

Численное моделирование влияния пузырьков на течение и теплоперенос в опускном газожидкостном течении в трубе¹

Пахомов М.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

В работе представлены результаты моделирования динамики течения, трения и теплообмена в опускном газожидкостном потоке в трубе. Математическая модель основана на использовании эйлерова описания для обеих фаз. Исследовано влияние изменения степени дисперсности газовой фазы на входе, объемного расходного газосодержания, начальной температуры жидкости и ее скорости на трение и теплоперенос в двухфазном потоке. Добавление газовой фазы вызывает возрастание теплообмена и трения на стенке, причем эти эффекты становятся более заметными с ростом газосодержания и диаметра пузырьков.

1. Введение

Двухфазные опускные пузырьковые потоки широко распространены в химической технологии, в теплоэнергетике, в атомной энергетике и т.д. Как показывают экспериментальные и численные исследования таких течений опускное пузырьковое течение имеет ряд особенностей по сравнению с восходящим.

Профиль локального газосодержания в опускном потоке характеризуется наличием области свободной от пузырьков около стенки, в турбулентном ядре течения он имеет практически постоянную величину концентрации газовых включений; в то время как в восходящем потоке наблюдается максимум газосодержания в пристенной части трубы. Наличие зоны практически свободной от пузырьков объясняется действием поперечных сил, таких как Сэффмена и турбофореза (турбулентного переноса). Скорость жидкости в опускном потоке может иметь локальный максимум, находящийся на некотором расстоянии от стенки канала. Интенсивность продольных пульсаций скорости жидкости в пристенной части трубы меньше соответствующей величины для однофазного потока, а в турбулентном ядре течения — наоборот. Подавление интенсивности пульсаций в пристенной области трубы объясняется тем, что пузырьки, покидая пристенную часть трубы, увеличивают толщину вязкого подслоя, и при этом разрушаются подковообраз-

ные турбулентные вихри. Генерация турбулентности жидкости в приосевой части трубы происходит из-за вихреобразования при обтекании сдвиговым потоком жидкости газовых включений.

В различных технических приложениях широко распространены газожидкостные потоки при наличии теплообмена между стенкой и двухфазной системой. Отметим, что пузырьковые вертикальные течения при наличии теплообмена между стенкой трубы и двухфазной системой исследованы в значительно меньшей степени, чем изотермические потоки. Выделим теоретические работы [1, 2, 7–9] и экспериментальные [3–6]. При этом [1, 2] посвящены описанию как восходящих, так и нисходящих течений, и только в работе [5] излагаются экспериментальные результаты изучения теплообмена в опускных потоках. Во всех вышеупомянутых работах в основном проводились исследования коэффициента теплообмена в зависимости от концентрации пузырьков. Показаны значительное увеличение теплопереноса и изменение турбулентной структуры течения жидкости при добавлении газовых включений.

Отметим, что опускные пузырьковые течения при наличии теплообмена между стенкой и потоком изучены недостаточно полно. Это относится, прежде всего, к влиянию размера воздушных пузырьков и газосодержания на структуру течения, гидравлическое сопротивление и теплоперенос при вариации числа Рейнольдса, что является особенно важным в инженерных приложениях. Данное исследование посвящено моделированию влияния добавле-

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 11-08-00112_a).

ния пузырьков размером $d = 0.5 - 2$ мм на структуру течения, поверхностное трение и теплоперенос в опускном турбулентном потоке жидкости в области небольших чисел Рейнольдса $Re = (0.5 - 7)10^4$, когда этот эффект проявляется в большей степени.

Целью данного исследования является проведение численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена, протекающих в опускных турбулентных газожидкостных течениях.

