Теплофизика и аэромеханика, 2024, том 31, № 6

УДК 532.529.5

Псевдотурбулентность в ламинарном и переходном режимах восходящего пузырькового течения в трубе

Л.С. Тимкин, Р.С. Горелик

[1]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: timkin@itp.nsc.ru

В пузырьковом течении одновременно присутствуют собственная турбулентность жидкости и наведенная пузырьками псевдотурбулентность. Полная двухфазная турбулентность течения одновременно определяется взаимодействием этих двух компонент. Представлены экспериментальные значения среднего напряжения трения и его пульсации, полученные восемью двойными электродиффузионными датчиками трения, расположенными в одном сечении равномерно по периметру трубы. Газовая фаза представлена монодисперсными пузырьковыми смесями со средними диаметрами 1 и 2 мм и объемным газосодержанием до 20 %. Для модификации чисел Рейнольдса по пузырьку использовались два рабочих раствора с разной вязкостью. Среднерасходная скорость жидкости не превышала 1 м/с. Обнаружены режимы течения с отклонениями от гипотезы И. Сато об аддитивности псевдотурбулентности и собственной турбулентности жидкости. При переходных числах Рейнольдса течения и малых числах Рейнольдса пузырька полная турбулентность определяется псевдотурбулентностью, а влияние однофазной турбулентности отсутствует.

Ключевые слова: пузырьки, газожидкостное течение, собственная турбулентность жидкости, псевдотурбулентность, напряжение трения на стенке, пульсации трения.

Введение

Для предсказания характеристик течения требуется создание моделей турбулентности. Изучение турбулентности двухфазных течений является сложной задачей. Основная трудность исследования заключается в одновременном существовании в течении собственной турбулентности жидкости и пузырьковой псевдотурбулентности и их взаимодействие.

Моделирование двухфазной турбулентности востребовано во многих новых модельных кодах [1–3]. Существует множество подходов, но границы применимости этих подходов не всегда четко определены. Точное моделирование взаимодействия этих двух вкладов является важной основой для описания кодами двухфазной турбулентности [1]. Авторы [4] предложили считать полную турбулентность в пузырьковом течении как сумму пульсаций собственной турбулентности жидкости и наведенной пузырями псевдотурбулентности — двух полностью независимых компонент. В дальнейшем это предположение многократно обсуждалось, тестировалось и использовалось для развития

© Тимкин Л.С., Горелик Р.С., 2024

моделей двухфазных течений, но области его применимости до сих пор четко не определены. Это предположение, заключающееся в разделении пульсаций течения на турбулентность жидкости и псевдотурбулентность, позволяет рассчитывать течение. Данный подход явился первым приближением в моделировании турбулентности пузырькового потока. Реальное течение является более сложным, поскольку существует широкий круг параметров, определяющих как конкретные величины каждого из этих вкладов, так и их взаимодействие. Различные работы указывают на разнообразие способов взаимодействия этих двух вкладов, приводящих как к их аддитивности, так и к существенному усилению или подавлению полной турбулентности двухфазного пузырькового течения.

В исследованиях [5] и [6] подчеркивалось, что напряжение трения является определяющим фактором в гидродинамике двухфазных течений. В [6] изучался пузырьковый поток с решеточной турбулентностью. В центре прямоугольного канала были зафиксированы два различных режима течения, зависящие от истинного объемного газосодержания α и интенсивности пульсаций, наведенных металлической решеткой. Для разграничения режимов вводилась величина критического газосодержания потока — α_c = 1 %. Первый режим характеризовался малым газосодержанием (α < 1 %), где динамическое взаимодействие между пузырями было пренебрежимо мало. Турбулентность является суммой псевдотурбулентности и кинетической энергии, генерируемой решеткой, что поддерживает гипотезу [4]. При увеличении газосодержания реализовывался второй режим, когда в течении формировалась развитая псевдотурбулентная структура течения, приводящая к существенному усилению турбулентных пульсаций. В этом режиме наклон спектра трения в пузырьковом потоке увеличивался с однофазного значения –5/3 до широко известного в пузырьковых потоках значения –8/3.

