

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

О. Н. Кашицкий, П. М. Кроковный
(Новосибирск)

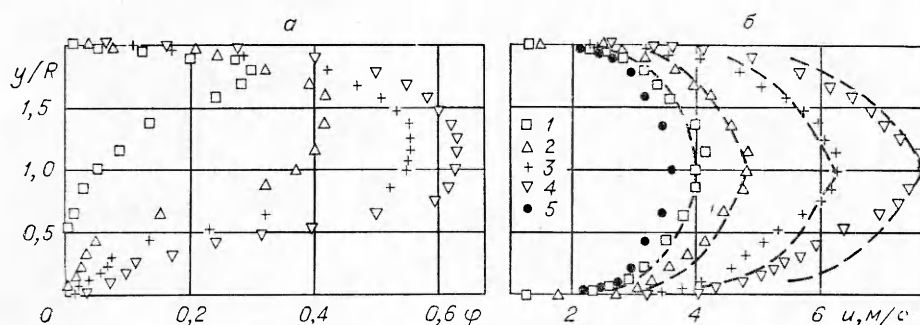
Создание более совершенных и универсальных методов расчета двухфазных потоков требует привлечения подробной экспериментальной информации о турбулентной структуре течения. До последнего времени исследование локальных характеристик двухфазных течений сдерживалось отсутствием надежных методов диагностики этих величин. Появление таких методов измерения, как термоанемометрическая, электрохимическая, метод электропроводности, позволило перейти к получению и накоплению экспериментальных данных о локальных турбулентных характеристиках двухфазных потоков. Достаточно подробное исследование структуры восходящего потока проведено, например, в работах [1—4]. Значительно менее изученным в этом плане является горизонтальный газожидкостный поток, имеющий большое значение для технических приложений (совместный транспорт нефти и газа, химическая технология).

К числу немногочисленных попыток исследования структуры газожидкостного потока в горизонтальной трубе относятся работы [5, 6], в которых проводятся измерения локального газосодержания и средних скоростей жидкости. В работе [7] проведено измерение распределения касательного напряжения на стенке горизонтальной трубы при течении двухфазного потока. Поскольку такого рода течения отличаются чрезвычайной сложностью процессов турбулентного переноса и взаимодействия фаз, для понимания структуры потока необходимо проведение комплексных исследований, включающих измерение возможно большего числа параметров, в том числе и пульсационных величин.

В данной работе проведено исследование средних и простейших пульсационных характеристик двухфазного течения (профилей локального газосодержания и скорости жидкости, интенсивности турбулентных пульсаций скорости) в горизонтальной трубе.

Локальное газосодержание определялось с помощью метода электропроводности, скорость жидкости — электрохимическим методом. Экспериментальная установка описана в [7]. Рабочим участком являлась горизонтальная труба с внутренним диаметром 19 мм, длиной 6 м. Приведенная скорость жидкости менялась от 0,25 до 5 м/с, расходное объемное газосодержание от 0 до 0,9. Давление в рабочей части установки было близко к атмосферному. В качестве рабочей жидкости использовался раствор 0,5 *N* едкого натра и 0,01 *N* ферри-и ферроцианида калия в дистиллированной воде, в качестве газа — азот. Температура жидкости и газа на входе поддерживалась постоянной, равной 25°C, газ предварительно увлажнялся. Измерения проводились в пузырьковом, гребешковом, пробковом и снарядном режимах течения.

Все измерения были проведены в сечении, отстоящем на расстоянии 3,8 м (200 калибров) от места ввода газа, в котором поток можно было считать стабилизированным по длине (см. [7]). Датчик изготавливался путем вваривания платиновой проволоки диаметром 20 мкм в стеклянный капилляр диаметром 50—60 мкм. Торец платиновой проволоки служил чувствительным элементом датчика. Затем датчик вклеивался эпоксидной смолой в державку из нержавеющей стали диаметром 2 мм, которая перемещалась в потоке координатником с ценой деления 0,1 мм. Касание датчиком стенки при установке его в измерительный блок фиксировалось с помощью катетометра, координата вблизи стенки определялась часовым индикатором с ценой деления 5 мкм. Ток датчика усиливался электродиф-



