

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОТОКА ЗА ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ТРУБЫ

П.Д. Лобанов, М.А. Пахомов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Введение. Вертикальные пузырьковые потоки широко распространены в химической технологии, в энергетике и других областях техники. Такие течения, как правило, являются турбулентными со значительным межфазным взаимодействием между жидкостью и пузырьками. Двухфазные пузырьковые течения в технических устройствах могут быть осложнены межфазным теплообменом, отрывом, дроблением и коалесценцией пузырьков. Наличие рециркуляционного течения оказывает значительное влияние на интенсивность процессов переноса импульса, теплоты и массы и определяют структуру турбулентного двухфазного течения. Корректное моделирование распределения пузырьков по сечению канала (трубы) имеет большое значение для безопасной эксплуатации и предсказания развития различных аварийных ситуаций в теплогенераторах. Целью работы является проведение численного исследования влияния размера и концентрации газовой фазы на турбулентную структуру жидкости, распространение пузырьков и теплообмен в отрывном двухфазном потоке.

Математическая модель. Численные результаты получены с использованием эйлерова подхода [1,2]. В работе применяются осесимметричные RANS уравнения с учетом обратного влияния пузырьков на осредненные и пульсационные характеристики течения. Турбулентность жидкой фазы описывается с использованием модели переноса компонент рейнольдсовых напряжений [3] с учетом дополнительной генерации турбулентности жидкости при обтекании пузырьков [4]. Расчеты были проведены на сетке, содержащей 256×100 контрольных объемов. Направление течения восходящее. В работе принимается во внимание коалесценция и дробление пузырьков [5,6]. С целью упрощения математической модели непрерывная функция распределения дисперсной фазы по размерам заменяется гистограммой, и вводится понятие классов пузырьков. Классы пузырьков обозначаются индексом k . В работе все расчеты были выполнены для трех групп пузырьков ($k = 1, 2$ и 3): $d_1 = (0-2)$, $d_2 = (2-5)$, $d_3 > 5$ мм. Сделано допущение, что скорость пузырьков первых двух фракций одинакова и отличается от третьей, что согласуется с inhomogeneous MULTI SIZE Group (MUSIG) подходом [7].

Результаты численных расчетов. Все расчеты были проведены для полидисперсной смеси воды и пузырьков воздуха при атмосферном давлении. Число Рейнольдса потока $Re = 1.12 \times 10^4$, его среднемассовая скорость перед сечением отрыва $U_{m1} = 0.75$ м/с. Внутренний диаметр трубы $2R_1 = 15$ мм, высота ступеньки $H = 12.5$ мм, диаметр канала после отрыва $2R_2 = 40$ мм, $ER = (R_1/R_2)^2 = 7.1$, температура стенки $T_w = 313$ К, начальные температуры жидкости и пузырьков газа $T_1 = T_{b1} = 293$ К. Начальное распределение газовой фазы задано в виде равномерного профиля параметров по сечению трубы. Начальная средний диаметр $d_{m1} = 1-3$ мм, объемное расходное газосодержание $\beta = 0-10\%$.

Влияние добавления воздушных пузырьков на изменение длины отрывной зоны двухфазного потока приведено на рис. 1. Здесь x_R и x_{R0} – длины зон рециркуляции для пузырькового и однофазного течений воды при прочих идентичных условиях, соответственно. Показано, что добавление газовой фазы вызывает заметное уменьшение размера отрывной зоны, причем этот эффект возрастает с ростом размера пузырьков и их количе-

ства. Так для случая пузырьков наибольшего начального размера $d_{m1} = 3$ мм и при $\beta = 10\%$ величина длины отрывной зоны составляет $x_R/x_{R0} \approx 0.65$.