В работе [7] рассматривалось взаимодействие собственной турбулентности жидкости и псевдотурбулентности, были проанализированы эксперименты в двухфазных, в том числе «жидкость – твердые частицы», «газ – твердые частицы», газожидкостных течениях в трубах и свободных струях различной ориентации. Авторами вводился параметр d_p/l_e — отношение диаметра частицы к масштабу турбулентности. При значениях этого параметра выше критического — $d_p/l_e \geq 0{,}1$ — фиксировалось увеличение полной турбулентности течения, аналогичное аддитивности турбулентностей [4], а при меньших значениях фиксировалось уменьшение полной турбулентности течения. Масштаб однофазной турбулентности оценивался в [7] для высоких чисел Рейнольдса течения ($\mathrm{Re} \sim 5\cdot10^4 \div 5\cdot10^5$) как $l_e \sim 0{,}22R$, где R — радиус трубы 0,06 м.

В настоящей работе представлены измерения трения на стенке трубы и пульсаций трения в двухфазном пузырьковом течении. Использовались пузырьки размером 1 – 2 мм, и если взять для оценки максимальное возможное значение в трубе $l_e = R$ (в данной работе R = 7,4 мм — радиус трубы), то минимальное значение параметра составляет $d_p/l_e \sim 0{,}13$. В соответствии с [7] это позволяет надеяться на аддитивность турбулентностей и увеличение полной турбулентности течения в работе. Число Рейнольдса пузыря $\mathrm{Re}_b = V_b \cdot d_b/\nu$ (где V_b — скорость всплытия пузыря, рассчитанная по корреляции для скорости всплытия «твердых сфер» в большом объеме [8], d_b — средний диаметр пузыря), является важным параметром, определяющим сложный характер полной турбулентности течения. Выяснение взаимодействия турбулентности чистой жидкости и псевдотурбулентности при малых числах Рейнольдса по пузырьку является целью данной работы.

Экспериментальная установка

Для измерения напряжения трения на стенке трубы применялся электродиффузионный метод [9]. Экспериментальная установка представляла собой двухфазный контур, замкнутый по жидкой фазе потока и разомкнутый по газу. Эксперименты проводились в вертикальной трубе с внутренним диаметром $D = 2{\cdot}R = 14{,}8$ мм и высотой 6 м. Пузырьковое течение формировалось в генераторе пузырьков на входе в трубу. Измерительный блок с электродиффузионными датчиками был установлен на высоте 5 м от входа в трубу. Восемь двойных датчиков, равномерно расположенных в одном сечении по периметру трубы, использовались для регистрации знакопеременного напряжения трения на стенке трубы. Датчики были подключены к компьютеру через индивидуальные усилители и 16-битный амплитудный аналого-цифровой преобразователь L-Card 1620-S. Ошибка измерения однофазного трения лежит в пределах 5÷7 %. В качестве рабочих жидкостей применялись стандартные ферри- и ферроцианидные растворы (см. [9]) с небольшой добавкой глицерина. Плотность и вязкость этих двух растворов при рабочей температуре 20 ± 0,2 °C приведены в таблице. Среднерасходная скорость жидкости в растворе № 1 изменялась в диапазоне $V_1 = 0{,}016 \pm 0{,}97$ м/с, а в растворе № 2 — $V_1 = 0{,}01 \pm 0{,}85$ м/с. Рассматривались пузырьки двух разных средних диаметров, имеющие почти сферическую форму. Средний диаметр d_b, скорость всплытия пузырьков в большом объеме V_b и число Рейнольдса пузырьков Re_b в рабочих растворах также приведены в таблице. Подробнее установка описывалась в работе [10].