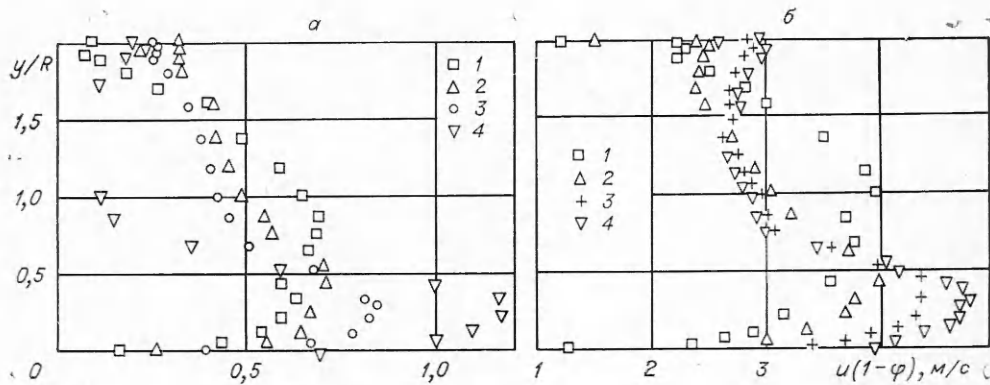
Ф и г. 1

фузионным преобразователем. Затем усиленный сигнал обрабатывался на ЭВМ М-6000, проводившей вычисление всех характеристик течения. Подробно применявшаяся измерительная аппаратура и методика измерения описаны в работе [8].

На фиг. 1 приведены результаты измерения профилей локального газосодержания φ (1, а) и локальной скорости жидкости u (1, б) в зависимости от y/R , где y — координата, отсчитываемая вверх от нижней образующей трубы, R — радиус трубы. Приведенная скорость жидкости w_0 равнялась 3 м/с, расходное объемное газосодержание β изменялось: 1 — $\beta = 0,07$, 2 — $\beta = 0,2$, 3 — $\beta = 0,4$, 4 — $\beta = 0,5$, 5 — $\beta = 0$ (однофазный поток). Режимы течения газожидкостной смеси приведены в таблице. Локальное газосодержание в данной точке определялось как отношение времени существования газовой фазы ко всему времени измерения. Локальная скорость жидкости определялась как среднее значение мгновенной скорости жидкой фазы за время, соответствующее времени нахождения жидкой фазы в данной точке. Профили φ , как видно из фиг. 1, во всех случаях являются несимметричными. Имеет место повышенная концентрация газовой фазы в верхней части трубы. В нижней части трубы в области $y/R \leq 0,2$ имеется зона, в которой газосодержание очень мало ($\varphi/\beta \ll 1$); здесь течет жидкость с мелкими пузырьками газа независимо от условий в области с большими значениями y/R . В верхней половине трубы в пробковом и снарядном режимах профиль газосодержания при приведенных скоростях жидкости менее 1 м/с близок к плоскому. При скорости жидкости 3 м/с профиль становится вытянутым, аналогичным профилям газосодержания в снарядном режиме в вертикальной трубе [1].

Профили локальной скорости жидкости также в общем случае несимметричны, особенно при малых приведенных скоростях жидкости, причем при постоянной приведенной скорости жидкости несимметрия увеличивается с ростом газосодержания, а при постоянном газосодержании — с уменьшением скорости жидкости. Однако точка максимальной скорости находится во всех режимах близко от оси, хотя смещена несколько вверх от нее. При приведенной скорости жидкости 3 м/с профили скорости становятся практически полностью симметричными. Как видно на фиг. 1, б, профили скорости в снарядном режиме несколько менее заполненные, чем в однофазном потоке с тем же значением скорости на оси (штриховые линии). Такое поведение скорости жидкости в

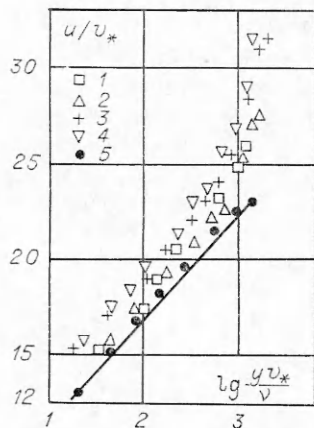
w_0 , м/с	β	Режим течения
0,5	0,2—0,4	Пузырьковый
	0,6—0,7	Пробковый
	0,8	Снарядный
3	0,07—0,2	Пузырьковый
	0,4—0,5	Снарядный



Фиг. 2

снарядном режиме характерно и для восходящего двухфазного потока [1].

