

ЛИТЕРАТУРА

1. Olson R. M., Eckert E. R. G. Experimental studies of turbulent flow in a porous circular tube with uniform fluid injection through the tube wall.— Transactions ASME, ser. E, 1966, N 1. Рус. пер.— ПМ, 1966, № 1.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
3. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972.
4. Луговской П. П. Турбулентный пограничный слой на проницаемой поверхности в области интенсивных вдувов. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Новосибирск: изд. ИТФ СО АН СССР, 1972.
5. Калмыков В. Ф., Шерстюк А. Н. Характеристики несжимаемого турбулентного пограничного слоя при отрицательном градиенте давления. Препринт № 46, Ин-т проблем механики АН СССР, 1974.
6. Herring H. J., Norbury J. F. Some experiments on equilibrium turbulent boundary layers in favourable pressure gradients.— J. Fluid Mech., 1967, vol. 27, p. 3.
7. Калишевский Л. Л. и др. Влияние сильного ускорения потока на распределение скорости в турбулентном пограничном слое со вдувом.— Труды Моск. выс. техн. уч-ща им. Баумана, 1975, № 207.

УДК 532.529.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОСХОДЯЩЕГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА

О. Н. Кашинский, Б. К. Козьменко, В. Е. Накоряков

(Новосибирск)

В настоящее время большое внимание уделяется изучению локальной структуры двухфазных газожидкостных потоков. Это связано с разнообразием режимов течения и с большим количеством параметров и определяющих характеристик двухфазных потоков. В результате этого обобщение осредненных суммарных параметров (потери на трение, коэффициент теплоотдачи) оказывается затруднительным. Проводимые в настоящее время исследования осредненных по времени локальных характеристик газожидкостных потоков [1, 2] необходимо дополнить более детальным исследованием пульсационной структуры течений для выяснения механизма взаимодействия турбулентности жидкости с газовой фазой.

В работах [3, 4] проведено исследование осредненных по времени локальных характеристик газожидкостного потока в вертикальной трубе. Целью данной работы является исследование некоторых пульсационных характеристик восходящего двухфазного потока.

Эксперименты проводились на установке [3]. Рабочим участком служила вертикальная труба с внутренним диаметром 15 мм и длиной 5 м. Двухфазный поток организовывался путем ввода в жидкость пузырьков газа одинакового размера с помощью устройства [4].

Измерения проводились с помощью электрохимического метода [5, 6]. Рабочей жидкостью служил электролит, содержащий 0,5N едкого натра и 0,005 N ферри- и ферроцианида калия в дистиллированной воде. Для поддержания постоянства физических свойств проводилось термостатирование жидкости на уровне $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$.

Для определения средней скорости жидкости и пульсаций продольной составляющей скорости жидкости использовался датчик скорости типа «лобовая точка» диаметром 0,05 мм. Тарировка датчика проводилась на оси трубы в ламинарном режиме течения, где скорость на оси равнялась удвоенной средней скорости жидкости, определяемой из расхода. Методика измерения описана в [6].

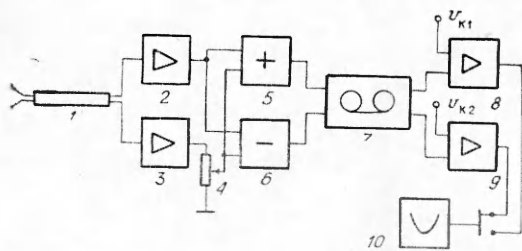
Для измерения интенсивности пульсаций поперечной составляющей скорости жидкости использовался V-образный электрохимический датчик [7] с максимальным размером чувствительного элемента 0,2 мм. При работе датчика указанного типа в двухфазном потоке возникает затруднение, связанное с невозможностью различить пульсации тока датчика, вызванные пульсациями скорости жидкости, с изменением тока, вызванным присутствием на части поверхности датчика газовой фазы при прохождении через датчик пузырьков газа. Для того чтобы данное обстоятельство не вносило большую погрешность в результаты измерений, эксперименты с V-образным датчиком проводились при значении расходного объемного газосодержания $\beta = 0,01$.

Методика измерения аналогична измерениям с помощью X-образного термоанемометрического датчика [8].

