

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА СТРУКТУРУ ОПУСКНОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБЕ

АННОТАЦИЯ

Выполнены совместные экспериментальное и расчетное исследование локальной структуры опускного газожидкостного потока в вертикальной трубе с внутренним диаметром 20 мм. Эксперимент проводился при постоянных расходных параметрах газа и жидкости, но различных размерах пузырьков. Разработана модель расчета опускного течения турбулентной жидкости и воздушных пузырьков в двухскоростном приближении эйлерового подхода и проведено численное исследование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Турбулентные двухфазные газожидкостные потоки в каналах широко распространены в различных технологических приложениях, таких как атомная, химическая, пищевая, фармацевтическая промышленность и теплоэнергетика. Знание информации о структуре, осредненным и пульсационным характеристикам пузырьков потоков необходимо при расчетах различного современного технологического оборудования.

Параметры течения двухфазной жидкости в канале зависят от расходных параметров, геометрии установок, режима течения, физических свойств веществ, а также направления течения. Так известно, что опускное течение по своей структуре существенно отличается от восходящего.

В последнее время структура нисходящих потоков исследуется достаточно интенсивно [1—7]. В последние годы исследования опускных пузырьков потоков носят весьма интенсивный характер. В серии работ [1—4] с помощью электродиффузионного метода были измерены трение на стенке, профили локального газосодержания, аксиальной скорости жидкости и ее пульсаций. В работах [1, 2] исследована турбулентная структура и локальные характеристики опускного течения в вертикальной трубе, внутренним диаметром 42.2 мм. Измерения выполнены для пузырьков двух диаметров: 0.8 и 1.47 мм. Особое внимание в этих работах уделено измерениям в пристенной зоне трубы. Установлено увеличение трения по сравнению с однофазным потоком. В работе [3,4] проведено исследование локальной структуры опускного течения в трубе внутренним диаметром 20 мм при малых расходных газосодержаниях ($\beta \leq 5\%$). Отмечено, что введение в поток газовой фазы приводит к снижению пульсационных характеристик потока в пристенной обла-

сти. В работе [4] проведено экспериментальное исследование влияния дисперсности газовой фазы на характеристики турбулентного опускного потока. Показано, что при малых средних размерах пузырьков снижаются турбулентные пульсации потока. С увеличением расходного газосодержания такое влияние усиливается.

В работе [5] исследовалось опускное пузырьковое течение в трубах внутренним диаметром 25.4 и 50.8 мм. Измерения производились на трех различных расстояниях от входа в трубу. В работе определено влияние межфазного движения на скорость жидкости, локальное газосодержание и размер пузырьков. В [6] с помощью LDA выполнены измерения профилей локального газосодержания, осредненных скоростей фаз и продольных пульсаций скорости жидкости. При помощи комбинированной методики, основанной на методах проводимости и пленочного анемометра, измерены радиальные профили скоростей пузырьков и локального газосодержания.

Среди численных исследований, посвященных моделированию динамики опускных пузырьков потоков, можно отметить результаты [7]. В [7] представлена модель для описания переноса малоинерционных частиц произвольной плотности. Показана принципиальная возможность использования диффузионно-инерционной модели для анализа пузырьков потоков. Для расчета турбулентности жидкости используется $k-\varepsilon$ -модель турбулентности для однофазного течения.

В работах [1—7] отмечено, что присутствие пузырьков в опускном течении приводит к выполаживанию профилей скорости жидкости. Отмечено смещение пика скорости жидкости от центра канала в сторону его стенки.

В настоящее время имеется достаточно много работ, посвященных исследованию опускного течения. Однако в основном исследовались режимы при больших среднemasовых скоростях жидкости и расходах газа.