Описание результатов

Для течения в первом рабочем растворе с пузырьками диаметром $d_\text{b} = 1{,}2$ и 2,0 мм напряжение трения на стенке τ_w, осредненное по 8 датчикам, и пульсации напряжения трения τ'_w, нормализованные на соответствующее однофазное напряжения трения τ_0, представлены на рис. 1 в зависимости от числа Рейнольдса течения $\text{Re} = V_1{\cdot}D/\nu$. Расходное объемное газосодержание используется как параметр в представлении серий данных, в экспериментах оно изменялось в пределах $\beta = 0 \div 0{,}2$. Однофазные значения среднего напряжения трения и пульсаций трения показаны на рисунке сплошными линиями.

При числах $\text{Re} \le 1100$ пузырьки мигрируют в приосевую зону течения. Реализуются возвратные течения на стенках трубы, приводящие к отрицательным средним напряжениям трения и небольшому пику в пульсациях трения. Эффект возвратных течений растет с увеличением объемного газосодержания. С ростом Re пузырьки перераспределяются по сечению трубы и мигрируют к стенке, формируя при $\text{Re} \sim 1500 \div 5000$ пристенный пик газосодержания с характерным максимумом в напряжении трения. При дальнейшем росте Re пик размывается растущими пульсациями турбулентности

Таблица

Параметры пузырьков для двух рабочих растворов

№ раствора	Вязкость, ν, м^2/с	Плотность, ρ, кг/м^3	d_b, мм	V_b, м/с	Re_b
1	$1{,}06{\cdot}10^{-6}$	1031	1,2	0,131	148
1	$1{,}06{\cdot}10^{-6}$	1031	2,0	0,203	382
2	$3{,}5{\cdot}10^{-6}$	1124	1,2	0,08	27
2	$3{,}5{\cdot}10^{-6}$	1124	2,2	0,165	104

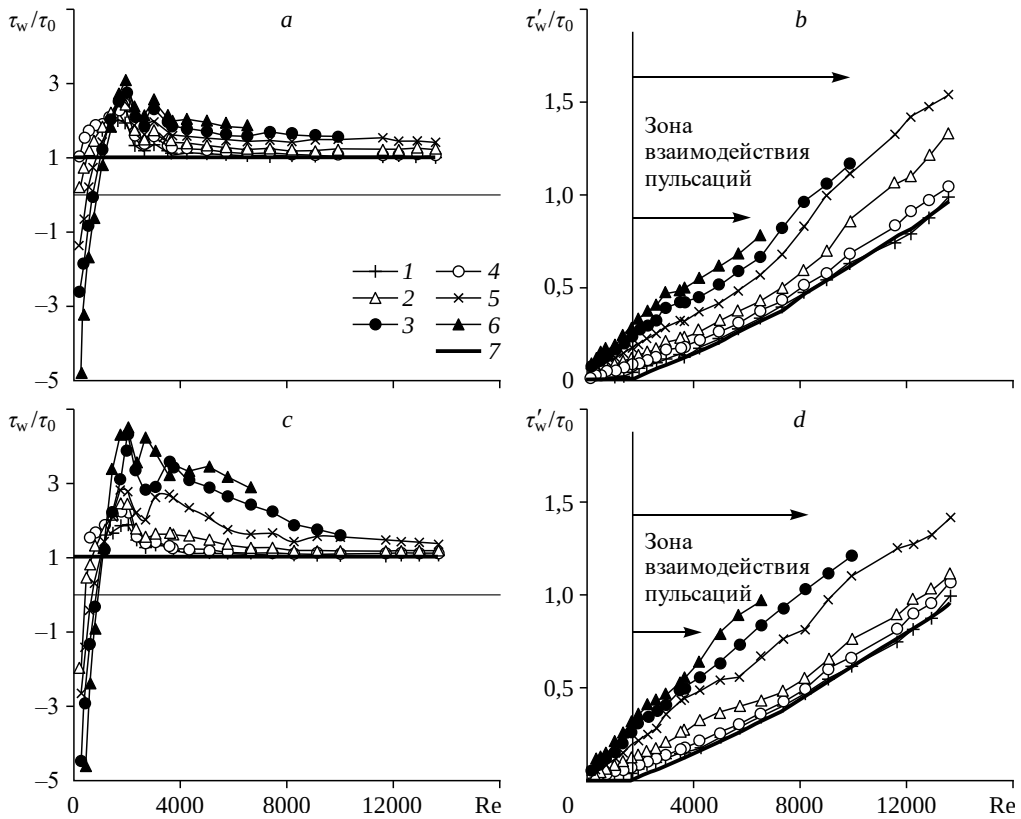

Рис. 1. Аддитивное сочетание пульсаций напряжения трения на стенке трубы (в соответствии с [4]) при использовании рабочего раствора № 1.