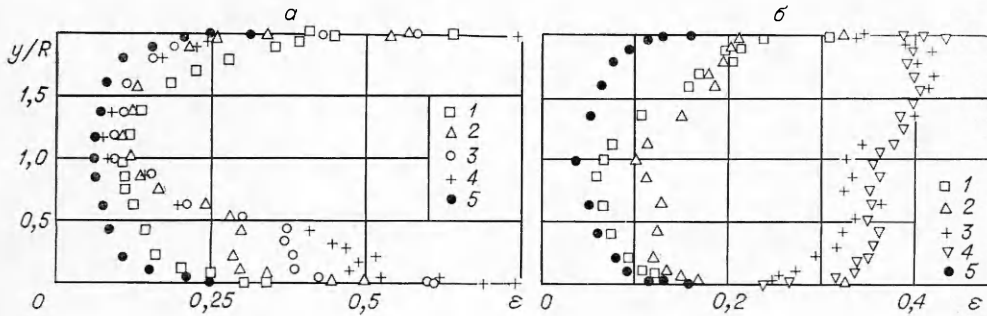
Величина $u(1 - \varphi)$ характеризует среднее значение мгновенной локальной скорости жидкости, осредненной не за время существования жидкой фазы в данной точке, а за все время измерения. Это своего рода локальная расходная скорость, определяющая переносимое через данную точку количество жидкости в единицу времени. На фиг. 2, а, б соответственно показаны профили $u(1 - \varphi)$ при приведенных скоростях жидкости 0,5 и 3 м/с. Значения расходного газосодержания: а) 1 — $\beta = 0,2$; 2 — $\beta = 0,4$; 3 — $\beta = 0,6$; 4 — $\beta = 0,8$; б) 1 — $\beta = 0,07$; 2 — $\beta = 0,2$; 3 — $\beta = 0,4$; 4 — $\beta = 0,5$. Распределения $u(1 - \varphi)$ существенно несимметричны. В какой-то мере близки к симметричным только профили с малыми значениями β , что соответствует пузырьковому режиму, когда газожидкостную смесь грубо можно считать однородной. В остальных режимах имеет место значительное возрастание локальной расходной скорости от верхней образующей трубы к нижней. При больших значениях газосодержания в нижней части трубы имеется весьма существенное увеличение $u(1 - \varphi)$. Это соответствует тому обстоятельству, что в снарядном и пробковом режимах большие пузыри и снаряды сосредоточены вверху, внизу же есть слой жидкости с малыми пузырями. Именно через



Фиг. 3

этот слой и переносится большая часть расхода жидкости. Интересно, что с ростом приведенной скорости жидкости величина данного эффекта не убывает. При практически полностью симметричном профиле локальной скорости жидкости u (см. фиг. 1) все же имеет место значительная неравномерность в скорости переноса жидкой и газовой фазы по сечению трубы. Следует отметить, что в работах [5, 9] под средней скоростью газожидкостного потока понимается именно величина $u(1 - \varphi)$; полученные профили скорости качественно подобны приведенным на фиг. 2.

Представляет интерес обработка полученных профилей скорости жидкости в универсальных полулогарифмических координатах («закона стенки») $u/v_* = f(yv_*/v)$, где v — кинематическая вязкость жидкости, а динамическая скорость v_* определялась по измеренному зна-



Фиг. 4

чению касательного напряжения на стенке в данной точке, определявшемуся также с помощью электрохимического метода [7]. На фиг. 3 приведена обработка в данных координатах локальной скорости жидкости при $w'_0 = 3 \text{ м/с}$ и следующих значениях расходного газосодержания: 1 — $\beta = 0,07$; 2 — $\beta = 0,2$; 3 — $\beta = 0,4$; 4 — $\beta = 0,5$; 5 — $\beta = 0$. Сплошной линией обозначена стандартная зависимость для однофазного течения [10]

$$(1) \quad u/v_* = 5,75 \lg(yv_*/\nu) + 5,2.$$

Как видно из фиг. 3, в двухфазном потоке обработка в координатах «законна стенки» не дает единой зависимости. Точки на фиг. 3 отклоняются от кривой (1) на 5—20%, причем отклонение монотонно возрастает с ростом газосодержания. При обработке локальной расходной скорости в данных координатах четкое расслоение отсутствует, однако отклонение от (1) все же имеет место.

