

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЭЛЕКТРОДИФфуЗИОННЫМ МЕТОДОМ

*П. М. Кроковный, В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусев,
В. А. Утович*

(Новосибирск)

Приведены результаты экспериментального исследования локального среднего и пульсационного трения на стенке горизонтальной трубы при течении в ней газожидкостного потока в широком диапазоне режимных параметров. Для измерения трения используется электродиффузионный метод. Построены эпюры касательных напряжений как по периметру трубы, так и по ее длине, позволяющие объективно фиксировать некоторые режимы течения. Результаты экспериментов сопоставлены с имеющимися расчетными методиками.

Из всех существовавших до последнего времени методов только «плавающий» элемент позволяет провести прямое измерение среднего трения на стенке. Этот метод имеет ряд существенных недостатков: нелокальность, инерционность, возмущение основного потока.

В данной работе для измерения касательного напряжения в изотермическом газожидкостном потоке используется электродиффузионный метод, суть которого подробно изложена в работах [1,3]. При больших числах Прандтля ($Pr > 1000$), в случае круглых датчиков-электродов трение рассчитывается по формуле

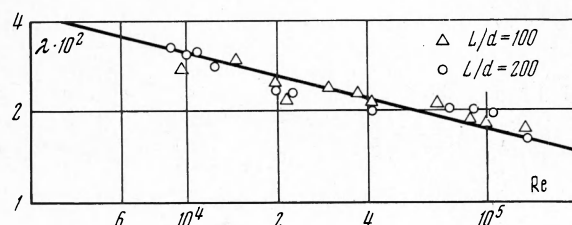
$$\tau = \frac{3.2\mu I^3}{F^3 d^5 D^2 c_\infty^3} \quad (1)$$

где F — число Фарадея, μ , D , c_∞ — физические константы электролита, I — величина измеряемого предельного тока в электрохимической ячейке, включающей датчик-катод диаметром d , анод большой поверхности и электролит. В качестве электролита использовался слабый раствор ферриферроцианида в 0.5N водном растворе NaOH. Во избежание окисления электролита кислородом в экспериментах использовался только инертный газ — азот. Подробно методика работы с этим электролитом изложена в работах [2,3]. В [2] на примере стандартного «снарядного» режима течения была показана принципиальная возможность применения электродиффузионного метода для измерения трения в двухфазном потоке. В [2] были получены также первые результаты по измерению трения для существенно неустановившегося горизонтального газожидкостного потока.

Исследование течения двухфазных потоков в горизонтальной трубе осложнено из-за существенной их асимметрии, вызванной влиянием силы тяжести. Это приводит к большему разнообразию режимов течения по сравнению с вертикальными потоками. Например, в горизонтальной трубе при некоторых расходах жидкости и газа может существовать расслоенный режим течения, когда жидкость в основном располагается в нижней половине канала. Поэтому при изучении таких течений возникает задача измерения их локальных характеристик не только по длине канала, но и по его периметру. С другой стороны наличие такой информации позволит уточнить классификацию режимов течения этих систем. Программа данного эксперимента включала в себя:

постоянной в интервале $20-27^\circ \text{C}$ с помощью водоводяного холодильника 16. Газ (азот), предварительно увлажненный и очищенный в фильтре 11, подогревался до $t = t'$ в электронагревателе 12 мощностью 1 кВт и поступал в смесительные камеры 13 или 6.

Газожидкостная смесь создавалась либо в камере 13, где жидкость и газ перемешивались под углом 90° , либо вдувом газа через сопло 6.



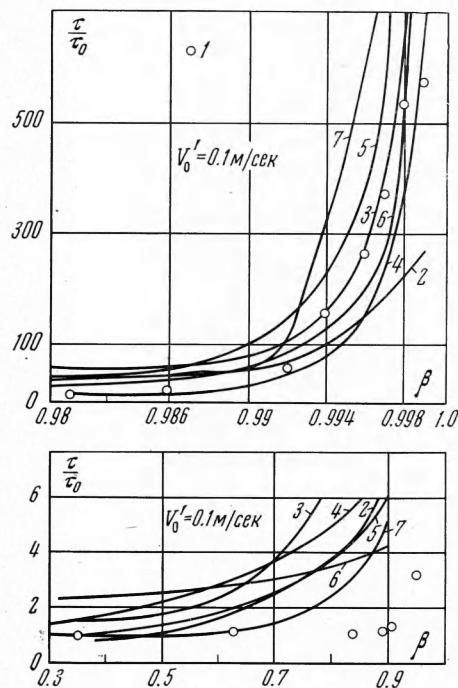
Фиг. 2

В последнем случае жидкость поступала равномерно по кольцевой щели, толщина которой изменялась с точностью 0,01 мм. Такая точность была необходима для исследования кольцевого режима течения. Отбор давлений производился из шести сечений по длине экспериментальной трубы так, что можно было измерять полный перепад давления на длине 5 м, а также локальные перепады давления на расстояниях 25, 100 и 200 калибров от входа. Измерения расходов жидкости и газа, а также перепадов давления осуществлялось с помощью пяти U-образных манометров.

