

3. Васильев А. С., Ильичев А. Ф., Казберук Е. Д., Цинобер А. Б. О возможности влияния слизи на гидродинамическое сопротивление рыб.— «Изв. АН СССР. МЖТ», 1975, № 1.
4. Меркулов В. И., Хотинская В. Д. Механизмы уменьшения гидродинамического сопротивления у некоторых видов рыб.— В кн.: Бионика, 1969.

УДК 532.529.5 : 532.574.8

ДИАГНОСТИКА ОСНОВНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

А. П. Бурдуков, О. Н. Кашинский, В. А. Малков, В. П. Однорал
(Новосибирск)

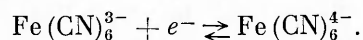
В настоящее время в области экспериментального исследования двухфазных газожидкостных потоков наметился переход от измерения осредненных характеристик (перепад давления, среднее газосодержание и средний коэффициент теплоотдачи) к детальному изучению турбулентной структуры течения. Интерес представляет определение локальных значений газосодержания, скоростей фаз, напряжения трения на стенке, а также пульсационных и спектральных характеристик.

К числу наиболее подробных исследований в этой области следует отнести появившиеся в последние годы работы [1—3], где приведены результаты измерений локального газосодержания и скоростей жидкости и газа, а также интенсивности пульсаций скорости. Основными применяемыми методиками являются термоанемометр, метод электропроводности и частично оптический зонд.

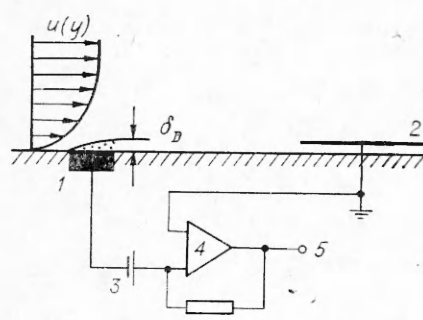
В течение ряда лет в Институте теплофизики СО АН СССР проводятся детальные исследования турбулентных характеристик газожидкостных потоков. В основу применяемых методик положена электрохимическая диагностика, которая дает возможность проводить измерение средних значений и пульсаций касательного напряжения на стенке, а также повысить разрешающую способность при измерении скорости фаз. Это позволяет существенно дополнить информацию, даваемую указанными выше методами, и получить более подробную картину течения.

В данной работе описывается методика определения основных характеристик газожидкостного потока.

1. Касательное напряжение на стенке. Электрохимический метод измерения касательного напряжения на стенке [4—6] заключается в следующем. В поток электролита специального состава помещаются два электрода: катод малого размера и анод. Катод служит датчиком касательного напряжения и представляет собой небольшой отрезок платиновой или никелевой проволоочки или пластинки, заделанной заподлицо в стенку канала. При подаче напряжения на электродах начинает протекать быстрая электрохимическая реакция, в результате которой происходит поляризация катода. Для случая наиболее распространенного состава электролита, представляющего раствор $10^{-3}N - 10^{-2} N$ ферри- и ферроцианида калия и $0,5-2 N$ едкого натра в дистиллированной воде, реакция имеет вид



В результате реакции концентрация ионов $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ на катоде становится равной нулю, и за счет разности концентраций между потоком и поверхностью катода возникает процесс диффузии ионов феррицианида к катоду.



Фиг. 1

Находящиеся в растворе в большом по сравнению с ионами ферри- и ферроцианида количестве ионы Na^+ и OH^- , образующиеся при диссоциации едкого натра, создают высокую электропроводность раствора и исключают миграцию активных ионов под действием электрического поля. Площадь анода выбирается в несколько сот или тысяч раз больше площади катода, поэтому процесс диффузии ионов ферроцианида к аноду не оказывает влияния на процесс протекания тока. Таким образом, при указанных условиях величина

тока в цепи определяется только диффузией ионов к катоду.

Принципиальная схема измерения напряжения трения приведена на фиг. 1. Заделанный в стенку катод 1 и анод 2 находятся в потоке жидкости с профилем скорости $u(y)$. На датчик подается постоянное напряжение с помощью источника 3, ток усиливается усилителем постоянного тока 4, сигнал с выхода усилителя 5 подается на измерительную схему. На катоде возникает диффузионный пограничный слой толщиной δ_D , уравнение диффузии для которого имеет вид

$$(1.1) \quad \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2},$$

где c — концентрация; t — время; x — продольная координата; y — координата, перпендикулярная к стенке; u , v — составляющие скорости жидкости соответственно в направлении осей x и y ; D — коэффициент диффузии ионов феррицианида. Концентрация активных ионов вне диффузионного пограничного слоя постоянна и равна c_0 .

