

03.4

Моделирование распределения дисперсной фазы при течении в цилиндрической области методами вычислительной гидродинамики

© А.С. Чернышев, А.А. Шмидт

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 мая 2019 г.

В окончательной редакции 1 октября 2019 г.

Принято к публикации 4 октября 2019 г.

Анализируется влияние величины диаметра заполненной водой цилиндрической области на структуру пузырькового полидисперсного потока. Численное моделирование течения основано на математической модели, использующей эйлерово-эйлеровский подход к описанию многофазных сред и включающей в себя гетерогенную модель MUSIG для описания полидисперсности, $k-\omega$ -SST-модель турбулентности, межфазный перенос импульса. Получены распределения пузырей в сечениях у аэратора и вблизи свободной поверхности. Выделены режимы пузырькового течения с полным и частичным заполнением области и определен переходный критерий.

Ключевые слова: численное моделирование, пузырьковые течения, газлифт, полидисперсность, переходный режим.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48861.17900

Потоки пузырьковых жидкостей в режиме газлифта характеризуются широким спектром фундаментальных процессов, протекающих в объемах фаз и на межфазных поверхностях, что делает моделирование таких течений актуальной задачей (см., например, обзор [1]). Примеры практического применения включают в себя, но не ограничивают течения в теплообменниках [2] и химические реакторы колонного типа [3]. Детальное разрешение структуры течения является необходимым условием для предсказания режимов работы таких установок.

При построении математической модели исследуемых течений ключевую роль играют выявление и описание доминирующих физических процессов. В частности, для корректного предсказания эволюции пузырькового облака и динамики несущей среды модель должна учитывать полидисперсность среды, турбулентность двухфазного потока и специфические черты силового взаимодействия фаз.

Математическая модель основана на эйлерово-эйлеровском подходе к описанию многофазных течений [4]. В рамках этого подхода каждая среда рассматривается как континуум, занимающий весь объем, при этом вводится понятие объемной доли фазы α . Сумма объемных долей всех фаз равна единице. Плотности континуумов вычисляются как $\rho_{l,b} = \alpha_{l,b} \rho_{l,b}^0$, где ρ^0 — реальная плотность вещества соответствующей фазы, подстрочный индекс l соответствует несущей жидкости, b — пузырям. В рамках разработанной модели учитывается полидисперсность пузырей, сжимаемость двухфазной среды, турбулентность потока и силовое межфазное взаимодействие. Математическая модель такого течения основана на уравнениях Навье–Стокса, дополненных уравнением сохранения численной концентрации пузырей N_b .

Полидисперсность учитывается в рамках гетерогенной многоклассовой модели распределения пузырей (heterogeneous MUSIG model [5]), в которой вводится M классов пузырей с кусочно-постоянным распределением по размерам. Для каждого класса пузырей i с радиусом R_{ib} записывается система уравнений Навье–Стокса, включающая члены, отвечающие за межфазный обмен импульсом и турбулентную дисперсию пузырей. В работе рассмотрены малые ($< 1\%$) суммарные объемные доли пузырей с характерными размерами, не превосходящими 0.5 mm. При таких значениях объемной доли расстояния между пузырями значительно больше характерных размеров пузырей, и явлениями дробления и коалесценции можно пренебречь.

