

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ГАЗОЖИДКОМ ПОТОКЕ ПРИ МАЛЫХ ГАЗСОДЕРЖАНИЯХ

А. П. Бурдуков, Б. К. Козьменко, В. Е. Накоряков

(Новосибирск)

В работе [1] приведены результаты измерения трения на стенке канала в пузырьковом режиме в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Показано, что понятие ламинарного режима течения бессмысленно при его применении к течению двухфазной смеси, так как даже при очень малых числах Рейнольдса уровень пульсаций трения высок, а спектр пульсаций трения является сплошным. Среднее трение при этом много больше расчетного, причем величина коэффициента сопротивления не является однозначной функцией числа Рейнольдса.

В данной работе приведены результаты измерения профилей скорости жидкой фазы, выполненные с помощью электродиффузионного метода. Показано, что при числах Рейнольдса, соответствующих турбулентному режиму течения, профиль скорости в двухфазной смеси близок к турбулентному и не зависит от газосодержания.

При числах Рейнольдса, соответствующих ламинарному режиму течения, профиль скорости двухфазного потока сильно отличается от характерного ламинарного профиля скорости однофазной жидкости. Он более заполнен, близок к турбулентному и сильно в этом смысле зависит от газосодержания. Указанный результат находится в полном соответствии с данными [1].

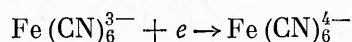
Определение скоростей фаз в газожидком потоке представляет несомненный интерес с точки зрения создания расчетных моделей и методов для таких потоков.

В настоящее время при измерении скорости жидкости при помощи термоанемометра обычно используются датчики пленочного типа. Очевидно, что в газожидком потоке при размерах газовых включений менее 1 мм размеры чувствительного элемента и пузырьков газа соизмеримы и измерение скорости жидкости без нарушения структуры потока практически невозможно. Кроме того, использование термоанемометрического метода при исследовании газожидкостных потоков в значительной мере осложнено неизбежными погрешностями, вызванными испарительным охлаждением датчика при прохождении пузырьков газа.

Электродиффузионный метод [2] обладает рядом несомненных преимуществ с этой точки зрения, так как чувствительный элемент в таком датчике может иметь размер менее 100 мкм. Эффект испарения отсутствует. Сущность метода заключается в измерении скорости окислительно-восстановительной реакции, происходящей в диффузионном режиме. Чувствительные элементы — микрокатод и анод, существенно большей площади поверхности, размещаются в потоке электролита и составляют вместе с электролитом электрохимическую ячейку. Реакция протекает в диффузионном режиме, величина тока насыщения I_n является функцией скорости жидкости в окрестности микродатчика-катода и не зависит от напряжения V . Концентрация рабочих ионов на катоде при этом близка к нулю, т. е. катод поляризован.

Нами использовался $(0,1-1)10^{-2}$ — нормальный раствор красной и желтой кровяной соли $K_3Fe(CN)_6$ и $K_4Fe(CN)_6$ в 0,5-нормальном фоновом

растворе NaOH в дистиллированной воде. В диффузионном режиме на катоде протекает реакция



и рабочими ионами являются ионы $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$, на аноде — обратная реакция с образованием $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$. Поляризованный датчик-катод состоит из платиновой проволоки диаметром $d=50$ мкм, вваренной в стеклянную оболочку, причем общий диаметр датчика составляет ~ 100 мкм. Торец шлифовался таким образом, что рабочий платиновый элемент находился заподлицо со стеклянной оболочкой. Датчик ориентирован в потоке так, как показано на фиг. 1. В диффузионном режиме идет процесс массообмена между потоком и поляризованным датчиком-катодом, подчиняющийся закономерностям гидродинамики и массообмена в окрестности лобовой точки торца продольно-обтекаемого цилиндра, и, согласно [3],

$$(1) \quad \text{Nu} = 0,753 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2},$$

где $\text{Nu} = \frac{BR}{D}$; $\text{Pr} = \frac{\nu}{D}$; $\text{Re} = \frac{WR}{\nu}$;