Вследствие малой подвижности ионов $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ число Шмидта для данной системы велико (порядка 1500), поэтому, а также из-за малых размеров катода толщина диффузионного слоя оказывается много меньше толщины вязкого подслоя, и в пределах диффузионного слоя можно считать профиль скорости линейным

$$u = y\tau/\mu,$$

где τ — напряжение трения на стенке; μ — вязкость. Если τ не меняется во времени, (1.1) имеет при граничных условиях $c = c_0$ при $x = 0$, $c = c_0$ при $y = \infty$, $c = 0$ при $y = 0$, $0 \leq x \leq l$ (l — размер датчика по потоку) стационарное решение, из которого можно определить диффузионный поток к поверхности электрода.

В критериальном виде связь между диффузионным потоком и касательным напряжением на стенке имеет вид [4]

$$(1.2) \quad kl/D = 0,807(\tau l^2/\mu D)^{1/2},$$

где $k = I/SFc_0$ — коэффициент массоотдачи; I — ток датчика; S — площадь электрода; F — число Фарадея.

Если τ непостоянно во времени, по записи диффузионного тока датчика можно определить мгновенное значение касательного напряжения на стенке. Вследствие малой подвижности активных ионов в общем случае необходимо принимать во внимание инерционность тока датчика по отношению к изменению напряжения трения. Из решения уравнения (1.1) при $\tau = \bar{\tau} + \varepsilon \exp(i\omega t)$, где $\bar{\tau}$ — среднее по времени значение касатель-

ного напряжения на стенке; ε и ω — амплитуда и круговая частота пульсаций трения, определяется функция датчика $H(\omega)$, отражающая его амплитудно-частотную характеристику. Модуль этой функции имеет вид [7]

$$(1.3) \quad |H(\bar{\omega})|^2 = 1/V \sqrt{(9 + 0,54\bar{\omega}^2)^2 + (0,027\bar{\omega}^3)^2},$$

где $\bar{\omega} = \omega(\mu l^2/\tau^2 D)^{1/3}$. Зная передаточную функцию, можно восстановить из спектральной плотности пульсаций тока S_I датчика спектральную плотность пульсаций трения S_τ на стенке, пользуясь соотношением

$$S_\tau = S_I/|H(\bar{\omega})|^2.$$

Это позволяет определить среднеквадратичное значение интенсивности пульсаций трения.

Работа датчика трения в двухфазном потоке аналогична работе в однофазном потоке, поскольку во всех режимах течения на стенке существует пленка жидкости, достаточная для развития диффузионного слоя. Все приведенные выше соотношения оказываются поэтому применимыми и к измерениям в двухфазном потоке.

Для определения τ из формулы (1.2) необходимо знать свойства жидкости (вязкость, коэффициент диффузии), размеры датчика и концентрацию активных ионов. Поскольку все эти величины известны с определенной погрешностью, суммарная ошибка в измерении может достигать 10—15%. Поэтому целесообразно применять относительный вариант метода, переписав (1.2) в виде

$$\tau = AI^3,$$

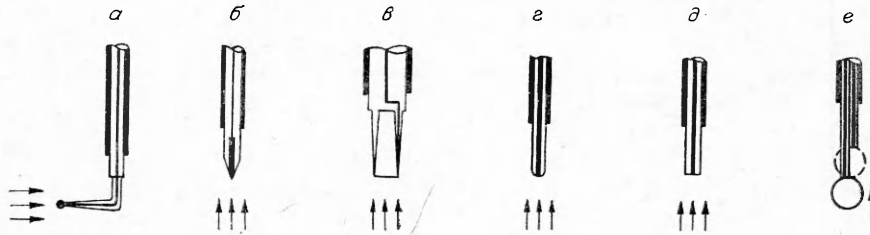
где A — коэффициент, определяемый при тарировке. Тарировку удобно проводить при течении в трубе однофазной жидкости, определяя коэффициент трения по известному расходу по формуле Гагена — Пуазейля для ламинарного режима или Блазиуса для турбулентного режима. При этом погрешность измерения τ равна 3—5%.