2. Описание математической модели

Численная модель основана на использовании эйлерова описания для жидкой и газовой фаз [12], что позволяет использовать примерно единый алгоритм численного решения при моделировании процессов переноса в обеих фазах. Применяется система осесимметричных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса для описания процессов переноса в обеих фазах [11]. Для замыкания системы уравнений осредненного движения использовалась низкорейнольдсовая $k - \epsilon$ модель турбулентности в модификации [13]. Авторами модель была модернизирована для описания динамики и теплопереноса в газожидкостном потоке с учетом силы аэродинамического сопротивления, эффекта присоединенной массы (силы Бассе), силы тяжести и Архимеда, силы Сэффмена, турбулентной гомогенной диффузии пузырьков и пристеночной силы. Используется модель переноса рейнольдсовых напряжений в дисперсной фазе по [12]. Уравнения пульсаций температуры и турбулентного потока теплоты пузырьков имеют вид [14]. Межфазная поверхность — это один из ключевых элементов для газожидкостных течений, т.к. обмен импульсом, массой и теплотой происходит через межфазную поверхность. В работе принимаются во внимание эффекты дробления и коагуляции пузырьков по уравнению баланса переноса пузырька с осредненным объемом v (УББПО) [15]. Первоначально модель [15] была разработана для пузырьковых колонн, но как показали наши расчеты, она может быть применена и для описания пузырьковых потоков при небольшой величине объемного расходного газосодержания $\beta \leq 0.1$. Модель получена из уравнения баланса популяции путем его упрощения и понижения порядка. Уравнение баланса популяции (УБП) используется при описании эволюции размера пузырьков в двухфазных течениях и пузырьковых колоннах. УБП состоит из уравнений переноса параметра функции плотности вероятности распределения пузырька f , m^{-6} .

По сути уравнение УББПО аналогично известному методу расчета межфазной поверхности [16, 17]. Оно служит для замены традиционной

карты режимов газожидкостных течений. Введение понятия осредненного объема пузырька позволяет перейти от более сложного УБП к упрощенному УББПО. Уравнение УББПО записано с учетом конвективного переноса, расширения пузырька газа за счет изменения его плотности (например, за счет межфазного теплообмена) и совместных эффектов дробления и коалесценции. Данное уравнение удобно для численной реализации в эйлеровых двухжидкостных моделях [15].

Использованная в работе методика численного решения подробно описана в [11]. Была применена неравномерная расчетная сетка в аксиальном и радиальном направлениях (сгущение расчетных узлов в районе стенки и в начальных сечениях трубы). Диаметр трубы равнялся $2R = 20$ мм, а длина расчетной области $L = 1$ м. Расчеты выполнены на сетке, содержащей 200×100 контрольных объемов. Сгущение узлов проводилось в окрестности стенки и во входной части трубы. Дополнительно были проведены расчеты на сетке, содержащей 300×200 КО. Первая расчетная ячейка располагалась на расстоянии от стенки $y_+ = 0.4$. В вязком подслое для корректного расчета параметров двухфазного потока содержалось не менее 10 КО.

3. Результаты численного моделирования и их обсуждение

Диаметр дисперсной фазы во входном сечении варьировался в диапазоне $d_1 = 0 - 2$ мм и он сохранялся постоянным только во входном сечении трубы. Далее размер вниз по потоку пузырьков в данной работе менялся за счет коалесценции и дробления. Скорость потока жидкости $U_1 = 0.4 - 3$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса потока $Re = U_1 2R / \nu = 6200 - 6 \times 10^4$. Объемное расходное газосодержание на входе изменялось в диапазоне $\beta = 0 - 0.1$.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов коэффициента трения C_f в двухфазном потоке в зависимости от числа Рейнольдса при различных значениях β (рис. 1) и диаметра пузырька (рис. 2). Расчет коэффициента трения производился по следующей зависимости:

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho U_1^2}.$$

Распределение относительной температуры жидкой фазы $\Theta = (T_w - T) / (T_w - T_c)$ по радиусу канала представлено на рис. 3, где T_w — температура стенки и T_c — температура жидкости на оси трубы. Возрастание начального диаметра пузырька приводит к увеличению заполненности профилей температуры в пристенной зоне, что

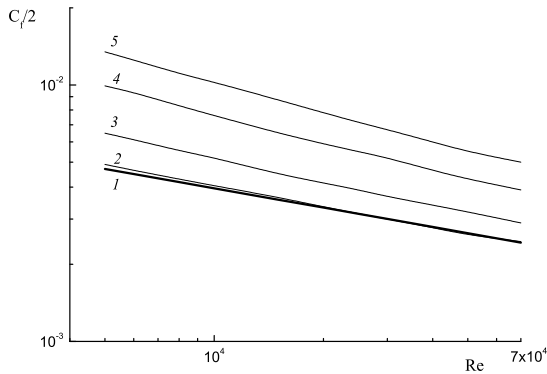


Рис. 1. Трение на стенке трубы как функция от числа Рейнольдса жидкой фазы при вариации объемного расходного газосодержания. 1 — профиль Блазиуса, 2 — $\beta = 0$ (однофазный поток), 3 — 0.01, 4 — 0.05, 5 — 0.1