Источниковый член S , отвечающий за силовое межфазное взаимодействие, включает в себя силу плавучести (Архимеда), силу трения (Стокса), поперечную силу (Сэффмана), силу присоединенных масс и силу стенки:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{ib} &= \mathbf{F}_{iB} + \mathbf{F}_{iD} + \mathbf{F}_{iL} + \mathbf{F}_{iWL} + \mathbf{F}_{iVM}, \\ \mathbf{S}_l &= - \sum_{i=1}^M (\mathbf{F}_{iD} + \mathbf{F}_{iL} + \mathbf{F}_{iWL} + \mathbf{F}_{iVM}), \\ \mathbf{F}_{iB} &= \alpha_{ib} (\rho_{ib} - \rho_l) \cdot \mathbf{g}, \\ \mathbf{F}_{iD} &= 3/8 \cdot \rho_l / R_{ib} \cdot C_{iD} \mathbf{V}_{irel} |\mathbf{V}_{irel}|, \quad \mathbf{V}_{irel} = \mathbf{V}_l - \mathbf{V}_{ib}, \\ \mathbf{F}_{iL} &= C_{iL} \alpha_{ib} \rho_l \mathbf{V}_{irel} \times \text{rot } \mathbf{V}_l, \\ \mathbf{F}_{iVM} &= 0.5 \alpha_{ib} \rho_l ((D_b \mathbf{V}_{ib}) / Dt - (D_l \mathbf{V}_l) / Dt), \\ \mathbf{F}_{iWL} &= -C_{iWL} \alpha_{ib} \rho_l |\mathbf{V}_{irel} - (\mathbf{V}_{irel} \cdot \mathbf{n}_W)|^2 \cdot \mathbf{n}_W. \end{aligned}$$

Здесь \mathbf{V} — скорость соответствующей фазы, \mathbf{n}_W — нормаль к ближайшей стенке, выражения для коэффициентов C_D , C_L и C_{WL} приведены в [4].