Для сопоставительного анализа были использованы практически единственные экспериментальные данные [8] для пузырьков вертикальных потоков при наличии отрыва. Профили осредненной аксиальной скорости пузырьков CO_2 по сечению трубы в зависимости от размера газовой фазы приведены на рис. 2 для двух сечений при $x/(2R_2) = 0.58$ и 2 вниз от положения отрыва двухфазного потока. При сопоставлении с результатами измерений [8] расчеты настоящей работы выполнены для изотермического случая без нагрева стенки трубы с учетом эффектов дробления и коалесценции. Наблюдается удовлетворительное согласие между данными экспериментов [8] и наших расчетов при вариации в широком диапазоне размеров пузырьков. Увеличение размера газовых пузырьков вызывает увеличение скорости газа, что связано с действием подъемной силы. Показано, что маленькие пузырьки вовлекаются в отрывное течение и имеют отрицательную величину скорости. Они присутствуют практически по всему сечению канала, тогда крупные проходят в основном только через ядро течения и сдвиговый слой смешения. Это характерно как для экспериментов [8], так и для наших расчетов. При продвижении вверх по потоку скорость пузырьков уменьшается за счет расширения потока и действия силы трения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № РФФИ 14-08-00520).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алипченков В.М., Зайчик Л.И.** Моделирование движения легких частиц и пузырьков в турбулентных потоках // Изв. РАН. МЖГ. 2010, № 4. С. 69–87.
2. **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.
3. **Manceau R., Hanjalić K.** Elliptic blending model: a new near-wall Reynolds-stress turbulence closure. // Phys. Fluids. 2002. Vol. 14. P. 744–754.
4. **Lopez de Bertodano M., Lee S.J., Lahey R.T., Jr., Drew D.A.** The prediction of two-phase turbulence and phase distribution using a Reynolds stress model. // ASME J. Fluids Eng. 1990. V. 112. P. 107–113.
5. **Lehr F., Mewes D.** A transport equation for the interfacial area density applied to bubble columns. // Chemical Eng. Sci. 2001. V. 56. P. 1159–1166.
6. **Nguyen V.T., Song C.-H., Bae B.U., Euh D.J.** Modeling of bubble coalescence and break-up considering turbulent suppression phenomena in bubbly two-phase flow. // Int. J. Multiphase Flow. 2013. V. 54. P. 31–42.
7. **Krepper E., Lucas D., Frank T., Prasser H.-M., Zwart P.J.** The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows. // Nucl. Eng. Des. 2008. V. 238. P. 1690–1702.
8. **Voutsinas A., Shakouchi T., Tsujimoto K., Ando T.** Investigation of bubble size effect on vertical upward bubbly two-phase pipe flow consisted with an abrupt expansion. // J. Fluid Sci. Techn. 2009. V. 4. P. 442–452.

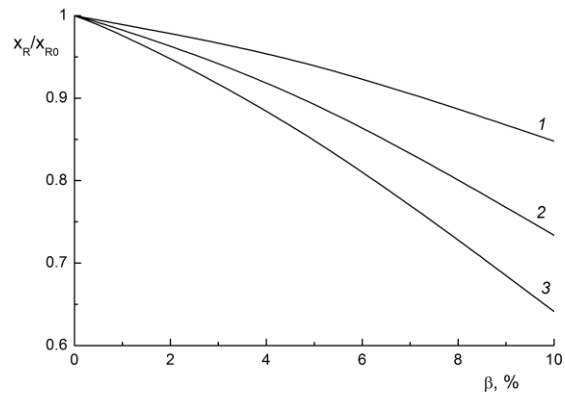


Рис. 1. Изменение длины отрывной зоны в полидисперсном двухфазном пузырьковом потоке. $Re = 1.12 \times 10^4$, $U_{m1} = 0.75$ м/с, $2R_1 = 15$ мм, $2R_2 = 40$ мм, $ER = (R_1/R_2)^2 = 7.1$, $H = 12.5$ мм, $T_W = 313$ К, $T_1 = T_{b1} = 293$ К. 1 – $d_m = 1$ мм, 2 – $d_m = 1.6$, 3 – 3.

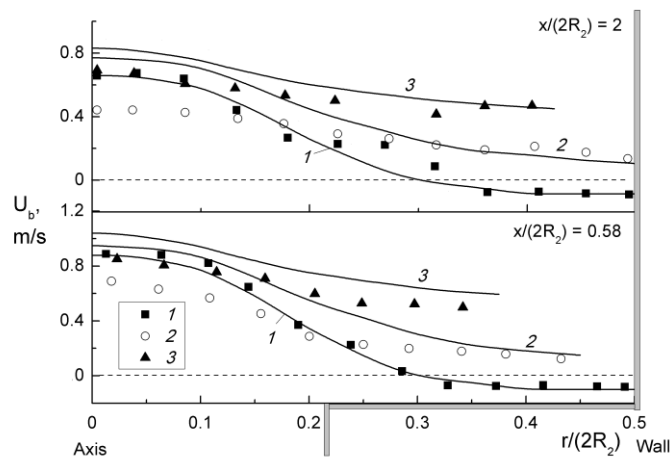


Рис. 2. Влияние размера пузырьков CO_2 на профили осредненной аксиальной скорости в жидкости за внезапным расширением трубы. Точки – измерения [8], линии – расчеты. $Re = 2R_2 U_{m2} / \nu = 10^4$, $H = 20$ мм, $2R_1 = 30$ мм, $2R_2 = 70$ мм, $ER = (R_1/R_2)^2 = 5.4$, $\beta = 5\%$. 1 – $d = 0.3$ мм, 2 – 2.52, 3 – 4.25.