Передаточная функция вида (1.3) рассчитывается в предположении, что интенсивность пульсаций трения на стенке много меньше среднего значения. Это условие часто не выполняется в двухфазных потоках. Поэтому целесообразно проводить измерения в той полосе частот, когда $H(\omega) \approx H(0)$ (полоса квазистационарности). Этого можно достичь, применяя датчики малых размеров. Авторами использовались датчики размером 20×200 мкм. В этом случае реальный спектр энергосодержащих частот пульсаций трения вполне укладывается в полосу квазистационарности. Учет передаточной функции необходим только при измерении высокочастотной части спектра.

2. Скорость жидкости. Единственным применяемым в настоящее время методом определения локальной скорости жидкости в двухфазном потоке является метод термоанемометра постоянной температуры [1, 2]. В качестве датчика используется тонкая металлическая пленка, нанесенная на изолирующую подложку, обычно конической формы. В работе [2], например, размер датчика был равен 0,6 мм. Изготовить пленочный датчик существенно меньшего размера невозможно.

В ряде случаев, например при работе в потоках с мелкими пузырьками газа, а также при измерениях вблизи стенки, требуется использовать значительно более миниатюрные датчики. С этой целью авторами был применен электрохимический метод измерения скорости.

Принцип работы электрохимического датчика скорости такой же, как и датчика касательного напряжения на стенке. Электрод (катод)



Ф и г. 2

определенной конфигурации вводится в поток, на его поверхности происходит электрохимическая реакция. Процесс диффузии активных ионов к поверхности катода определяется скоростью течения жидкости в непосредственной близости от датчика.

На фиг. 2 приведены формы электрохимических датчиков скорости, применявшихся разными авторами: *a* — сферическая [8], *б* — коническая [9], *в* — типа проволочного термоанемометра [5], *г* — полусферическая [5, 10], *д* — типа «лобовая точка» [10, 11]. В двухфазных потоках, очевидно, предпочтительно применение последних двух типов, так как размеры их могут быть сделаны весьма малыми.

Решение уравнения диффузии с известным профилем скорости вблизи датчика дает связь между скоростью потока и током датчика. В критериальном виде эта зависимость имеет вид [5, 12]

$$(2.1) \quad Nu_D = B Re^{1/2},$$

где Nu_D и Re — диффузионное число Нуссельта и число Рейнольдса, определяемые следующим образом:

$$Nu_D = Id/FSc_0D, \quad Re = ud/\nu,$$

d — характерный размер датчика. Коэффициент B зависит от формы электрода.

Поскольку для миниатюрного датчика трудно точно определить размер, целесообразно не применять соотношение (2.1), а строить зависимость $I(u)$ (где I — ток датчика, u — скорость потока) в размерном виде для каждого датчика. Практически в общем случае целесообразнее применять следующее соотношение:

$$(2.2) \quad I = a + bu^{1/2},$$

где a и b — константы для определенного датчика. Отметим, что в отличие от аналогичных формул для термоанемометра показатель при скорости в (2.2) равен 0,5 во всех случаях.

При измерении высокочастотных пульсаций скорости следует учитывать амплитудно-частотную характеристику датчика. В работе [10] получена передаточная функция для датчика типа «лобовая точка»

$$|H(\omega)|^2 = \frac{0,25(1 + 0,0576\omega_*^2)}{1 + 0,331\omega_*^2 + 0,00249\omega_*^2 Sc^{1/2}},$$

где $\omega_* = \omega d/4k_1 u Sc^{1/3}$; Sc — число Шмидта; коэффициент k_1 зависит от формы носовой части датчика. В частности, для полусферической формы $k_1 = 2$. При уменьшении размера датчика возрастает диапазон передаваемых без искажения частот. Как и при измерении касательного напряже-

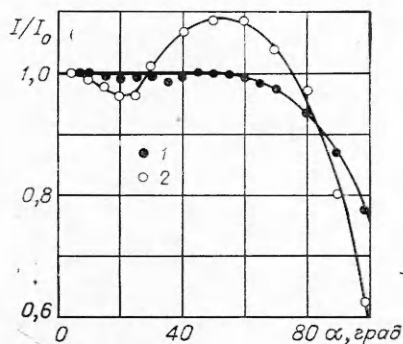
ния на стенке, при определении скорости в потоке с интенсивными пульсациями целесообразно работать в области квазистационарности, где $H(\omega) \simeq H(0) = \text{const}$.