W — скорость жидкости; R — радиус стеклянной оболочки датчика; Φ — константа Фарадея;

$$(2) \quad B = \frac{I}{C_{\infty} \Phi F}$$

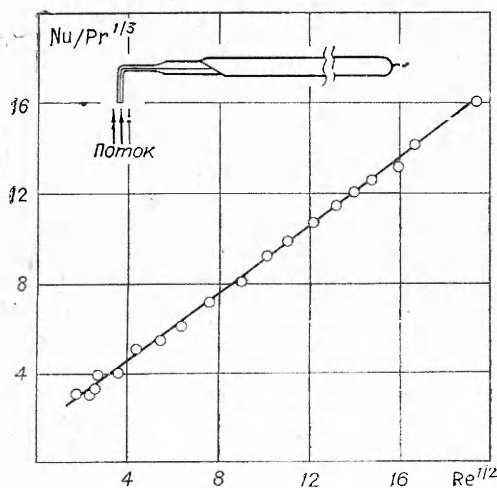
— коэффициент массоотдачи; F — площадь платинового электрода; ν — кинематическая вязкость; D — коэффициент диффузии; I — величина предельного диффузионного тока; C_{∞} — концентрация ионов $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ в растворе. По измеренной в опытах величине тока можно рассчитать, используя (1), (2), коэффициент массоотдачи и скорость жидкости.

Каждый датчик после изготовления тарировался на специальных установках. Тарировка одного из датчиков приведена на фиг. 1. Конечная расчетная зависимость для всех датчиков имеет вид формулы (1) с коэффициентом, определяемым в процессе тарировки. Для датчика, результаты испытания которого приведены на фиг. 1, коэффициент равен 0,8.

Концентрация и размеры газовых включений очень малы, частота пульсаций тока на датчике, как показали эксперименты, достаточно низка, и расчет скорости можно производить, считая процесс квазистационарным.

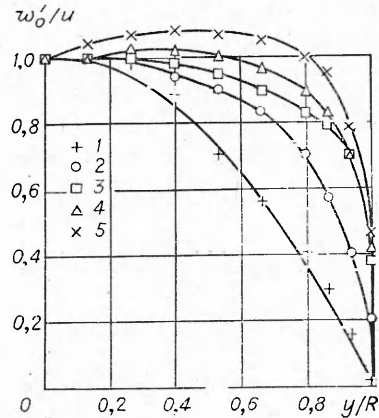
Метод исследования спектральных характеристик трения в газожидкостных потоках представлен в [2]. В настоящее время нами проводятся работы по изучению спектральных характеристик скоростей жидкости в таких потоках.

Измерение скорости жидкой фазы проводилось на установке, конструкция которой подробно описана в [1]. Электрический сигнал от поляризованного датчика-катада и анода



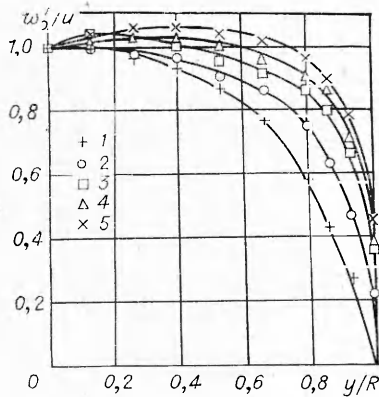
Ф и г. 1

подается через электродиффузионный усилитель на вход ЭВМ или на регистрирующий прибор (самопишущий потенциометр или плейфовый осциллограф). В опытах измерялась величина диффузионного тока. Эксперименты проводились в пузырьковом режиме течения при объемных расходах газосодержаниях $\beta = 0,01 - 0,1$. Размеры пузырьков по визуальным наблюдениям и фотографиям менялись при этом в пределах 50—500 мкм в зависимости от расхода газа и жидкости. В работе [1] показано, что в упомянутом диапазоне газосодержаний в области малых чисел Рейнольдса ($Re < 3000$) реализуется режим течения с повышенными по сравнению с расчетными напряжениями сдвига у твердой поверхности.