Среднее напряжение трения на стенке трубы (*a*, *c*) и соответствующие ему пульсации трения (*b*, *d*), средний диаметр пузырьков d_b = 2,0 (*a*, *b*) и 1,2 (*c*, *d*) мм;
a – *d* — β = 0,005 (*1*), 0,05 (*2*), 0,15 (*3*), 0,02 (*4*), 0,1 (*5*), 0,2 (*6*);
a, *c* — τ_w/τ_0 = 1 (*7*), *b*, *d* — однофазные пульсации (*7*).

чистой жидкости, а напряжение трения приближается к однофазным значениям. До числа Рейнольдса Re = 1880 в течении присутствует только пузырьковая псевдотурбулентность. Она плавно растет с малых чисел Re, а при появлении турбулентности чистой жидкости (см. помеченную на рис. 1 зону взаимодействия пульсаций при Re ≥ 1880) полная турбулентность течения выглядит как сумма этих двух турбулентностей, в соответствии с [4]. Аддитивность пульсаций одинаково присутствует в течениях с разными средними диаметрами пузырьков. Основное отличие в данных для этих двух диаметров пузырьков заключается только в величине максимума среднего напряжения трения на стенке при формировании пристенного пика газосодержания. Для мелких пузырьков напряжение трения несколько выше, чем для более крупных. Это связано с тем, что мелкие пузырьки ближе подходят к стенке трубы, соответственно, пристенный пик газосодержания также располагается несколько ближе к стенке, сильнее возмущая напряжение трения [10].

Аналогичные данные по напряжению трения на стенке трубы и его пульсациям в растворе № 2 представлены на рис. 2. Спецификация рисунка аналогична рис. 1, только в зоне взаимодействия двух типов пульсаций добавлена серия данных 8, которые являются алгебраической суммой амплитуды псевдотурбулентных пульсаций при Re ~ 1880 и соответствующей амплитуды однофазных пульсаций течения. Эта серия данных