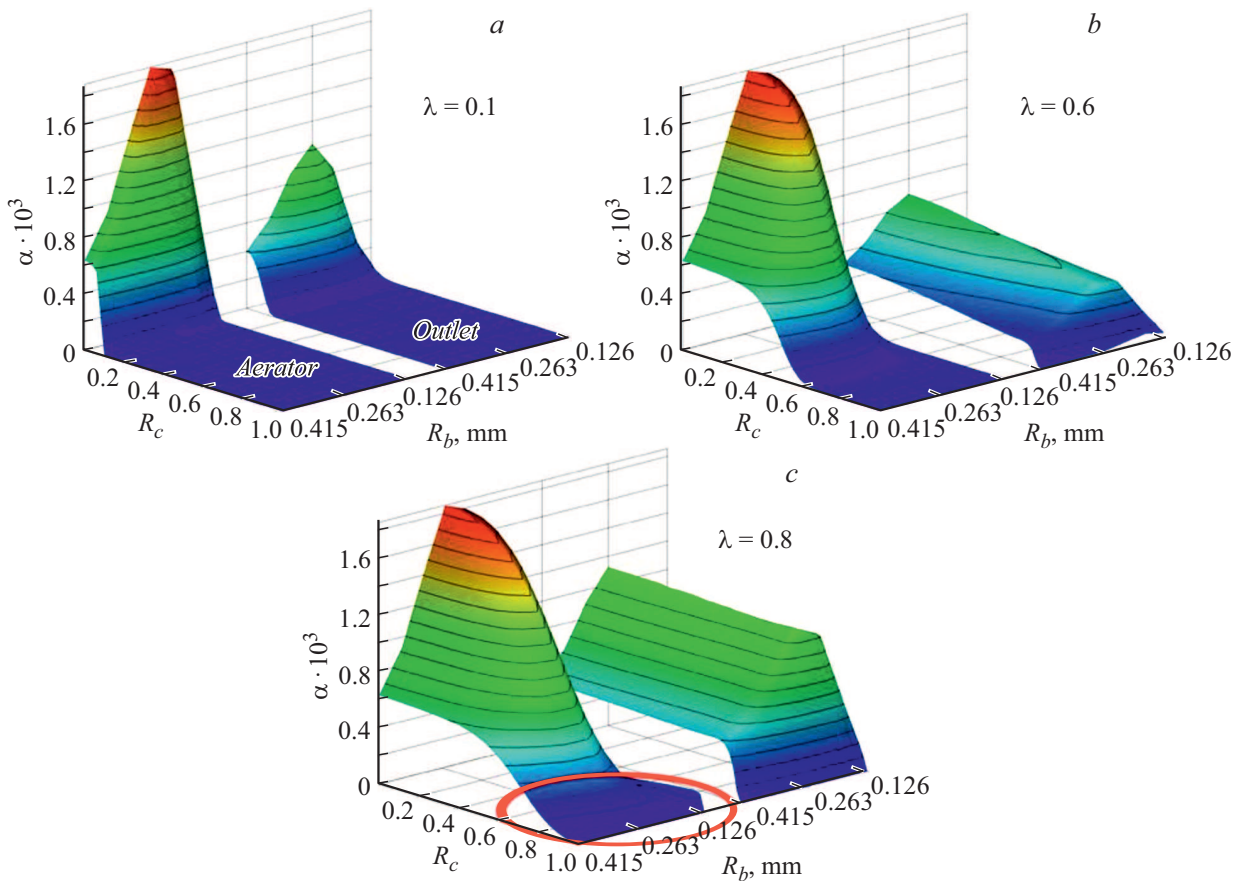


Рис. 1. Распределение объемной доли пузырей по радиусу расчетной области в зависимости от радиуса пузырька для значений $\lambda = 0.1$ (a), 0.6 (b) и 0.8 (c). Распределения представлены в сечениях, отстоящих от дна на 0.05 m (вблизи аэратора) и 0.55 m (у выходной границы свободной поверхности).

В случае турбулентного течения эффективная вязкость несущей среды может быть записана как сумма молекулярной μ_{lam} и турбулентной μ_{turb} вязкостей, а также дополнительного коэффициента вязкости μ_{vit} , возникающего из-за скоростной неравновесности фаз (см., например, обзор в [6]). Турбулентность несущей среды учитывается при помощи $k-\omega$ -SST-модели [7] с добавочными источниковыми членами, описывающими генерацию и диссипацию турбулентности в пузырьковом следе [6]:

$$S_{ibk} = 3/8 \cdot C_{iD}/R_{ib} \cdot \alpha_{ib}\rho_l|\mathbf{V}_{irel}|^3,$$

$$S_{ibo} = 0.8k/\mu_{turb} \cdot S_{ibk}.$$

Здесь k — кинетическая энергия турбулентности.

Помимо влияния пузырей на турбулентность учитывалось влияние турбулентности на движение пузырей за счет диффузионного переноса. Для этого в уравнения переноса объемной доли и численной концентрации пузырей включены дополнительные диффузионные слагаемые, отвечающие за дисперсию пузырей [8]:

$$D_{ib}(\alpha) = 1/Sc \cdot \nabla(\mu_{eff}/\rho_l \cdot \nabla\alpha_{ib}),$$

$$D_{ib}(N) = 1/Sc \cdot \nabla(\mu_{eff}/\rho_l \cdot \nabla N_{ib}).$$

Здесь Sc — число Шмидта.

Для численного решения уравнений, входящих в сформулированную модель, разработаны алгоритм моделирования и его программная реализация. Алгоритм основан на методе конечных объемов и неструктурированных сетках. Аппроксимация по пространственным переменным имеет второй порядок точности и проводится при помощи противопоточных схем, удовлетворяющих критерию TVD. Для расчета поля давления используется алгоритм SIMPLE с поправками, учитывающими многофазность.

Разработанный код был протестирован на задачах о движении многофазных пузырьковых сред [9].

Проводится численное моделирование газожидкостной среды в круглой осесимметричной области диаметром $D = 0.1-1$ m и высотой $h = 0.65$ m. Газ в виде полидисперсных пузырьков поступает в заполненную водой область через осесимметричный аэратор с фиксированным диаметром $d = 0.1$ m, установленный в нижней части, при всплытии пузырьки увлекают за собой несущую среду. Объемная доля пузырей на входе составляет 0.37% , приведенная скорость газа $V_G = 0.53$ mm/s, распределение пузырей по размерам соответствует логнормальному с наиболее вероятным радиусом пузырька $R_b = 0.25$ mm в диапазоне $0.1-0.45$ mm [10]. На верхней

