

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ СМЕСИ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

А. П. Бурдуков, Н. В. Валухина, В. Е. Накоряков

(Новосибирск)

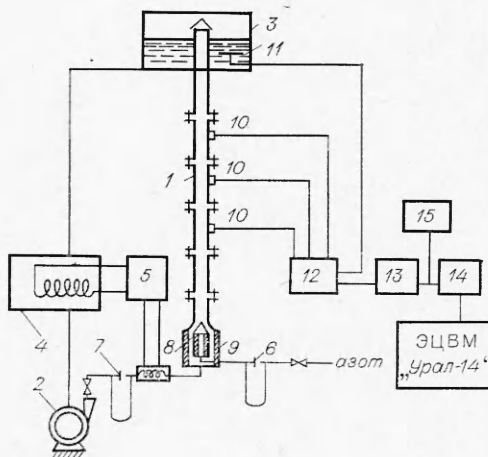
В работах [1,2] в результате измерений гидравлического сопротивления и трения в вертикальных каналах была обнаружена область течения с аномально-высокими значениями этих величин. Измеренные величины сопротивления на порядок превышают значения, получающиеся по соответствующим расчетным методикам. Эта область течения соответствует пузырьковому режиму течения при малых приведенных скоростях жидкой фазы.

В указанных работах не дано четкого объяснения наблюдаемому эффекту. Предложенная в [2] расчетная методика, претендующая на учет этого эффекта, не описывает результаты экспериментов других авторов, например результаты [1].

В данной работе установлены границы существования этого режима и приведено измерение средних и пульсационных характеристик трения. Показано, что область аномально-высоких напряжений сдвига соответствует ламинарным и переходным числам Рейнольдса. Результаты измерения пульсаций трения говорят об отсутствии беспульсационных режимов течения газожидкостной смеси даже при очень малых числах Рейнольдса. Высказано предположение о возможности возникновения «псевдотурбулентного» поперечного переноса импульса за счет осцилляторного движения пузырей в канале. Подобное объяснение аналогичному эффекту в гидродинамике крови дано Регирером [3].

Установка (фиг. 1) представляет собой замкнутый по жидкости циркуляционный контур, состоящий из цилиндрического секционированного вертикального канала 1 из органического стекла, циркуляционного насоса 2 из нержавеющей стали, сепаратора 3, приемного бака 4, термостата 5, дроссельных измерителей расхода газа 6 и жидкости 7, генератора пузырьков 8, изготовленного в виде фильтра из обработанных на абразиве оргстеклянных дисков, между которыми подается газ, а между внешней образующей фильтра и камерой 9 — жидкость. Размер получающихся пузырьков $50 \div 500$ мкм. Измерение напряжения сдвига выполнено с помощью электродиффузионного метода, основанного на измерении скорости окислительно-восстановительной электрохимической реакции в диффузионном режиме на поверхности микроэлектрода, заделанного заподлицо с поверхностью стенок трубы.

Электрический ток цепи (поляризованные датчики-катоды 10, анод 11) через переключатель 12 подается на электродиффузионный преобразователь 13, на аналого-цифровой преобразователь 14 и затем на вход ЭВМ "Урал-14".



Фиг. 1

«Урал-14» или на регистрирующий прибор (например, шлейфовый осциллограф) 15.

Экспериментальный участок — вертикальная труба с внутренним диаметром 15 мм, длиной 6 м, изготовленная в виде секций с блоками микродатчиков катодов, установленных по длине трубы на различных расстояниях от входа.

Датчик (катод, изготовленный из платиновой проволоки диаметром $50 \div 500$ мкм или платиновой фольги 50×500 мкм) вваривается в цилиндр из химически стойкого стекла, который клеивается в державку из нержавеющей стали и затем весь блок в сборе обрабатывается на станке датчик притирается при помощи специальных притиров и порошков. Блок датчика монтируется в стенке трубы так, что датчик-пластинка ориентирован своей узкой гранью по потоку. Особое внимание уделяется отсутствию выступов между стенкой трубы и блоком датчика.