В данной работе применялись датчики скорости типов ε и ϑ (фиг. 2). Они были изготовлены путем сваривания платиновой проволоки диаметром 20 мкм в тонкий стеклянный капилляр. Диаметр стеклянной оболочки d на торце составлял 30—40 мкм. Для придания правильной формы датчику торец его притирался с помощью тонкой шлифовальной шкурки. Затем стеклянный капилляр сгибался под углом 90° , и второй конец его клеивался с помощью эпоксидной смолы в державку из нержавеющей стали диаметром 3 мм. При работе державка выполняла функцию анода.

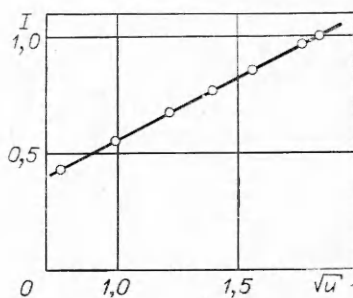
На фиг. 3 приведены угловые характеристики датчиков двух типов, полученные путем поворота их относительно направления потока (I_0 — ток датчика, расположенного вдоль потока, α — угол между осью датчика и направлением потока, 1 — датчик типа ε , 2 — датчик типа ϑ). Видно, что у датчика типа «лобовая точка» угловая характеристика немонотонная, имеет место подъем при некотором угле поворота, обусловленный, по-видимому, влиянием вихрей, срывающихся с острой кромки. По этой причине датчики этого типа при измерениях не использовались. Для датчика с полусферической формой носка ток не зависит от направления течения до угла поворота 60° . Таким образом, при оценке погрешности измеренных значений средней скорости и интенсивности продольной компоненты пульсаций скорости угловую характеристику можно считать постоянной.

Калибровка датчиков скорости проводилась на оси трубы при течении чистой жидкости. Значение скорости определялось с помощью трубки Пито. Поскольку на оси трубы интенсивность пульсаций скорости мала даже в турбулентном режиме, а также отсутствует градиент скорости, поправки к показаниям трубки Пито не требуются. Точность измерения скорости трубкой не хуже 1%. Калибровочная зависимость для электрохимического датчика скорости приведена на фиг. 4, она имеет вид (2.2), причем при $u = 3,5$ м/с первый член в правой части (2.2) не превышает 5% от полного тока.

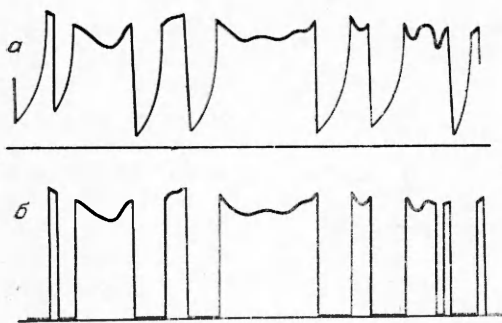
Рассмотрим работу датчика в двухфазном потоке. В тех случаях, когда газовая фаза является дискретной, цепь катод — электролит — анод замкнута, если датчик находится в жидкости. При этом ток датчика определяется полностью мгновенным значением скорости жидкости вблизи датчика. При вхождении датчика в газовую фазу цепь разрывается, и ток датчика падает. Практически падения тока до нуля не происходит, при переходе из жидкости в газ происходит падение сигнала датчика по экспо-



Ф и г. 3



Ф и г. 4



Ф и г. 5

ненциальному закону. На фиг. 5, а приведена типичная осциллограмма тока датчика в двухфазном потоке (ось времени направлена справа налево). Видно, что переход границы раздела фаз очень четкий, это позволяет без труда отделить моменты нахождения датчика в жидкости. Поскольку размер датчика много меньше размера пузырей газа, можно считать, что датчик не деформирует границы раздела фаз. Используя

простую электронную аппаратуру, можно сформировать сигнал, показанный на фиг. 5, б: при нахождении датчика в жидкости сигнал остается неизменным, при вхождении его в газовую фазу сигнал падает до нуля. При соответствующей обработке такого сигнала можно получить характеристики жидкой фазы: среднюю скорость и среднеквадратичное значение пульсаций скорости.