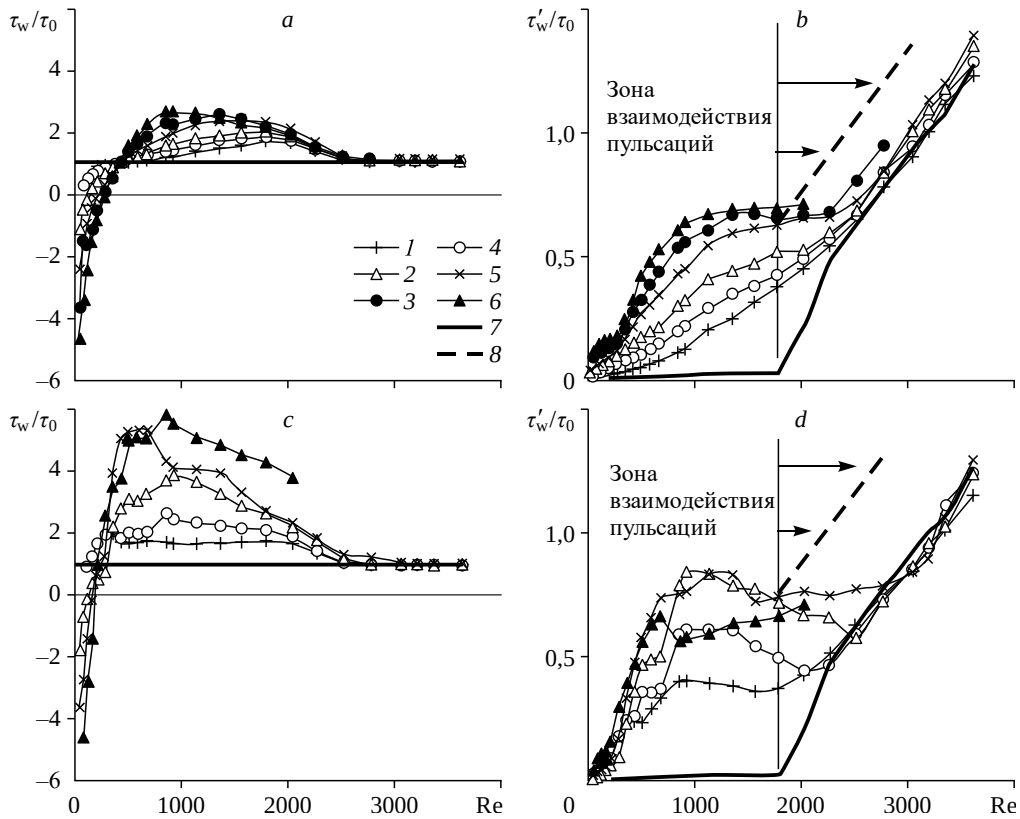

Рис. 2. Неаддитивное сочетание пульсаций напряжения трения на стенке трубы при использовании рабочего раствора № 2.

Среднее напряжение трения на стенке (*a*, *c*) и соответствующие ему пульсации трения (*b*, *d*); средний диаметр пузырьков d_b = 2,2 (*a*, *b*) и 1,2 (*c*, *d*) мм; *a* – *d* — β = 0,005 (*1*), 0,05 (*2*), 0,15 (*3*), 0,02 (*4*), 0,1 (*5*), 0,2 (*6*); *a*, *c*: τ_w/τ_0 = 1 (*7*), *b*, *d*: *7* — однофазные пульсации, *8* — сумма амплитуд турбулентных пульсаций.

иллюстрирует, как бы выглядели полные пульсации течения, если бы псевдотурбулентность и турбулентность чистой жидкости были бы аддитивны. Из-за повышенной вязкости раствора максимальное число Рейнольдса в эксперименте составляло Re = 4000, а значения Re_b для тех же самых размеров пузырьков, что и в растворе № 1, в несколько раз уменьшились. Среднее напряжение трения на стенке трубы выглядит аналогично: при числах Рейнольдса Re ≤ 160 (для меньших пузырьков) и Re ≤ 280 (для более крупных) пузырьки концентрируются в приосевой зоне течения, в течении заметны пристенные возвратные течения, приводящие к существенным отрицательным напряжениям трения на стенке; при увеличении скорости жидкости пузырьки перераспределяются в сечении трубы и в диапазоне чисел Рейнольдса течения 300 ≤ Re ≤ 2500 формируют пристенный пик газосодержания, при этом меньшие пузырьки приводят к практически вдвое большему напряжению трения на стенке трубы; с ростом числа Рейнольдса течения пристенный пик газосодержания постепенно размывается и напряжение трения приближается к однофазным значениям.

Пульсации трения, как и в растворе № 1, имеют небольшое увеличение в области возвратных течений. С ростом Re пульсации выходят на «полочку» в напряжении трения,

амплитуда которой растет с величиной объемного газосодержания. При числах Рейнольдса выше $Re \geq 1880$ в течении появляется развивающаяся собственная турбулентность жидкости, но пульсации трения остаются на уровне псевдотурбулентных, а однофазная турбулентность почти полностью игнорируется. И когда однофазные пульсации начинают превышать псевдотурбулентные ($Re \geq 2300 \div 2700$), именно они начинают задавать амплитуду полных пульсаций течения, а вклад псевдотурбулентности становится практически незаметен. Наблюдается аналог конкуренции турбулентных вкладов: преобладает и задает полные пульсации течения более сильный конкурент.