Целью настоящей работы является совместное экспериментальное и расчетное исследование структуры опускного газожидкостного потока в трубе. Разработана численная модель, базирующаяся на использовании эйлерового представления для обеих фаз, и выполнено расчетное исследование структуры опускного монодисперсного газожидкостного потока в трубе.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка подробно описана в [3]. Рабочим участком установки служила вертикальная труба внутренним диаметром 20 мм. Измерения были выполнены при помощи электрохимического метода [8]. Для определения профилей скорости жидкости и локального газосодержания использовался датчик скорости, одновременно рабо-

тавший в режиме датчика проводимости [8]. Для определения размеров пузырей проводилась съемка цифровым фотоаппаратом.

В качестве рабочей жидкости применялся ферроцианидный электрохимический раствор, кинематическая вязкость и плотность которого соответственно равнялись 10^{-6} м²/с и 1000 кг/м³. Рабочая температура жидкости 25 °С поддерживалась системой термостабилизации. Для получения разной дисперсности газовых пузырьков в работе использовались два газожидкостных смесителя, подробно описанные в [4]. В первом смесителе пузырьки отрываются от капилляров в свободном объеме, а во втором отрыв от капилляра происходит в кольцевой щели. Наличие таких смесителей позволяло получать малые 0.4...0.9 мм и большие 1.7...2 мм пузырьки. В обоих случаях пузырьки подавались в поток через 12 капилляров, внутренним диаметром 0.2 мм.

3. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

В основном физико-математическая модель соответствует модели, разработанной в [9]. Система основных уравнений газовой и дисперсной фаз в приближении пограничного слоя базируется на эйлеровом двухжидкостном подходе, который был успешно апробирован для течений с каплями при наличии фазовых переходов. Основное отличие от [9] заключается в том, что в данной работе выполнен расчет турбулентного изотермического потока жидкой фазы и газовых пузырей. Система уравнений переноса дисперсной фазы имеет вид [10]. В работе рассматриваются следующие силы, действующие на пузырек в потоке турбулентной жидкости: аэродинамическое сопротивление, силы тяжести, турбофореза, сила Архимеда и подъемная сила (сила Сэффмена), обусловленная сдвигом скорости несущего потока и эффект присоединенной массы. В работе не учитываются дробления и коагуляции пузырьков. Рассмотрено монодисперсное течение пузырьков воздуха.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РАСЧЕТОВ

Размер дисперсной фазы в экспериментах составлял $d = 0.61...0.73$ и $1.62...1.8$ мм и он сохранялся постоянным как по длине трубы, так и по сечению. Все расчеты были проведены для монодисперсного состава двухфазного потока. Объемное расходное газосодержание на входе $\beta = 1...5$ %. Сопоставительный анализ в основном был выполнен при осредненной скорости потока $U_1 = 0.3...0.5$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса потока $Re = U_1 2R/\nu \approx 6200...10^4$.

4.1. Профили скорости

Профили скоростей фаз по сечению трубы при вариации размера дисперсной фазы показаны на рис. 1, а ($U_1 = 0.3$ м/с) и 1, б ($U_1 = 0.4$ м/с). При не-