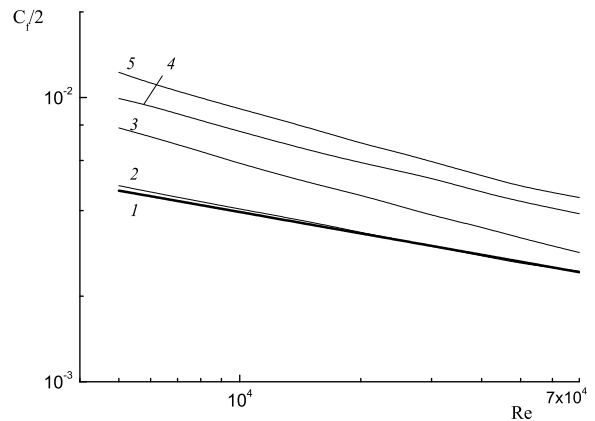


Рис. 2. Трение на стенке трубы как функция от числа Рейнольдса жидкой фазы при изменении начального диаметра пузырьков. 1 — профиль Блазиуса, 2 — $d_1 = 0.5$ мм, 3 — 1, 4 — 1.5, 5 — 2

говорит об увеличении интенсивности теплообмена между стенкой и двухфазным течением. При этом в ядре потока для двухфазного режима течения профили температуры качественно и количественно подобны однофазному течению жидкости. Для измерений [5] также является характерным увеличение заполненности профиля температуры в окрестности стенки в газожидкостном потоке по сравнению с однофазным.

На рис. 4 изображены данные по влиянию начального размера пузырьков на интенсификацию теплообмена St/St_0 в пузырьковом потоке, где St_0 — число Стентона в однофазном потоке жидкости при одинаковом числе Рейнольдса. Увеличение объемного расходного газосодержания вызывает существенное возрастание интенсивности теплообмена между стенкой и двухфазным течением. Видно, что размер пузырька оказывает большое влияние на теплоперенос в газожидкостных потоках. Рост размера пузырьков приводит к увеличению параметра интенсификации теплообмена в опускном течении, тогда как в восходящем режиме течения согласно данным работы [10] наблюдается обратная картина.

Корреляция между параметрами интенсификации теплообмена Nu/Nu_0 и коэффициентом изменения поверхностного трения C_f/C_{f0} в газожидкостном турбулентном потоке по отношению к однофазному показана на рис. 5, где C_f — трение в однофазном течении жидкости. Зависимость между трением и теплообменом близка к линейной, особенно при $\beta > 0.02$.

Влияние газовых включений на изменение теплогидравлического параметра $St/St_0/(C_f/C_{f0})$ показано на рис. 5, где C_{f0} — трение в однофазном течении жидкости. Величина теплогидравлическо-

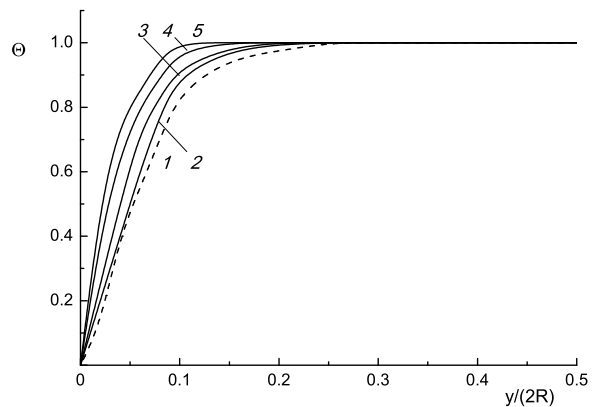


Рис. 3. Профили температуры жидкости по радиусу трубы при изменении размера пузырьков. 1 — однофазный поток ($d_1 = 0$ мм), 2 — $d_1 = 0.5$ мм, 3 — 1, 4 — 1.5, 5 — 2

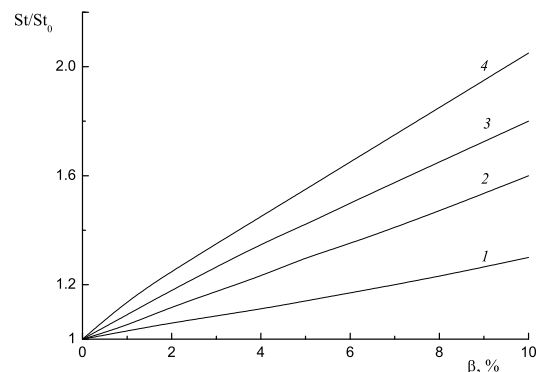


Рис. 4. Изменение параметра интенсификации теплообмена в зависимости от размера пузырьков. 1 — $d_1 = 0.5$ мм, 2 — 1, 3 — 1.5, 4 — 2