3. Измерение локального газосодержания. Наиболее простым и широко распространенным методом определения локального газосодержания является метод электропроводности [13—16]. В поток помещаются два электрода, один из которых имеет очень малые размеры и представляет собой отрезок металлической проволоки, поверхность которой изолирована, за исключением небольшого участка на торце. Этот электрод находится попеременно то в жидкости, то в газовой фазе. При этом резко меняется электрическое сопротивление между двумя электродами, что и является индикацией наличия на датчике той или другой фазы. Между электродами подается напряжение и измеряется протекающий в цепи ток. Ток имеет два фиксированных значения: большее соответствует наличию на датчике жидкой фазы, меньшее — газовой.

При практической реализации данного метода необходимо учесть следующие обстоятельства, влияющие на точность измерения. Во-первых, на поверхности электрода могут происходить электрохимические процессы, приводящие к осаждению на поверхности датчика или же к ее эрозии, что вызывает изменение свойств датчика во времени. Во-вторых, необходимо учитывать гидродинамический процесс взаимодействия датчика с границей раздела фаз.

Для уменьшения влияния электрохимических процессов необходимо проводить измерения при малых значениях напряжения между электродами, поскольку при этом находящиеся в растворе ионы не участвуют в электрохимических процессах на электродах. При работе в растворе, состав которого указан в предыдущем пункте (необходимый для работы электрохимического метода), между электродами нельзя прикладывать напряжение выше 10—20 мВ, так как при больших значениях напряжения ток в цепи начнет зависеть от скорости жидкости вблизи электрода. Для регистрации тока необходимо в этом случае использовать усилитель. Питание датчика от источника постоянного напряжения, применявшееся во многих работах [13—15], оказывается затруднительным, поскольку к измерительной аппаратуре предъявляются очень жесткие требования. Более удобным является применение в качестве источника напряжения генератора напряжения синусоидальной или прямоугольной формы. При этом частота напряжения должна в несколько раз превосходить частоту процесса. В данной работе между электродами подавалось напря-

жение величиной 1—5 мВ с частотой 100—250 кГц. При этом емкостное сопротивление подводящих кабелей в несколько раз выше омического сопротивления между электродами, и в то же время измерительная аппаратура была очень простой.

Гидродинамика процесса взаимодействия датчика и газового пузырька является достаточно сложной. Реальная форма сигнала датчика приведена на фиг. 6, а, U —выходное напряжение усилителя, пропорциональное току датчика.

В момент A граница жидкость — газ пересекает бы чувствительный элемент датчика в отсутствие последнего. В действительности же за счет присутствия датчика поверхность раздела фаз деформируется, так что датчик пересекает границу раздела фаз в момент B . При этом на датчике остается пленка жидкости, которая постепенно становится тоньше и сопротивление ее увеличивается. За счет наличия пленки передний фронт сигнала не является идеальным. В момент C пленка исчезает, датчик находится в газовой фазе. В момент D датчик снова касается жидкости, и в течение некоторого промежутка времени DE ток его восстанавливается до значения U_1 . Задний фронт оказывается значительно более крутым, чем передний. Поэтому описанный выше эффект приведет к занижению истинного времени пребывания датчика в газовой фазе, а следовательно, к заниженному значению газосодержания. С другой стороны, присутствие датчика приводит к некоторому «торможению» пузырька, что дает обратный вклад в измеренное газосодержание.

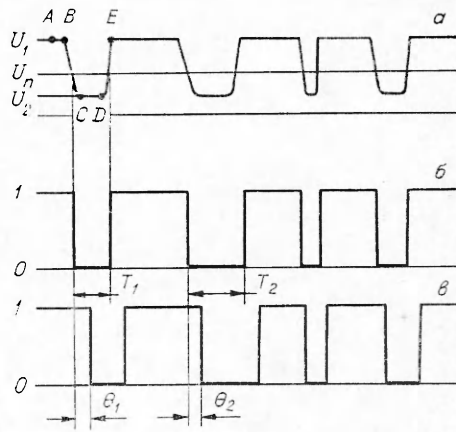
Важное значение имеет выбор величины порогового напряжения $U_{\text{п}}$, при котором производится «вырезание» сигнала. Когда $U_{\text{п}}$ выбрано, из сигнала a формируется сигнал вида b с идеальными фронтами. Значение локального газосодержания φ определяется по формуле

$$(3.1) \quad \varphi = \sum T_i / T,$$

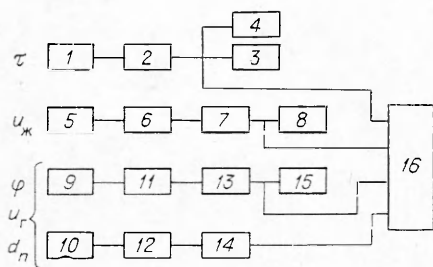
где T_i — время пребывания датчика в i -м газовом пузырьке; T — полное время измерения. Время измерения T должно быть достаточно большим по сравнению с T_i .