В развитии пульсаций не замечено качественных особенностей для разных объемных газосодержаний потока. Существующие различия связаны только с меньшей амплитудой пульсаций для меньших газосодержаний. Отсутствуют особенности и для разных чисел Re (т.е. при разных амплитудах однофазных пульсаций), что отличает данные настоящей работы от результатов исследования [6], где амплитуда искусственно наведенных пульсаций меняла характер развития полных пульсаций течения при больших газосодержаниях. Это отличие может быть связано с недостаточно большой амплитудой собственных пульсаций однофазной турбулентности.

Заключение

В работе взаимодействие двух компонент турбулентности пузырькового восходящего течения экспериментально изучалось на примере развития пульсаций напряжения трения на стенке. Результаты показали, что для практически сферических пузырьков размером $1 \div 2$ миллиметра и при одновременном существовании в течении турбулентности чистой жидкости и псевдотурбулентности их взаимодействие может иметь более сложный характер, чем простое суммирование. При $Re > 1880$ наблюдаются режимы течения как с четко выраженным аддитивным [4], так и с неаддитивным сочетанием этих пульсаций. Аддитивность присутствует в режимах течения пузырьков с большими числами Рейнольдса ($Re_b = 148, 382$), тогда как при меньших числах ($Re_b = 27, 104$) пульсации выглядят неаддитивными. При неаддитивном сочетании и повышенных значениях числа Рейнольдса ($Re > 2500$) турбулентность течения практически полностью определяется собственной турбулентностью жидкости, а вклад псевдотурбулентности сводится лишь к небольшой добавке в общие пульсации течения. Наоборот, при исследовании газосодержаний в диапазоне чисел $1880 < Re < 2500$ обнаружено, что собственные пульсации жидкости меньше псевдотурбулентных и полные пульсации течения полностью определяются только псевдотурбулентностью. Наблюдается аналог конкуренции турбулентных вкладов, ранее не отмеченный в литературе: из двух турбулентностей преобладает и задает полные пульсации течения наиболее сильная компонента.

Качественных отличий в поведении экспериментальных данных с различными газосодержаниями в настоящей работе не обнаружено, что позволяет исключить влияние межпузырькового взаимодействия на результат исследования.

Список литературы

1. **Vaidheeswaran A., Hibiki T.** Bubble-induced turbulence modelling for vertical bubbly flows // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115, Part B,. P. 741–752.
2. **Rzehak R., Krepper E.** CFD modelling of bubble-induced turbulence // Intern. J. Multiph. Flow. 2013. Vol. 55. P. 138–155.
3. **Lu J., Tryggvason G.** Numerical study of turbulent bubbly downflows in a vertical channel // Phys. Fluids. 2006. Vol. 18. P. 103302-1–103302-10.

4. **Sato Y., Sekoguchi K.** Liquid velocity distribution in two-phase bubble flow // Intern. J. Multiph. Flow. 1975. Vol. 2. P. 79–95.
5. **Souhar M.** Some turbulent quantities and energy spectra in the wall region of bubble flows // Phys. Fluids A. 1989. Vol. 9, No. 1. P. 1558–1565.
6. **Lance M., Bataille J.** Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air-water flow // J. Fluid Mech. 1991. Vol. 222. P. 95–118.
7. **Gore R.A., Crowe C.T.** Effect of particle size on modulating turbulence intensity // Intern. J. Multiph. Flow. 1989. Vol. 15. P. 279–285.
8. **Wallis G.B.** The terminal speed of single drops or bubbles in infinite medium // Intern. J. Multiph. Flow. 1974. Vol. 1. P. 491–511.
9. **Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И.** Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений // Под ред. В.Г. Гасенко. Новосибирск: Институт теплофизики, 1986. 248 с.
10. **Тимкин Л.С., Горелик Р.С.** Локальная скорость скольжения пузырьков в опускном ламинарном течении в трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 2. С. 269–279.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2024 г.,
после доработки — 29 июля 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.