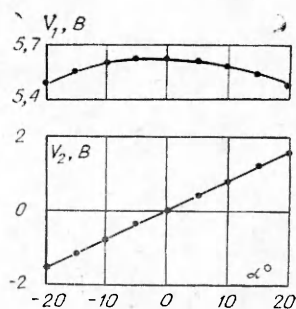
На фиг. 1 приведена блок-схема измерительной аппаратуры. Сигнал с датчика 1 подавался на двухканальный усилитель постоянного тока 2 и 3, на выходе второго канала находился делитель 4 для балансировки обоих каналов. Далее сигнал подавался на суммирующий усилитель 5 и дифференциальный усилитель 6, выходные сигналы которых записывались на ленту магнитофона 7 типа «Schlumberger». При воспроизведении записи сигналы с ленты подавались на усилители-ограничители 8 и 9, на вход которых подавалось также компенсирующее напряжение $U_{к1}$ и $U_{к2}$ для смещения среднего уровня. С выхода усилителей-ограничителей сигнал измерялся с помощью квадратичного вольтметра 10.

Поскольку характеристики датчиков указанного типа подробно не исследованы, перед экспериментом проводилась тарировка датчика по средней скорости аналогично описанной выше тарировке датчика типа «лобовая точка», а также угловая тарировка датчика с помощью устройства [7]. Типичные кривые угловой тарировки приведены на фиг. 2, где V_1 и V_2 — выходные напряжения соответственно суммирующего и дифференциального усилителей, α — угол между нормалью к датчику и направлением потока, кривые построены для скорости жидкости 0,07 м/с. Видно, что в диапазоне углов $\alpha = +25^\circ$ сумма V_1 практически не зависит от угла α , а разность V_2 зависит от α линейно. По результатам тарировок определялись коэффициенты чувствительности датчика по отношению к продольной и поперечной компонентам пульсаций скорости, которые затем использовались при обработке результатов измерений.

На фиг. 3 приведены типичные осциллограммы сигнала датчика в двухфазном потоке. Верхний сигнал — напряжение суммирующего усилителя V_1 , нижний — дифференциального усилителя V_2 . Резкие скачки напряжения соответствуют моментам нахождения датчика в газовой фазе. Кроме того, примыкающие к этим скачкам участки сигнала могут соответствовать моментам нахождения части электрода датчика в газовой фазе. Чтобы сделать минимальной погрешность измерений за счет указанных



Ф и г. 1



Ф и г. 2



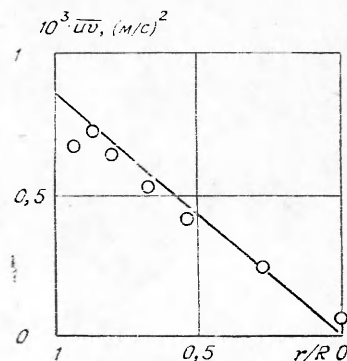
Ф и г. 3

скачков, применялась следующая методика обработки сигнала. Напряжения U_{K1} и U_{K2} и коэффициенты усиления усилителей-ограничителей регулировались таким образом, чтобы сигнал, соответствующий турбулентным пульсациям, занимал почти весь динамический диапазон усилителей 8, 9 и максимумы этого сигнала были близки к уровням ограничения, но не доходили до этого уровня. При попадании датчика в газовую фазу происходит резкое изменение уровня сигнала, однако усилители не дают сигналу превысить уровень ограничения. В результате возможная погрешность в измерении среднеквадратичного значения пульсаций не превышает $V_0\phi/e$, где V_0 — уровень ограничения, e — среднеквадратичное значение выходного напряжения усилителей 8 или 9, а ϕ — локальное газосодержание в данной точке. Учитывая, что при надлежащем выборе коэффициентов усиления и компенсирующих напряжений усилителей-ограничителей можно сделать $V_0/e < 2,5$, получаем, что погрешность измерения, вызванная отсутствием специальной методики запирания сигнала датчиков при прохождении газовой фазы, не превышает $2,5\phi$. Локальное значение газосодержания при $\beta = 0,01$ не превышало $0,04$. Таким образом, максимальная погрешность измерения, обусловленная наличием пузырьков газа в потоке, была меньше 10% .