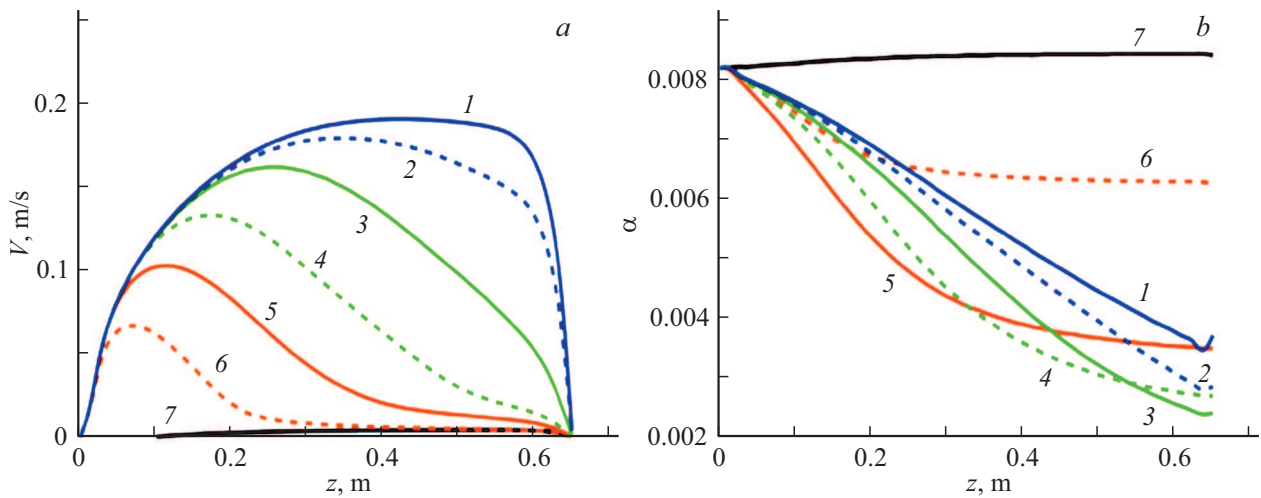


Рис. 2. Распределение аксиальной компоненты скорости несущей фазы (а) и суммарной объемной доли пузырей (b) вдоль оси симметрии. Значение $z = 0$ m соответствует положению аэратора. $\lambda = 0.1$ (1), 0.4 (2), 0.5 (3), 0.6 (4), 0.7 (5), 0.9 (6) и 1.0 (7).

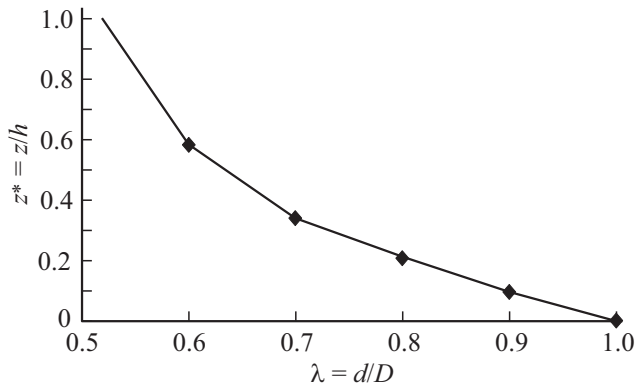


Рис. 3. Зависимость безразмерной координаты $z^* = z/h$ точки присоединения пузырьковой струи к стенке в зависимости от параметра λ .

границе расчетной области задается условие свободной поверхности, которое позволяет пузырькам покидать область. При моделировании вводится семь классов монодисперсных пузырей, что является достаточным для разрешения детальной структуры потока [11]. Давление и температура соответствуют нормальным условиям. Параметрическое исследование было проведено относительно безразмерного параметра $\lambda = d/D$.

Распределения объемных долей пузырей по радиусу расчетной области в зависимости от их размера представлены на рис. 1. Для всех вариантов, за исключением варианта $d = D$, отличительной чертой является выраженный максимум объемной доли вблизи аэратора, при приближении к свободной границе объемная доля пузырей падает. Это обусловлено ускорением потока в центре области, а также влиянием поперечных сил и турбулентной дисперсии, при этом интегральные величины сохраняются в каждом поперечном сечении. В случае равенства диаметров ($\lambda = 1$) пузыри заполняют

область равномерно начиная от аэратора, препятствуя возникновению осесимметричной струи. Распределение пузырей по размерам на оси симметрии сохраняет свою структуру для всех значений D .