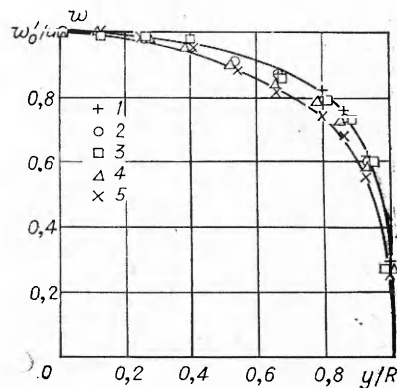


Ф и г. 2

Несмотря на то, что числа Рейнольдса соответствовали ламинарному режиму течения, уровень пульсаций трения в опытах был очень велик, причем отношение среднеквадратичного пульсационного трения к среднему трению росло с уменьшением Re . Величина коэффициента сопротивления при этом не является однозначной функцией Re , а существенно зависит, по-видимому, от среднего размера пузырей в пристенной зоне. Была высказана гипотеза о том, что при малых Re существенную роль играет поперечный перенос импульса за счет хаотического движения пузырей, вызванного различного рода гидродинамическими силами. Такой режим течения, условно названный «микротурбулентным» пузырьковым режимом, представляет определенный интерес, в связи с чем и выполнены опыты по измерению профилей скорости жидкой фазы в двухфазной смеси при малых газосодержаниях. В этом режиме пузырьки не накальвались на электродиффузионный датчик и фиксировалась практически скорость жидкой фазы. На фиг. 2—4 соответственно представлены результаты измерений профилей скорости жидкой фазы для ламинарного ($Re = 1920 - 2060$), переходного ($Re = 2400 - 2600$) и турбулентного ($Re = 6400 - 6800$) режимов течения при газосодержаниях (1 — $\beta = 0$; 2 — $\beta = 0,005$; 3 — $\beta = 0,025$; 4 — $\beta = 0,045$; 5 — $\beta = 0,07$). Здесь $Re = \frac{(W'_0 + W''_0) d}{\nu}$;



Ф и г. 3



Ф и г. 4

W'_0 и W''_0 — приведенная скорость жидкой и газовой фаз; d — диаметр трубы; ν — вязкость жидкости; u — скорость на оси канала.

Разделение режимов на ламинарный, переходный и турбулентный условно, и границы перехода взяты для условий однофазного течения. Из фиг. 4 видно, что в области больших чисел Рейнольдса профили скорости в двухфазной жидкости подчиняются обычным закономерностям, свойственным турбулентным однофазным потокам, т. е. $\frac{W'_0}{u} = \left(\frac{y}{R}\right)^{1/n}$, где $1/n = 1/6 \dots 1/7$. При числах Рейнольдса, обычно соответствующих условиям перехода ламинарного течения в турбулентное (см. фиг. 3), профили скорости существенно отличаются от профилей для однофазной жидкости.

При условно-ламинарных параметрах потока ($Re=1920$ и менее) отклонение результатов экспериментов от данных, полученных на однофазной жидкости, становится очень сильным.

На профиле скорости при газосодержании, равном $\beta=0,07$, появляются характерные участки со скоростью, большей, чем на оси. При остальных газосодержаниях профиль более заполнен, чем при течении однофазной жидкости, причем эта деформация весьма заметна даже при ничтожно малых концентрациях газовой фазы. Приведенные результаты находятся в полном соответствии с полученными в [1] данными по измерению средних и пульсационных характеристик трения на стенке.

Таким образом, результаты работы [1] и данной работы говорят о необходимости пересмотра представлений о механизме течения газожидкостной смеси в пузырьковом режиме в области малых чисел Рейнольдса.

Поступила 10 XII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдуков А. П., Валукина Н. В., Накоряков В. Е. Особенности течения газожидкостной пузырьковой смеси при малых числах Рейнольдса. — ПМТФ, 1974, № 4.
2. Накоряков В. Е., Бурдуков А. П., Покусаев Б. Г., Кузьмин В. А., Утович В. А., Христофоров В. В., Татевосян Ю. В. Исследование турбулентных течений двухфазных сред. Новосибирск, изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1973.
3. Hiroaki Matsuda, Joseph Yamada. Limiting diffusion current in hydrodynamic voltametry. — J. Electroanal. Chem., 1974, vol. 30, p. 264—270.

УДК 532. 712

МЕДЛЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОЙ КАПЛИ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

В. А. Городцов
(Москва)

Задача об установившемся медленном поступательном движении круглой жидкой капли (пузырька) в вязкой жидкости была решена Адамаром и Рыбчинским [1,2]. Результаты экспериментальных измерений редко согласуются с формулой Адамара — Рыбчинского. Это связано с заторможенностью течения внутри капли из-за поверхностно-активных примесей, которых обычно достаточно много в жидкостях. Тем не менее задачу о неустановившемся движении капли будем рассматривать в простейшем случае, предполагая, что поверхностно-активные вещества отсутствуют.

Рассмотрены задачи о колебаниях и движениях с произвольными ускорениями шарообразной капли в вязкой жидкости. Анализируется формула для силы сопротивления капли жидкости с большой вязкостью, упруговязкой капли и частицы с «проскальзыванием».

1. Если движения капли столь медленны, что можно ограничиться линейным приближением, а капля столь мала, что изменением ее формы можно пренебречь [1, 2], то течения внутри и вне капли описываются