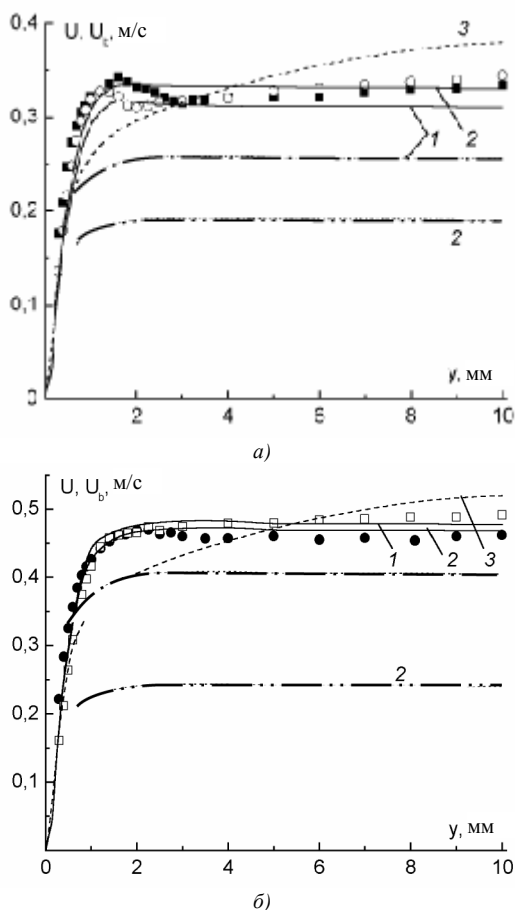


Рис. 1. Профили продольных скоростей фаз по радиусу трубы. Точки – эксперимент; линии – расчет. Сплошные линии — жидкость; пунктир — газ; 1 — $d = 0.613...0.726$ мм; 2 — $1.62...1.76$ мм; 3 — однофазный поток ($\beta = 0$); а — $U_1 = 0.3$ м/с; б — 0.4 м/с

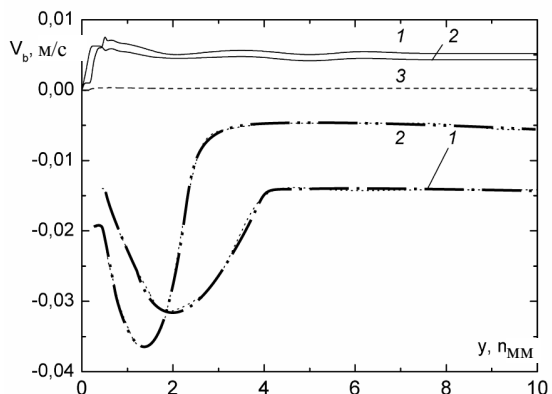


Рис. 2. Распределения радиальных скоростей фаз по радиусу трубы, $U_1 = 0.4$ м/с (обозначения смотри на рис. 1)

больших объемных расходных газосодержаниях β влияние размера пузырьков на скорость газа незначительно. В пристенной зоне канала профили скорости двухфазного потока являются более заполненными по сравнению со скоростью жидкой фазы, а в приосевой части — наоборот профили скорости менее заполненные. Наблюдается расслоение между скоростями фаз, которое возрастает с ростом размера пузырьков. При этом можно отметить, что в опускном пузырьковом потоке отмечается увеличение градиента скорости жидкой фазы в пристенной зоне трубы.

Иной вид имеют профили радиальных скоростей фазы. Эти данные приведены на рис. 2. Скорость пузырьков отрицательна (т.е. направлена в сторону оси канала). Это можно объяснить перемещением пузырьков из пристенной части трубы. Профили скорости дисперсной фазы имеют ярко выраженные максимумы (по модулю), находящиеся в пристенной зоне. По модулю величина скорости более крупных пузырьков меньше, что можно объяснить их инерционностью.

4.2. Пульсации скоростей фаз

Распределения величины аксиальных пульсаций скорости жидкости $\langle u \rangle / U$ и пузырьков $\langle u_b \rangle / U$ приведены на рис. 3, где U — осредненная скорость несущей фазы в данной точке. Около стенки трубы величины продольных пульсаций скорости жидкости двухфазного потока ниже, чем для однофазного течения. В приосевой зоне канала значения пульсаций скорости жидкости выше, чем в однофазном потоке. Это происходит за счет перемешивания жидкости пузырьками газа при их движении с относительной скоростью относительно воды. Рост размера пузырьков приводит к увеличению турбулентности двухфазного газожидкостного течения. Этот факт можно объяснить турбулизацией потока за счет отрыва жидкости при обтекании более крупных частиц. Величины пульсаций скорости пузырьков $\langle u_b \rangle / U$ меньше соответствующих величин пульсаций жидкости, что объясняется вовлечением крупных пузырьков в турбулентное движение жидкой фазы.

