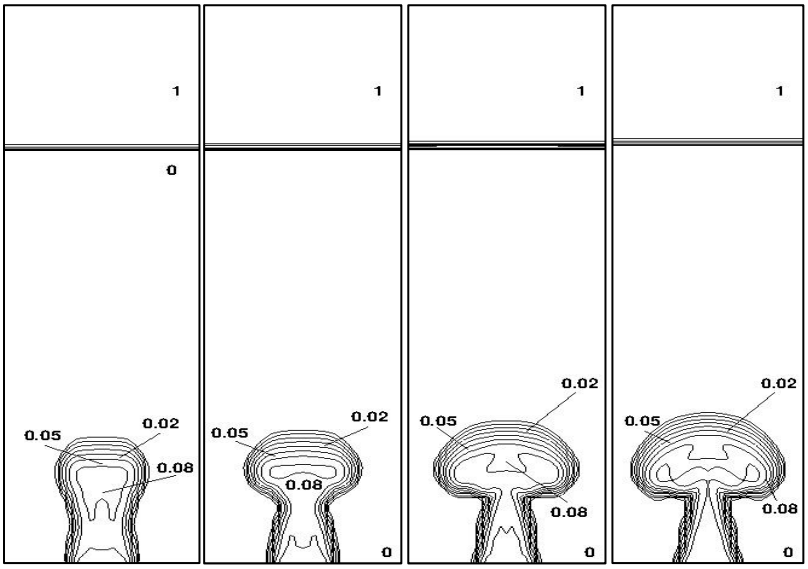

Рис. 2. Сравнение структуры пузырькового шлейфа в момент времени t = 0,5 с

[1] Weller H. G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A Tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented tecniques // Computers in Physics. 1998. Vol. 12, № 6. P. 620–631.

Газожидкостная смесь поднимается в центре колонны, увлекая жидкость вдоль канала. С течением времени образуется грибовидная структура, создающая более интенсивное перемешивание. В пристеночных областях канала было обнаружено зарождение зоны рециркуляции за счет вязкого трения смеси о стенки канала. Средняя фазовая доля газа составляет чуть более 1 %, а локально превышает 5 %.

Кроме того, отмечается влияние потока воздуха на период и амплитуду колебательного движения, не превышающую 0,05 м по оси x_1.

Наибольшая скорость сосредоточена в центре, она составляет более 1 м/с. В пристеночных зонах замечены обратные течения, которые образуют небольшие завихренности.

На рис. 4 представлено сравнение скоростей газа в потоке в момент t = 3с. Скорости вдува газожидкостной смеси на входе соответствуют графикам на изображении: 1 – 0,05 м/с; 2 – 0,1 м/с; 3 – 0,2 м/с; 4 – 0,3 м/с.

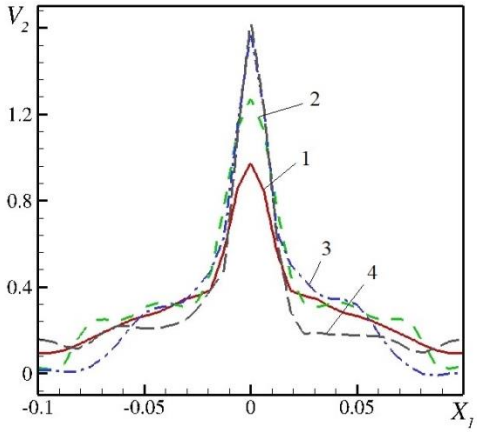

Рис. 4. Сравнение скоростей потока газа в смеси (сечение x_2 = 0)

Можно сделать вывод, что наблюдается нелинейное увеличение скорости газа, а также заметное наложение графиков в центре при скоростях 0,2 м/с и 0,3 м/с (это обусловливается торможением пузырьков газа силами сопротивления и силой Архимеда). Следовательно, дальнейшее увеличение скорости потока не так эффективно. Самые высокие значения скорости образуются в центре, низкие – в пристеночных областях.