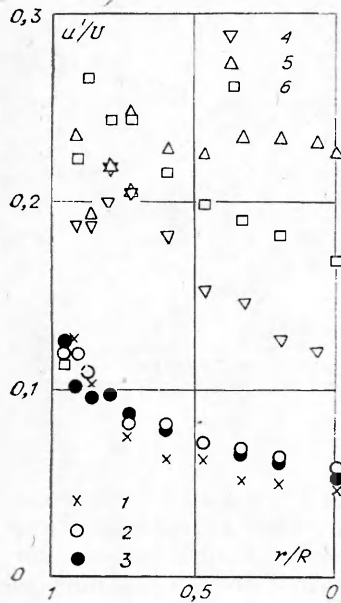
Для контроля правильности измерений в соответствии с рекомендациями [8] проведены измерения корреляции продольной u и поперечной v компонент пульсаций скорости в однофазном потоке. Результаты приведены на фиг. 4, где R и r — соответственно радиус трубы и текущий радиус. Измерения проводились при значении числа Рейнольдса $9 \cdot 10^3$. Линия соответствует линейной зависимости $\overline{uv} = v_*^2 (r/R) (v_*$ — динамическая скорость), отклонения экспериментальных точек от которой лежат в пределах погрешности измерений; точки — результаты измерений.

Измеренные профили продольной компоненты пульсаций скорости жидкости в двухфазном потоке u' (U — скорость на оси трубы) показаны на фиг. 5, где 1 — $Re = 9000$, $\beta = 0$; 2 — $Re = 9000$, $\beta = 0,01$; 3 — $Re = 4250$, $\beta = 0,01$; 4 — $Re = 1720$, $\beta = 0,01$; 5 — $Re = 1720$, $\beta = 0,1$; 6 — $Re = 1000$, $\beta = 0,01$. Размер пузырьков газа в двухфазном потоке во всех экспериментах равнялся 1 мм.

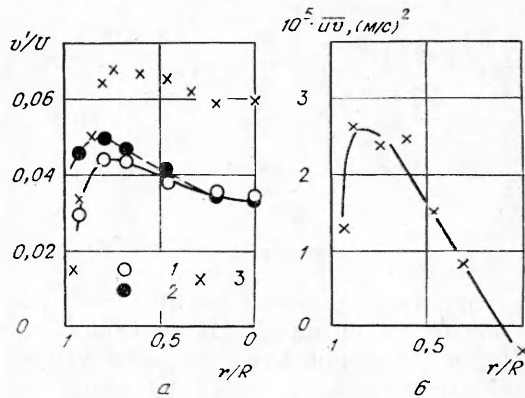
Как видно из фиг. 5, измеренные значения u' в развитом турбулентном режиме течения (точки 2, 3) близки к соответствующим значениям в однофазном потоке. В центральной части трубы интенсивность продольной составляющей скорости несколько выше, чем в однофазном потоке, за счет дополнительных возмущений, вызванных относительным движением пузырьков газа. Вблизи стенки значения u' в двухфазном и однофазном потоках практически одинаковы при $Re = 9000$, а при $Re = 4250$ в двухфазном потоке u' даже несколько меньше. Этот эффект демпфирующего влияния пузырьков газа на турбулентность жидкости аналогичен описанному в [2]. В целом же в развитом турбулентном режиме при малых газо-



Ф и г. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

содержаниях влияние наличия газовой фазы на пульсационные характеристики жидкости слабое.

Результаты измерения u' при числах Рейнольдса, соответствующих ламинарному режиму течения (точки 4—6), показывают значительно более высокий уровень продольных пульсаций скорости жидкости по сравнению с развитым турбулентным течением.

При $\beta = 0,01$ профили u' качественно подобны турбулентным однофазным, наблюдается сильная зависимость от числа Рейнольдса. Это вполне естественно, так как с увеличением скорости жидкости локальный коэффициент скольжения для пузырьков газа уменьшается, соответственно уменьшается и относительная величина возмущения жидкости газовой фазой. Профили u' сильно зависят также от расходного газосодержания. При $\beta = 0,1$ (точки 5) распределение u' существенно отличается от всех остальных. В этом случае в центральной части трубы имеет место практически постоянное значение u' . Аналогичное распределение степени турбулентности в ряде режимов отмечалось в работе [2].