Существуют несколько различных рекомендаций по выбору значения $U_{\text{п}}$ [2, 15]. Наиболее тщательно этот вопрос исследован в работе [2], где проинтегрированное по сечению трубы значение газосодержания, полученное по (3.1), сравнивалось со значением среднего газосодержания, определенного методом гамма-просвечивания. Совпадение указанных величин составляло 3—5% при выборе значения $U_{\text{п}} = (0,5-0,7)(U_1 - U_2) + U_2$. По-видимому, целесообразнее выбирать $U_{\text{п}}$ ближе к уровню жидкости, однако необходимо следить за тем, чтобы $U_{\text{п}}$ было ниже уровня шумов, накладываемых на U_1 .

4. Измерение скорости газовой фазы. Для измерения скорости газовой фазы используется двойной датчик электропроводности [2, 3, 13]. Если расположить два датчика, как показано на фиг. 2, e , то при работе в двухфазном потоке сигналы их будут иметь вид, приведенный на фиг. 6, b , $в$: сигнал второго датчика смещен вправо относительно первого.



Ф и г. 6



Ф и г. 7

ки при прохождении переднего и заднего фронта пузыря. Однако на практике для простоты считают эти времена равными и определяют θ по одному из фронтов, обычно по переднему. При этом предполагается, что взаимодействие границы раздела фаз с первым и вторым датчиками одинаково.

Накопление значений $u_{гi}$, соответствующих различным пузырям, позволяет получить, помимо средней скорости газовой фазы, также среднеквадратичное значение пульсаций и другие характеристики.

5. Распределение пузырей по размерам. Из записи сигнала датчика электропроводности, показанного на фиг. 6, б, в, можно получить также распределения $\sigma(T_i)$ интервалов времени T_i , соответствующих нахождению датчика в газовой фазе. Из этого распределения можно определить функцию распределения $P(D_1)$ для диаметров пузырей. Для этого необходимо сделать ряд предположений: а) все пузыри имеют сферическую форму; б) все пузыри имеют одинаковую скорость $u_{г}$; в) распределение пузырей по размерам не зависит от координат в некоторой окрестности датчика. Соотношения, связывающие распределение $P(D_1)$ и $\sigma(T_i)$, приведены в [2,3]. В работе [17] изложена методика определения размеров пузырей, не требующая принятия указанных выше допущений. Однако в этом случае применяется датчик из пяти электродов, имеющий размеры порядка 3 мм, что ограничивает возможность применения этого метода.

6. Измерительная аппаратура. Схема использованной в работе измерительной аппаратуры приведена на фиг. 7 (1, 5—датчик; 2, 6, 11, 12—усилитель; 9, 10—двойной датчик; 4—квадратичный вольтметр; 3, 8—интегратор; 7, 13, 14—формирователь; 15—частотомер; 16—ЭВМ).

Сигнал электрохимического датчика трения или скорости усиливается с помощью усилителя постоянного тока, имеющего пределы измерения от 0,1 до 100 мкА (при выходном напряжении 0—5 В) и полосу пропускания 0—100 кГц. Встроенный в усилитель источник питания позволяет выбирать нужный режим работы датчика. Усиленный сигнал датчика скорости проходил через формирователь, напряжение на выходе которого равнялось нулю в моменты нахождения датчика в газовой фазе. Для измерения среднего значения напряжений использовались цифровые интеграторы со временем интегрирования 100 с. Среднеквадратичный вольтметр использовался только в цепи датчика трения, поскольку сигнал его был непрерывным. При малых значениях интенсивности пульсаций значения $\bar{\tau}$ и \bar{u} определялись с помощью аналоговой аппаратуры. Для определения средних значений напряжения трения и скорости жидкости $u_{ж}$ и среднеквадратичного значения интенсивности пульсаций трения при больших уровнях пульсаций, а также для измерения интенсивности пульсаций скорости обработка сигналов проводилась на ЭВМ «Урал 14».