Присутствие в потоке газовой фазы может существенно изменить распределение турбулентных пульсаций скорости жидкости. На фиг. 4 приведены измеренные значения степени турбулентности $\varepsilon = \sqrt{\overline{u'^2}/\bar{u}}$ в двухфазном потоке: а) $w'_0 = 0,5 \text{ м/с}$; 1 — $\beta = 0,2$; 2 — $\beta = 0,4$; 3 — $\beta = 0,6$; 4 — $\beta = 0,7$; б) $w'_0 = 3 \text{ м/с}$; 1 — $\beta = 0,07$; 2 — $\beta = 0,2$; 3 — $\beta = 0,4$; 4 — $\beta = 0,5$. Точки 5 соответствуют однофазному течению. Как видно из фиг. 4, наличие газовой фазы в потоке способствует большей турбулизации жидкой фазы. Следует также отметить нелинейное изменение профилей степени турбулентности в зависимости от β , которые подтверждают «двухслойную» структуру жидкой фазы в пробковом режиме. В жидкой пробке (верхняя часть профиля фиг. 4, а) распределение степени турбулентности имеет такой же характер, что и в однофазном потоке. В основании (нижняя часть профиля) наблюдается расслоение величин степени турбулентности в зависимости от степени возмущения, вносимого в основание жидкой пробкой. Причем степень возмущения увеличивается с ростом скорости пробок, что в свою очередь зависит и от увеличения β . Кроме того, имеется вторая точка перегиба, которая соответствует границе области возмущения, вносимого газовыми пробками.

При $w'_0 = 3 \text{ м/с}$ профили ε имеют следующие особенности. В пузырьковом режиме ($\beta = 0,07$) степень турбулентности возрастает по сравнению с однофазным потоком только в верхней части канала, где движется основная часть пузырьков. Кроме того, весьма специфический характер имеют профили ε при $\beta = 0,4 - 0,5$ (развитый снарядный режим). В этом режиме, по-видимому, большие газовые пузыри, прорываясь сквозь жид-

кость, вызывают очень сильную турбуллизацию жидкости по всему сечению.

Авторы выражают благодарность Ф. Е. Кушнiru за оказанную помощь в проведении настоящего исследования.

Поступила 29 VIII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow. — «Intern. J. Multiphase Flow», 1975, vol. 2, N 3.
2. Herringe R. A., Davis M. R. Structural development of gas-liquid mixture flows. — «J. Fluid Mech.», 1976, vol. 73, N 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. Бурдуков А. П., Валукина Н. В., Накоряков В. Е. Особенности течения газожидкостной пузырьковой смеси при малых числах Рейнольдса. — ПМТФ, 1975, № 4.
5. Арманд А. А. Сопротивление при движении двухфазной системы по горизонтальным трубам. — «Изв. ВТИ», 1946, № 1.
6. Неупов Г. П., Мамаев В. А. Экспериментальное исследование турбулентного раздельного течения газожидкостной смеси в горизонтальной трубе. — «Нефтяное хоз-во», 1968, № 6.
7. Кроковный П. М., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Утович В. А. Экспериментальное исследование горизонтального двухфазного потока электродиффузионным методом. — ПМТФ, 1973, № 2.
8. Бурдуков А. П., Кашинский О. Н., Малков В. А., Однорал В. П. Диагностика основных турбулентных характеристик двухфазных потоков. — ПМТФ, 1979, № 4.
9. Мамаев В. А., Неупов Г. П. Профиль скоростей в пробковом газожидкостном течении. — «Нефтяное хоз-во», 1969, № 12.
10. Ротта И. К. Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. Л., 1967.

УДК 536.252 : 532.517.6

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДИФФУЗИОННОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ

П. И. Гешев, А. И. Черных

(Новосибирск)

Датчик скорости представляет собой платиновую проволочку 1, окруженную стеклом 2 (фиг. 1). Суть электродиффузионного метода измерений кратко заключается в следующем: поток электролита, содержащего два сорта ионов, например, $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ и $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$, набегают на датчик нормально его рабочей поверхности; на платине поддерживается достаточно большой отрицательный потенциал (0,4—0,8 В), приводящий к реакции перезарядки трехзарядного иона в четырехзарядный $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$; данная электрохимическая реакция примечательна тем, что среди окислительно-восстановительных реакций она имеет, по-видимому, наибольшую скорость и протекает настолько быстро, что скорость изменения тока через катод ограничивается лишь конвективной диффу-