4.3. Сопоставления с экспериментальными данными других работ

Для сопоставительного анализа с пузырьками большего размера, чем в наших экспериментах были проведены расчеты по данным измерений [11]. Опыты были проведены в трубе диаметром $2R = 40$ мм на расстоянии $x/R = 70$ для случая опускного течения. Размер пузырьков $d = 3$ мм и число Рейнольдса потока $Re = 40\,400$. Профили скоростей фаз по сечению канала представлены на рис. 4. Так как течение опускное, то скорость газовых пузырьков меньше скорости жидкости по всему сечению канала. Наблюдается достаточно большое расслоение скорости фаз ($U - U^b \approx 0.45$ м/с), которое остается неизменным практически по всему сечению трубы.

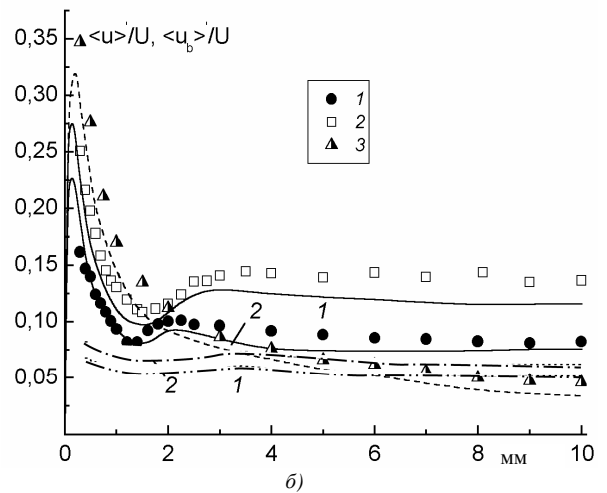
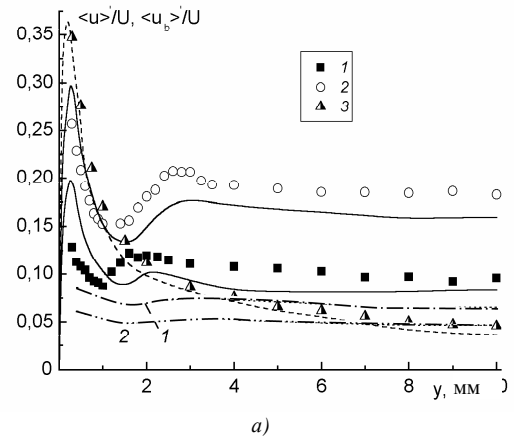


Рис. 3. Аксиальные пульсации фаз в газожидкостном потоке: а — $U_1 = 0.3$ м/с; б — 0.4 м/с (обозначения смотри на рис. 1)

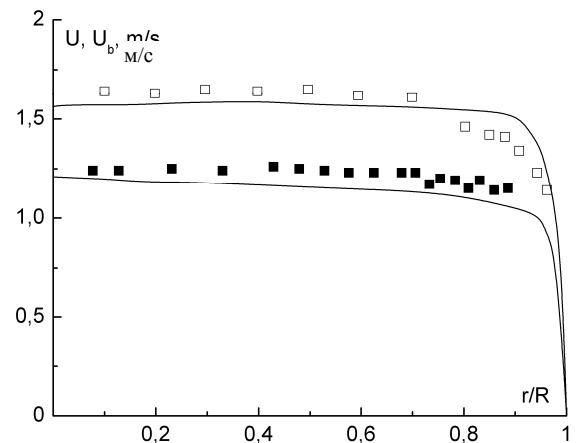


Рис. 4. Профили продольных скоростей пузырьков и жидкости по сечению трубы. Точки — эксперимент [11]; линии — расчет

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана эйлерова двухжидкостная модель для описания процессов переноса импульса и массы в двухфазных опускных газожидкостных течениях в каналах. Для моделирования турбулентности несущей среды используется модифицированная $k-\tilde{\epsilon}$ -модель турбулентности.