В экспериментах использовался $(0,1 \div 1) \cdot 10^{-2}$ нормальный раствор красной и желтой кровяной соли ($K_3Fe(CN)_6$ и $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$) в 0,5-нормальном фоновом растворе NaOH в дистиллированной воде.

Подробное описание электродиффузионного метода измерения трения имеется в [1]. При больших величинах напряжения между катодом и анодом в используемом составе электролита, исключающем миграцию ионов в электрическом поле, уравнение диффузии в диффузионном слое на контрольном электроде имеет вид

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2},$$

$$c(x > 0, 0) = 0, \quad c(x, \infty) = c_{\infty}.$$

Поскольку профиль скорости в пределах диффузионного слоя линеен $U = \frac{\tau}{\mu} y$, решение приведенного уравнения дает прямую связь между током и трением. Расчет трения выполнялся по формуле, получаемой из уравнения диффузии,

$$\tau = \frac{1,87\mu I^3}{F^3 L^2 h^3 c_{\infty}^3 D^2} \text{ — для плоского,}$$

$$\tau = \frac{3,16\mu I^3}{F^3 d_0^5 c_{\infty}^3 D^2} \text{ — для круглого}$$

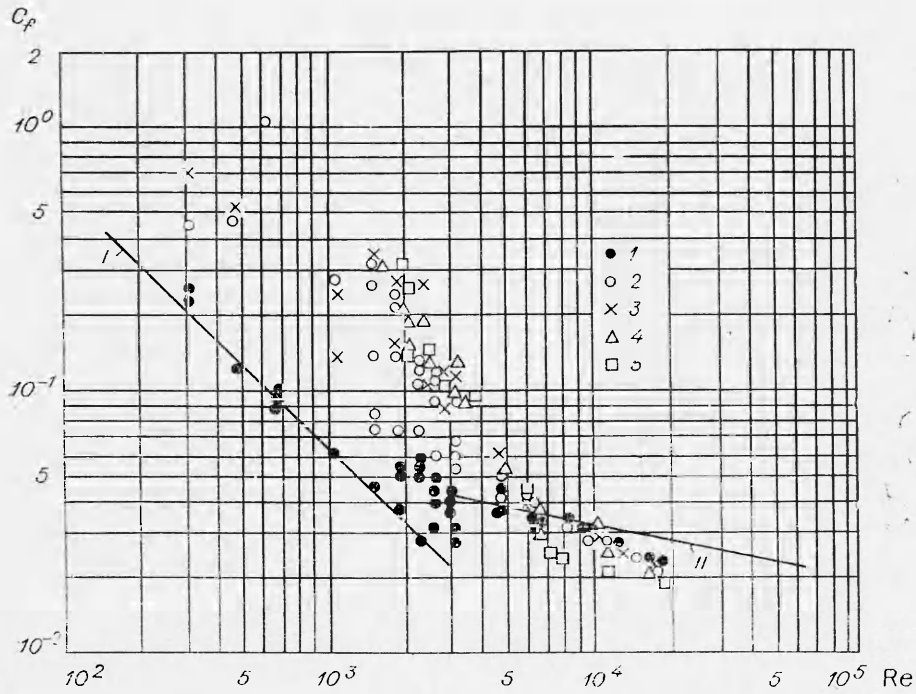
датчиков. Здесь μ — динамическая вязкость; I — предельный ток на датчике; F — число Фарадея; L — размер датчика вдоль по потоку; h — ширина датчика; c_{∞} — концентрация ионов окислителя в объеме; D — коэффициент диффузии.

Обработка сигнала как случайного процесса и пересчет спектральной плотности потока массы на спектральную плотность пульсаций трения проводился с использованием зависимостей для частотных характеристик, приведенных в [1].

Схема обработки результатов эксперимента с помощью централизованной системы сбора и обработки информации приведена в [4].