Для измерения характеристик газовой фазы использовался одиночный или двоянный датчик электропроводности. Сигнал датчика усиливал-

Времена θ характеризуют время прохождения границы раздела фаз между торцами первого и второго датчиков. Скорость движения границы раздела фаз (отождествленная со скоростью движения пузыря газа) равна $u_{г} = \Delta/\theta$, где Δ — расстояние между электродами двойного датчика. Путем соответствующего осреднения можно получить среднюю скорость газовой фазы.

Наиболее правильным было бы определять θ как среднее время задерж-

ся с помощью усилителей, настроенных на частоту питающего напряжения. Затем происходило формирование из усиленных сигналов прямоугольных импульсов (см. фиг. 6, б), причем в формирователях можно было изменять пороговое значение напряжения. Измерение времени нахождения датчика в газовой фазе, а следовательно, и локального газосодержания производилось с помощью частотомера. Для определения распределений скоростей и размеров пузырей $d_{\text{п}}$ производилось накопление и обработка сигнала с помощью ЭВМ.

Поступила 24 VII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow.—*Internat. J. Multiphase Flow*, 1975, vol. 2, pt 1.
2. Galaup G. P. Contribution à l'étude des méthodes de mesure en écoulement diphasique. These, L' Université scientifique et Médicale de Grenoble, 1975.
3. Heringe R. A., Davis M. R. Structural development of gas — liquid mixture flows.—*J. Fluid Mech.*, 1976, vol. 73, pt 1, p. 97—123.
4. Mitchell J., Hanratty T. J. A study of turbulence at a wall using an electrochemical wall shear stress meter.—*J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 26, pt 1.
5. Misushina T. The electrochemical method in transport phenomena.— In: *Advances in Heat Transfer*. Vol. 7. Ed. J. P. Hartnett and T. F. Irvine. N. Y., Academic Press, 1971.
6. Кутателадзе С. С., Бурдуков А. П., Накоряков В. Е., Кузьмин В. А. Применение электрохимического метода измерения трения в гидродинамике двухфазных сред.— В кн.: *Тепломассоперенос*. Т. 2. Минск, «Наука и техника», 1968.
7. Боголюбов Ю. Е., Гешев П. И., Накоряков В. Е., Огородников П. А. Теория электродиффузионного метода измерений спектральных характеристик турбулентных потоков.— *ПМТФ*, 1972, № 4.
8. Нигматуллин Р. Ш., Габсалямов Г. Г. Электрохимический датчик скорости потока электропроводной жидкости.— *Приборы и системы управления*, 1970, № 3.
9. Шульман З. П., Покрывайло Н. А., Соболевский А. С., Юшкина Т. В. Конвективный массообмен конуса и динамические характеристики электродиффузионного анемометра в потоке нелинейно-вязкой жидкости.— *ИФЖ*, 1976, т. 30, № 3.
10. Боголюбов Ю. Е., Смирнова Л. П. Массообмен в окрестности лобовой точки в пульсирующем потоке.— *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук*, 1977, № 8, вып. 2.
11. Бурдуков А. П., Козьменко Б. К., Накоряков В. Е. Распределение профилей скорости жидкой фазы в газожидкостном потоке при малых газосодержаниях.— *ПМТФ*, 1975, № 6.
12. Matsuda H., Yamada J. Limiting diffusion currents in hydrodynamic voltametry.— *Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1971, vol. 30, p. 261.
13. Park W. H., Kang W. K., Capes C. E., Osberg G. L. The properties of bubbles in fluidising beds of conducting particles as measured by an electroresistivity probe.— *Chem. Eng. Sci.*, 1969, vol. 24, N 5.
14. Neal L. C., Bankoff S. C. A high resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow.— *AIChE J.*, 1963, vol. 9, N 4.
15. Sekoguchi K., Fukui H., Matsuoka T., Nishikawa K. Investigation into the statistical characteristics of bubbles in two-phase flow.— *Bull. JSME*, 1975, vol. 18, N 118.
16. Ибрагимов М. Х., Бобков В. П., Тычинский Н. А. Исследование поведения газовой фазы в турбулентном потоке смеси воды и газа в каналах.— *ТВТ*, 1973, т. 11, № 5.
17. Burgess J. M., Calderbank P. H. The measurement of bubble parameters in two-phase dispersions.— *Chem. Engng Sci.*, 1975, vol. 30, p. 743.