Выполнен численный расчет движения опускного пузырькового потока в трубе, проведено сравнение с результатами эксперимента. Даже небольшие концентрации пузырьков приводят к значительной деформации профиля скорости жидкости по сравнению с однофазным режимом течения, особенно в пристенной части трубы. С ростом объемного расходного газосодержания наблюдается появление в пристенной зоне локальных максимумов скорости несущей фазы. Вблизи стенки значения пульсаций скорости жидкости ниже, чем для однофазного режима. В приосевой зоне канала значения пульсаций выше, чем в однофазном потоке. Показано, что данная модель качественно правильно описывает локальные распределения пузырьков по сечению канала. Наблюдается удовлетворительное согласие между результатами расчетов и измерений осредненных величин скорости жидкости, ее пульсаций и профиля локального газосодержания по сечению трубы.

Показано распределение сил, действующих на пузырек, в опускном газожидкостном потоке. Наибольшие значения по модулю имеют подъемная сила, сила турбулентной миграции и турбулентной дисперсии. Максимумы этих сил находятся в непосредственной близости от стенки канала. Основными силами, вызывающими поперечную миграцию в опускных потоках являются: подъемная сила (сила Сэффмена), силы турбулентной миграции (сила турбофореза) и турбулентной дисперсии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проектов РФФИ 04-01-00328 и 05-08-33586) и Фонда Президента РФ для молодых кандидатов наук (грант МК-1184.2005.8). Авторы выражают признательность О.Н. Кашиному и В.И. Терехову и В.В. Рандину за обсуждение полученных результатов и ценные замечания в ходе подготовки этой работы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d — размер пузырьков, м;
 R — радиус трубы, м;
 r — радиальная координата, м;
 U, V — аксиальная и радиальная компоненты скорости, м/с;

$\langle u \rangle / U, \langle v \rangle / U$ — продольные и поперечные пульсации скоростей;

y — расстояние от стенки канала, м;

β — объемное расходное газосодержание;

ν — кинематическая вязкость, м²/с.

Индексы:

0 — параметр на оси трубы;

1 — начальный параметр;

b — пузырьки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кашинский О.Н., Рандин В.В.** Опускное газожидкостное пузырьковое течение в вертикальной трубе // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6. № 2. С. 235—246.
2. **Kashinsky O.N., Randin V.V.** Downward bubble gas-liquid flow in a vertical pipe // Intern. J. Multiphase Flow. 1999. Vol. 25. P. 109—138.
3. **Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Чмигов Т.Д.** Опускное пузырьковое течение при малых расходных газосодержаниях // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11. № 4. С. 619—624.
4. **Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В.** Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 635—643.
5. **Hibiki T., Goda H., Kim S., Ishii M., Uhle J.** Experimental study on interfacial area transport of a vertical downward bubbly flow // Exp. Fluids. 2003. Vol. 35. P. 100—111.
6. **Hibiki T., Goda H., Kim S., Ishii M., Uhle J.** Structure of vertical downward bubbly flow // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2004. Vol. 47. P. 1847—1862.
7. **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—117.
8. **Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P., Odnoral V.P.** Local characteristics of upward gas-liquid flows // Intern. J. Multiphase Flow. 1981. Vol. 7. P. 63—81.
9. **Terekhov V.I., Pakhomov M.A.** The thermal efficiency of near-wall gas-droplets screens. Part I. Numerical modeling // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2005. Vol. 48. P. 1747—1759.
10. **Деревич И.В.** Гидродинамика и тепломассоперенос частиц при турбулентном течении газозвеси в трубе // ТВТ. 2002. Т. 40. № 1. С. 86—99.
11. **Kamp A., Colin C., Fabre J.** The Local Structure of a Turbulent Bubble Pipe Flow under Different Gravity Conditions // Multiphase Flow ICMF-95: Proc. 2nd Intern Conf. Kyoto, Japan. 1995. Vol. 3. Paper P6.