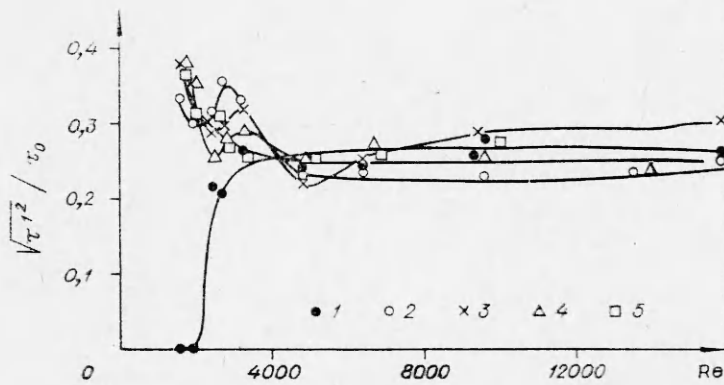
Результаты экспериментов по измерению среднего трения и дисперсии пульсаций трения при расходе газосодержания $\beta = 0 \div 0,1$ ($1 - \beta = 0$; $2 - \beta = 0,005$; $3 - \beta = 0,025$; $4 - \beta = 0,045$; $5 - \beta = 0,07$) приведены на фиг. 2, 3. Данные по c_f при $\beta = 0$ удовлетворительно согласуются с из-

вестными зависимостями Блазиуса I — для ламинарного и Никурадзе II — для турбулентного режима течения. В качестве характерной скорости на фиг. 2, 3 взята скорость смеси $W = W_0 + W^*$, вязкость принята равной вязкости жидкости, плотность — плотности жидкости.



Фиг. 2

Удивительно, что при малых газосодержаниях при низких Re наблюдается сильное влияние газосодержания на средние и пульсационные характеристики двухфазного потока. В области больших чисел Рейнольдса газосодержание практически не влияет на эти характеристики и смесь можно рассматривать как гомогенную, подчиняющуюся закономерностям течения однофазной жидкости.



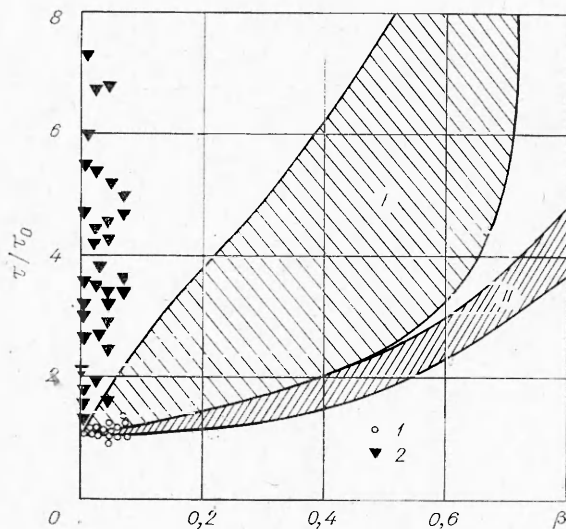
Фиг. 3

Действительно, в области $Re > 5000$ трение практически совпадает с данными Никурадзе, а относительная дисперсия пульсаций трения $\sqrt{\tau'^2}/\tau_0 = 0,3$, что согласуется с [известными [данными для однофазных потоков [5-8].

В случае малых чисел Re среднее трение при малых газосодержаниях в несколько раз превышает трение при течении однофазной жидкости, особенно этот эффект заметен в переходном режиме и при очень малых числах Рейнольдса.

Из фиг. 3 видно, что также необычным образом изменяется величина относительной среднеквадратичной пульсации трения. При $Re < 1900$ в однофазной жидкости $\sqrt{\tau'^2}/\tau_0 = 0$, при $\beta \simeq 0,01$ $\sqrt{\tau'^2}/\tau_0 = 0,35 \div 0,38$, приближаясь к величине, равной 0,3 в области турбулентного режима течения.