Выводы

В результете проведенного исследования была усовершенствована и апробирована методика численного моделирования газожидкостных потоков. В ходе работы выполнены расчеты разных режимов пузырьковых течений при различных скоростях вдува газа на входе, выявлены особенности и закономерности для восходящих газожидкостных течений.

Список источников

Броунштейн Б. И., Щеголев В. В. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах. Ленинград: Химия, 1988. 336 с.

Губайдуллин Д. А., Снигерев Б. А. Численное моделирование турбулентного восходящего потока газожидкостной пузырьковой смеси в вертикальной трубе. Сравнение с экспериментом // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, вып. 1. С. 61–70.

Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. Москва: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.

Седов Л. И. Механика сплошной среды: в 2 т. Санкт-Петербург: Лань, 2004.

Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. Москва: Машиностроение, 1974. 211 с.

Jakobsen H. A. Chemical Reactor Modeling: Multiphase Reactive Flows: in 2 volumes. Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer, 2014.

Wang D.-Y., Jin N.-D., Han Y.-F., Wang F. Measurement of gas phase characteristics in vertical oil-gas-water slug and churn flows // Chemical Engineering Science. 2018. Vol. 177. P. 53–73.

Weller H. G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A Tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented tecniques // Computers in Physics. 1998. Vol. 12, № 6. P. 620–631.

References

Brounshtein B. I., Shchegolev V. V. *Gidrodinamika, masso- i teploobmen v kolonnykh apparatakh* [Hydrodynamics, mass and heat exchange in column apparatuses]. Leningrad: Khimiia, 1988. 336 p.

Gubaidullin D. A., Snigerev B. A. Chislennoe modelirovanie turbulentnogo voskhodiashchego potoka gazozhidkostnoi puzyr'kovoi smesi v vertikal'noi trube. Sravnenie s eksperimentom [Numerical simulation of the turbulent upward flow of a gas-liquid bubble mixture in a vertical pipe: comparison with experimental data]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 2018, vol. 56, iss. 1, pp. 61–70.

Nigmatulin R. I. *Dinamika mnogofaznykh sred: v 2 ch.* [Dynamics of multiphase media: in 2 parts]. Moscow: Nauka, 1987, part 1. 464 p.

Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoi sredy: v 2 t.* [Continuum mechanics: in 2 vols.]. St Petersburg: Lan', 2004.

Sternin L. E. *Osnovy gazodinamiki dvukhfaznykh techenii v soplakh* [Fundamentals of gas dynamics of two-phase flows in nozzles]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 211 p.

Jakobsen H. A. *Chemical Reactor Modeling: Multiphase Reactive Flows: in 2 volumes.* Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer, 2014.

Wang D.-Y., Jin N.-D., Han Y.-F., Wang F. Measurement of gas phase characteristics in vertical oil-gas-water slug and churn flows. *Chemical Engineering Science*, 2018, vol. 177, pp. 53–73.

Weller H. G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A Tensorial Approach to computational continuum mechanics using object-oriented tecniques. *Computers in Physics*, 1998, vol. 12, no. 6, pp. 620–631.

Сведения об авторах

Айдар Ахатович Валеев – аспирант; https://orcid.org/0000-0003-2084-9813, valei93@mail.ru, ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН (д. 2/31, ул. Лобачевского, 420111 г. Казань, Россия); **Aidar A. Valeev** – Postgraduate student; https://orcid.org/0000-0003-2084-9813, valei93@mail.ru, IME – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (2/31, ul. Lobachevskogo, 420111 Kazan, Russia).

Борис Александрович Снигерев – доктор технических наук; https://orcid.org/0000-0003-2134-3355, snigerev@imm.knc.ru, ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН (д. 2/31, ул. Лобачевского, 420111 г. Казань, Россия); **Boris A. Snigerev** – Doctor of Technical Sciences; https://orcid.org/0000-0003-2134-3355, snigerev@imm.knc.ru, IME – Subdivision of FIC KazanSC of RAS (2/31, ul. Lobachevskogo, 420111 Kazan, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.06.2021; одобрена после рецензирования 29.09.2021; принята к публикации 06.10.2021.

The article was submitted 23.06.2021; Approved after reviewing 29.09.2021; Accepted for publication 06.10.2021.