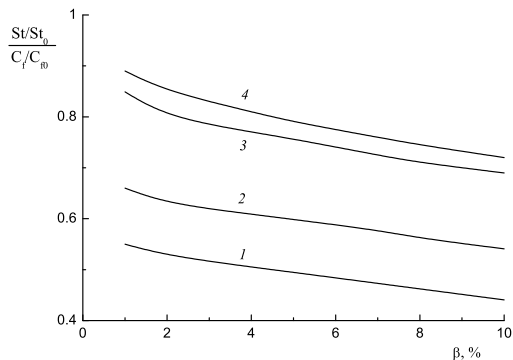


Рис. 5. Зависимость теплогидравлического параметра от концентрации пузырьков и их размера. 1 — $d_1 = 0.5$ мм, 2 — 1, 3 — 1.5, 4 — 2

го параметра возрастает с увеличением размера пузырьков. Отметим, что трение в двухфазном потоке возрастает более интенсивно, чем теплоотдача и, соответственно, параметр теплогидравлической эффективности при всех режимах меньше единицы.

4. Сопоставление с данными других работ

Были проведены сопоставления с результатами измерений и численных расчетов монодисперсного двухфазного потока [18] по динамике опускного газожидкостного потока в трубе при отсутствии теплообмена между стенкой и двухфазным потоком. Сопоставления выполнялись по распределению скорости жидкости в двухфазном потоке, пульсациям скорости жидкости, локальным газосодержаниям и поверхностному трению. Было получено хорошее согласие между экспериментом и нашим расчетом.

На рис. 6. приведены результаты сопоставительного анализа случая опускного газожидкостного потока в обогреваемом цилиндрическом канале. Использовались эксперименты [5], где h_0 и C_{f0} — коэффициенты теплоотдачи и трения в однофазном потоке жидкости при прочих идентичных условиях. Необходимо отметить, что из данных работы [5] было известно, что измерения выполнялись при $q_w = \text{const}$, но не была указана величина теплового потока, подводимого к стенке. На рис. 5 показаны результаты расчетов наиболее близких к данным измерений [5]. Также не был указан и размер пузырьков, но по сделанным в работе оценкам для случая $\beta = 0.1$, размер пузырьков составлял $d_1 = 3.5$ мм.

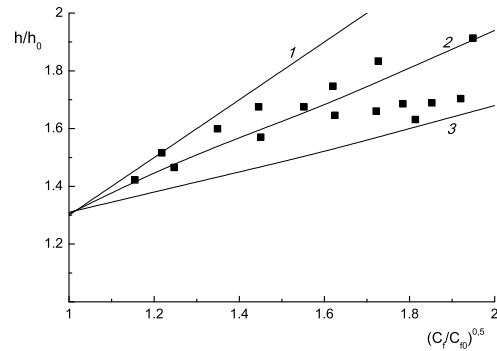


Рис. 6. Интенсификация теплообмена в опускном газожидкостном потоке. Символы — эксперимент [5], линии — расчет авторов. $U_1 = 0.5$ м/с, $Re = 13500$, $d_1 = 3.5$ мм. 1 — $q_w = 22$ кВт/м²; 2 — 18; 3 — 14

5. Заключение

Разработана эйлерова двухжидкостная модель для описания процессов переноса импульса, теплоты и массы в опускных газожидкостных течениях в трубах. Для моделирования турбулентности несущей среды используется модифицированная $k - \epsilon$ модель турбулентности.

Выполнен численный расчет движения опускного пузырькового потока в трубе. Структура течения и трение на стенке при добавлении пузырьков ведут себя аналогично, как и в газожидкостном потоке без теплообмена. Добавление газовой фазы вызывает возрастание теплообмена, причем этот эффект становится более заметным с ростом газосодержания. Возрастание размера пузырьков приводит к росту интенсивности теплообмена в двухфазном опускном потоке по сравнению с однофазным. Рост скорости потока приводит к уменьшению параметра интенсификации теплообмена.