В предшествующих работах по измерению гидравлического сопротивления при течении газожидкостной смеси в вертикальных трубах



Фиг. 4

с достаточной степенью точности. На фиг. 4 приведены результаты экспериментов (1 — $Re > 3200$, 2 — $Re < 3200$). Сопоставление фиг. 2 и 4 делает очевидным тот факт, что так называемая «аномальная» область выделяется значениями чисел Рейнольдса, соответствующими ламинарному и переходному режимам течения.

Приведенные данные убедительно свидетельствуют о том, что нельзя говорить о чисто ламинарном режиме течения пузырьковой смеси даже при очень малых числах Рейнольдса. Течение в этом случае сопровождается большим относительным уровнем пульсаций трения и отличается высокими значениями напряжений сдвига на твердой стенке. Спектр пульсаций трения в пределах точности расчета является сплошным.

Возможными причинами этих явлений могут служить хаотичные осцилляторные движения пузырей у твердой поверхности, сопровождающиеся переносом импульса в поперечном направлении. Характерный масштаб движения определяется, по-видимому, размером пузырей, величиной газосодержания и напряжением сдвига на твердой поверхности. Такие движения пузырей наблюдаются визуально даже при числах

[1,2] было обнаружено существование области с аномально-высокими значениями сопротивления при малых газосодержаниях и малых приведенных скоростях жидкой фазы. На фиг. 4 приведены результаты экспериментов различных авторов. Данные в области II хорошо описываются известными зависимостями [4-6], I — область, где трение ведет себя «аномальным» образом, не подчиняясь этим зависимостям. Данные в области аномально-высокого напряжения сдвига не обобщаются в координатах фиг. 4, и нет методов, позволяющих рассчитать трение в этом режиме

$Re < 1000$ и, безусловно, могут привести к радикальному изменению характера течения.

Аналогичное объяснение эффекту увеличения интенсивности переноса малых частиц (тромбов в крови) в присутствии крупных деформируемых частиц (эритроцитов) было впервые дано Регирером [3].

На основании сказанного режим течения пузырьковой смеси в области малых чисел Рейнольдса может быть назван «микротурбулентным» пузырьковым режимом. Из фиг. 2 видно, что коэффициент трения в этом режиме уже не определяется одним числом Рейнольдса. Если верны изложенные выше представления, то коэффициент трения должен зависеть от газосодержания и параметра, включающего в себя средний размер пузыря.

Для правильного обобщения результатов и более глубокого понимания природы процесса необходимы эксперименты по измерению трения с регистрацией размеров пузырей и визуализацией картин их движения в пристенной зоне. Существенный вклад в понимание механизма «микротурбулентного» переноса импульса могут дать опыты по измерению распределения скорости и пульсаций скорости по сечению канала.

Поступила 26 VIII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Накоряков В. Е., Бурдуков А. П., Покусав Б. Г., Кузьмин В. А., Утович В. А., Христофоров В. В., Гатевосян Ю. В. Исследование турбулентных течений двухфазных сред. Новосибирск, изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1973.
2. Ueda T. On upward flow of Gas — liquid mixtures in vertical tubes.— «Bull. JSME», 1967, vol. 10, N 42.
3. Регирер С. А. Некоторые вопросы гидродинамики кровообращения.— В кн.: Гидродинамика кровообращения. М., «Мир», 1971.
4. Электродиффузионная диагностика турбулентных потоков. Новосибирск, изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1973.
5. Хабахпашева Е. М., Перепелица Б. В., Михайлова Е. С., Орлов В. В., Карстен В. М., Ефименко Г. И. Методика и результаты исследований пристенной турбулентности в условиях теплообмена и повышенного уровня пульсаций. Тепло- и массоперенос. Т. 1, М., «Энергия», 1968.
6. Арманд А. А., Невструева Е. И. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе.— «Изв. ВТИ», 1950, № 2.
7. Lockart R. W., Martinelly R. E. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes.— «J. Chem. Eng. Progr.», 1949, vol. 45, N 1.
8. Mitchell I. F., Hanratty I. J. A study of turbulent ceof a wall using an electrochemical wall shear-stress meter.— «J. Fluid Mech.», 1966, vol. 26, pt. 1.