Падение объемной доли при изменении параметра λ вблизи свободной поверхности немонотонно, что определяется несколькими факторами. При уменьшении диаметра (увеличении λ от 0.1 до 0.6) возрастает интенсивность дисперсии пузырей и поперечных сил, что приводит к большей заполненности области пузырьками и уменьшению максимума объемной доли у свободной поверхности до наименьшего значения при $\lambda \approx 0.6$. При дальнейшем снижении диаметра уменьшается площадь поперечного сечения, пузырьки препятствуют возникновению нисходящего потока вблизи стенки и скорость несущей среды снижается, что совместно приводит к росту объемной доли пузырей.

Распределение пузырьков у аэратора сохраняет локализованную структуру вблизи оси симметрии до $\lambda = 0.8$ (рис. 1, c). При $\lambda = 0.8$ меняется распределение пузырей по размеру вблизи стенки (область выделена овалом) со смещением максимума объемного содержания в область с $R_{ib} = 0.126$ mm, что связано с захватом пузырей малого размера нисходящим потоком жидкости вблизи стенки и их уносом в придонную область.

На рис. 2 представлено распределение продольной скорости несущей фазы (а) и объемной доли пузырей (b) на оси симметрии. С уменьшением диаметра области максимум скорости уменьшается и смещается в сторону аэратора. При больших λ на профиле скорости наблюдается участок вблизи свободной поверхности, на котором скорость жидкости близка к постоянной, что соответствует установившемуся равномерному распределению пузырей по радиусу области.

Выход на установившийся режим с равномерным распределением пузырей оценивался по зависимости безразмерной координаты точки присоединения границы

пузырьковой струи к стенке от λ (рис. 3). За границу струи принимается линия, на которой достигается объемное содержание пузырей, равное 50% от максимального в данном поперечном сечении. Как видно из рисунка, при $\lambda = 0.52$ пузырьковая струя полностью заполняет область у свободной границы.

Как видно из результатов, при больших величинах диаметра расчетной области пузырьковая струя локализована вблизи оси по всей высоте области. При уменьшении диаметра D (и увеличении λ) за счет поперечных сил, турбулентной дисперсии пузырьков и уноса на периферию пузырей силой Стокса вблизи свободной поверхности профиль становится заполненным, а распределение пузырей по радиусу области — равномерным для каждого класса. Присоединение пузырьковой струи к стенкам области наблюдается при значениях $\lambda > 0.52$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Vaidheeswaran A., Hibiki T.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115. P. 741–752.
- [2] *Pakhomov M.A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1268. P. 012054.
- [3] *Седов И.В., Макарян И.А., Берзигияров П.К., Магомедова М.В., Максимов А.Л.* // ЖПХ. 2018. Т. 91. В. 12. С. 1693–1707.
- [4] *Чернышев А.С., Шмидт А.А.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 12. С. 17–24.
- [5] *Frank Th., Zwart P.J., Krepper E., Prasser H.-M., Lucas D.* // Nucl. Eng. Design. 2008. V. 238. P. 647–659.
- [6] *Troshko A.A., Hassan Y.A.* // Int. J. Multiphase Flow. 2001. V. 27. P. 1965–2000.
- [7] *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* // Heat Mass Transfer. 2003. V. 4. P. 625–632.
- [8] *Sokolichin A., Eigenberger G.* // Chem. Eng. Sci. 1999. V. 54. P. 2273–2284.
- [9] *Chernyshev A.S., Schmidt A.A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 754. P. 032005.
- [10] *Lain S., Broder D., Sommerfeld M., Goz M.F.* // Int. J. Multiphase Flow. 2002. V. 28. P. 1381–1407.
- [11] *Чернышев А.С., Шмидт А.А.* // Тр. НИИСи РАН. 2018. Т. 8. № 6. С. 52–58.