Проведено сравнение с результатами эксперимента. Показано, что данная модель качественно и количественно правильно описывает локальные распределения пузырьков по сечению канала. Наблюдается неплохое согласие между результатами расчетов и измерений профиля локального газосодержания по сечению трубы и теплообмена. Таким образом, разработанная авторами эйлерова модель, в состоянии адекватно описывать сложные закономерности в распределении параметров газожидкостного потока.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института теплофизики СО РАН (Новосибирск) проф. В.И. Терехову, д.ф.-м.н. О.Н. Кашинскому и к.т.н. П.Д. Лобанову за внимание к работе и участие в обсуждении полученных численных результатов.

Список литературы

- [1] Соколов В.Н., Доманский И.В., Давыдов И.В., Тишин В.Б. Гидравлическое сопротивление и теплообмен при восходящем и нисходящем течениях газо-жидкостной смесей в вертикальных трубах // ТОХТ. 1971. Т. 5, № 3. С. 394–400.
- [2] Бобков В.П., Ибрагимов М.Х., Тычинский Н.А., Федотовский В.С. Диффузия тепла при турбулентном течении воды с пузырьками газа // ИФЖ. 1973. Т. 24, № 5. С. 781–789.
- [3] Sekoguchi K., Nakazatomi M., Sato Y. Forced convective heat transfer in vertical air-water bubble flow // Bull. JSME. 1980. V. 23. P. 1625–1631.
- [4] Ким И.Г. Исследование тепломассопереноса в псевдотурбулентном течении газожидкостных смесей в вертикальных трубах // Дисс. канд. техн. наук. Новосибирск: ИТ СО АН СССР. 1982. 201 с.
- [5] Ганчев Б.Г., Пересадько В.Г. Процессы гидродинамики и теплообмена в опускных пузырьковых потоках // ИФЖ. 1985. Т. 49, № 2. С. 181–189.
- [6] Горелик Р.С., Кашинский О.Н., Накоряков В.Е. Теплообмен от стенки к восходящему пузырьковому течению при малых скоростях жидкой фазы // ТВТ. 1989. Т. 27, № 2. С. 300–305.
- [7] Sato Y., Sadatomi M., Sekoguchi K. Momentum and heat transfer in two-phase bubble flow. I. Theory // Int. J. Multiphase Flow. 1981. V. 7. P. 167–177.
- [8] Marie J.L. Modelling of the skin friction and heat transfer in turbulent two-component bubbly flow in pipes // Int. J. Multiphase Flow. 1987. V. 13. P. 309–325.
- [9] Lahey R.T., Drew D.A. The analysis of two-phase flow and heat transfer using a multidimensional, four-field, two-fluid model // Nuclear Eng. Design. 2001. V. 204. P. 29–44.
- [10] Mikielewicz D. Hydrodynamics and heat transfer in bubbly flow in the turbulent boundary layer // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 207–220.
- [11] Пахомов М.А., Терехов В.И. Численное моделирование течения и теплопереноса в опускном турбулентном газожидкостном потоке в трубе // ТВТ. 2011. Т. 49, № 5. С. 737–744.
- [12] Зайчик Л.И., Скибин А.П., Соловьев С.Л. Моделирование распределения пузырьков в турбулентной жидкости на основе диффузионно-инерционной модели // ТВТ. 2004. Т. 42, № 1. С. 111–120.
- [13] Hwang C.B., Lin C.A. Improved low-Reynolds-number $k-\tilde{\epsilon}$ model based on direct simulation data // AIAA J. 1998. V. 36, № 1. P. 38–43.
- [14] Terekhov V.I., Pakhomov M.A. Predictions of turbulent flow and heat transfer in gas-droplets flow downstream of a sudden pipe expansion // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 4711–4721.
- [15] Lehr F., Mewes D. A transport equation for the interfacial area density applied to bubble columns // Chem. Eng. Sci. 2001. V. 56. P. 1159–1166.
- [16] Kocamustafaogullari G., Ishii M. Foundation of the interfacial area transport-equation and its closure relations // Int. J. Heat Mass Transfer. 1995. V. 38. P. 483–491.
- [17] Hibiki T., Ishii M., Xiao Z. Axial interfacial area transport of vertical bubbly flows // Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. V. 44. P. 1869–1888.
- [18] Kashinsky O.N., Lobanov P.D., Pakhomov M.A., Randin V.V., Terekhov V.I. Experimental and numerical study of downward bubbly flow in a pipe // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 3717–3727.