На фиг. 6, а приведены профили поперечной компоненты пульсаций скорости жидкости, где 1 — $Re = 4250$, $\beta = 0$; 2 — $Re = 4250$, $\beta = 0,01$; 3 — $Re = 1000$, $\beta = 0,01$. Видно, что в развитом турбулентном режиме профиль v' в двухфазном потоке слабо отличается от однофазного. Существует некоторое повышение интенсивности поперечных пульсаций вблизи стенки, в центральной же части трубы значения v' в однофазном и двухфазном потоках совпадают. Отметим также, что значения u' и v' в центре трубы в одних и тех же режимах турбулентного течения близки, течение близко к изотропному. При $Re = 1000$ значения v' примерно в 1,5 раза превосходят соответствующие значения в развитом турбулентном режиме, хотя качественный характер кривой сохраняется. Однако в этом случае имеет место существенная анизотропия пульсаций скорости даже в центре трубы. Отношение здесь около 3. Несмотря на докритическое значение числа Рейнольдса, корреляция $\overline{u'v'}$ отлична от нуля (фиг. 6, б, $Re = 1000$, $\beta = 0,01$) и имеет качественно такой же вид, как и в турбулентном течении. Поскольку скорость смещения пузырьков в поперечном направлении примерно на порядок меньше относительной скорости всплытия, поперечное движение пузырьков не может вызвать столь высокие значения v' . По всей видимости, после прохождения каждого пузырька в жидкости возникает локальная турбулизация потока, которая, однако, не может вызвать развития полностью турбулентного режима, так как число Рей-

нольдса ниже критического для трубы. Эта турбулизация вызывает «перекачку» части энергии продольных пульсаций в поперечные и возникновение рейнольдсовых напряжений. Таким образом, при непрерывном внесении сильных возмущений в поток жидкости возможно возникновение течения, весьма сходного с развитым турбулентным даже при докритическом числе Рейнольдса. Появление дополнительной турбулентной вязкости обуславливает более заполненный профиль скорости в этих режимах [3, 4].

Поступила 17 XII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование турбулентных течений двухфазных сред/Под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск: Наука, 1973.
2. Serizawa A., Kataoka I., Michigoshi I. Turbulence structure of air-water bubble flow. — Internat. J. Multiphase Flow, 1975, vol. 2, pt 1.
3. Бурдуков А. П., Козьменко Б. К., Накоряков В. Е. Распределение профилей скорости жидкой фазы в газожидкостном потоке при малых газосодержаниях — ПМТФ, 1975, № 6.
4. Валукина Н. В., Козьменко Б. К., Кашинский О. Н. Характеристики монодисперсной газожидкостной смеси при течении в вертикальной трубе. — ИФЖ, 1979, т. 36, № 4.
5. Кутателадзе С. С., Бурдуков А. П. и др. Применение электрохимического метода измерения трения в гидродинамике двухфазных сред. — В сб.: Тепло- и массоперенос. Т. 2. Минск: Наука и техника, 1968.
6. Бурдуков А. П., Кашинский О. Н. и др. Диагностика основных турбулентных характеристик двухфазных потоков. — ПМТФ, 1979, № 4.
7. Накоряков В. Е., Кашинский О. Н. и др. Исследование характеристик электрохимических датчиков для измерения в двухфазном потоке. — В кн.: Труды III Всесоюз. совещания «Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности». Новосибирск, 1980.
8. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М.: Мир, 1974.

УДК 532.529

ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ В ТУРБУЛЕНТНОМ СДВИГОВОМ ПОТОКЕ РАЗБАВЛЕННЫХ ЖИДКОСТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

А. К. Розенцвайг

(Бузульма)

Изучение совместного движения несмешивающихся жидкостей в трубопроводах, а также в различном промышленном оборудовании является весьма актуальной в практическом отношении задачей, поскольку зачастую важны даже не столько сами значения складывающихся при этом гидродинамических параметров, сколько определяемые ими рациональные режимные условия и эффективность широкого круга технологических процессов в различных отраслях промышленности. Аналитический подход к таким сложным течениям затруднен, в связи с чем необходимо привлекать эксперимент, методы подобия и рассматривать вероятностные ситуации с элементами дисперсной фазы потока, переменными в пространстве и во времени [1]. В частности, осуществление непрерывных массообменных, экстракционных и других химических процессов в жидкостных системах основано на многократном повторении актов слияний и дроблений капель дисперсной фазы и зависит от формы и характера движения двухфазного потока [2]. При полуэмпирическом подходе к расчету коэффициента гидравлического сопротивления разбавленных эмульсий также необходима априорная информация о размере капель дисперсной фазы [3].

Дробление капель дисперсной фазы при движении жидкостных эмульсий в турбулентном режиме по трубопроводам происходит под воздействием динами-