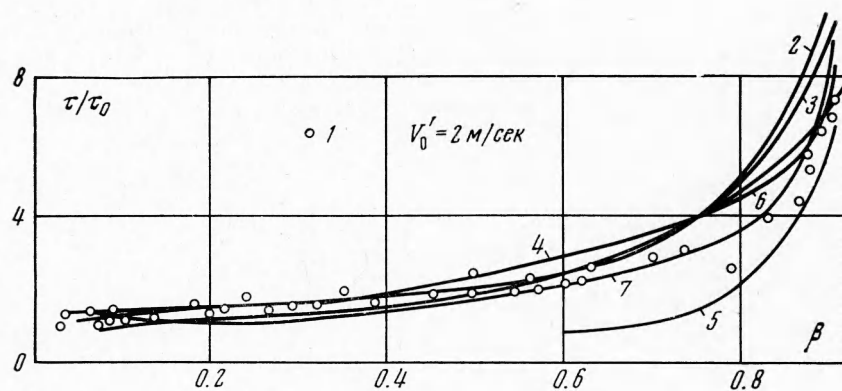
Экспериментальные участки измерения локального трения 5 размещались на расстояниях 25, 100 и 200 калибров от входа. Принципиальная конструкция датчиков показана на фиг. 1. 12 платиновых электродов 1 диаметром 0,5 мм вварены по периметру в стеклянную втулку 2, которая заливалась эпоксидной смолой 3 в корпус участка. Датчики тщательно шлифовались заподлицо со стенкой канала по технологической схеме, описанной ранее [2,3].

Эксперименты, проведенные с однофазным потоком, показали хорошую сходимость результатов измерения коэффициента трения с известной расчетной формулой Блазиуса для чисел $R = 8 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^5$ (фиг. 2).

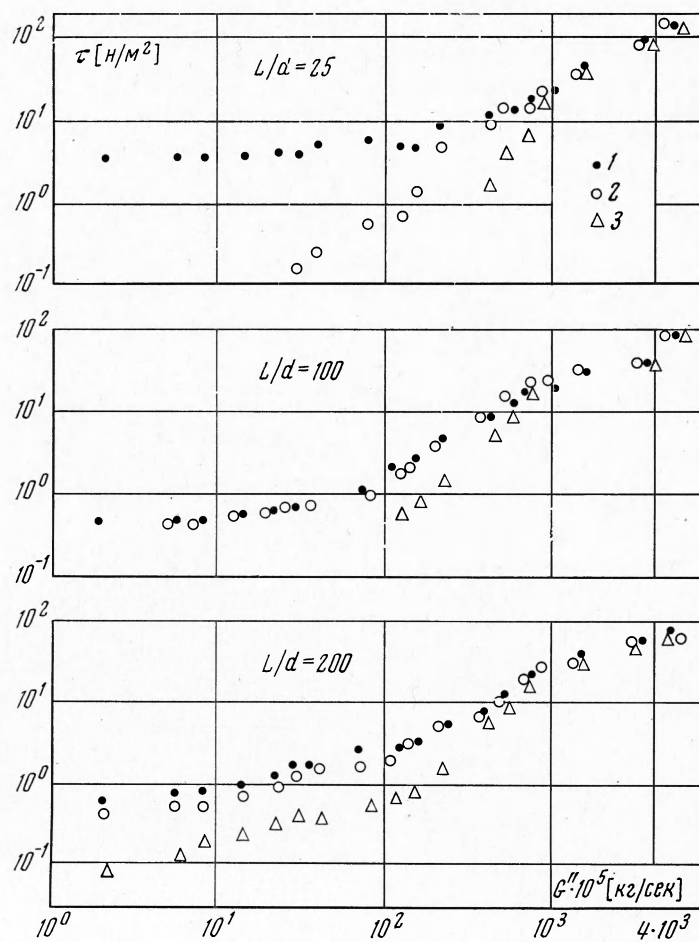
Результаты измерения трения при течении газожидкостного потока для приведенных скоростей жидкости $V_0' = 0,1$ и 2 м/сек показаны светлыми точками 1 на фиг. 3, 4 в координатах $(\tau/\tau_0, \beta)$. Здесь τ_0 — трение при течении чистой жидкости, β — объемное газосодержание, рассчитываемое по локальным параметрам потока, τ — трение двухфазного потока, осредненное по показаниям 12 датчиков в сечении $L/d = 200$ калибров от входа.



Фиг. 3

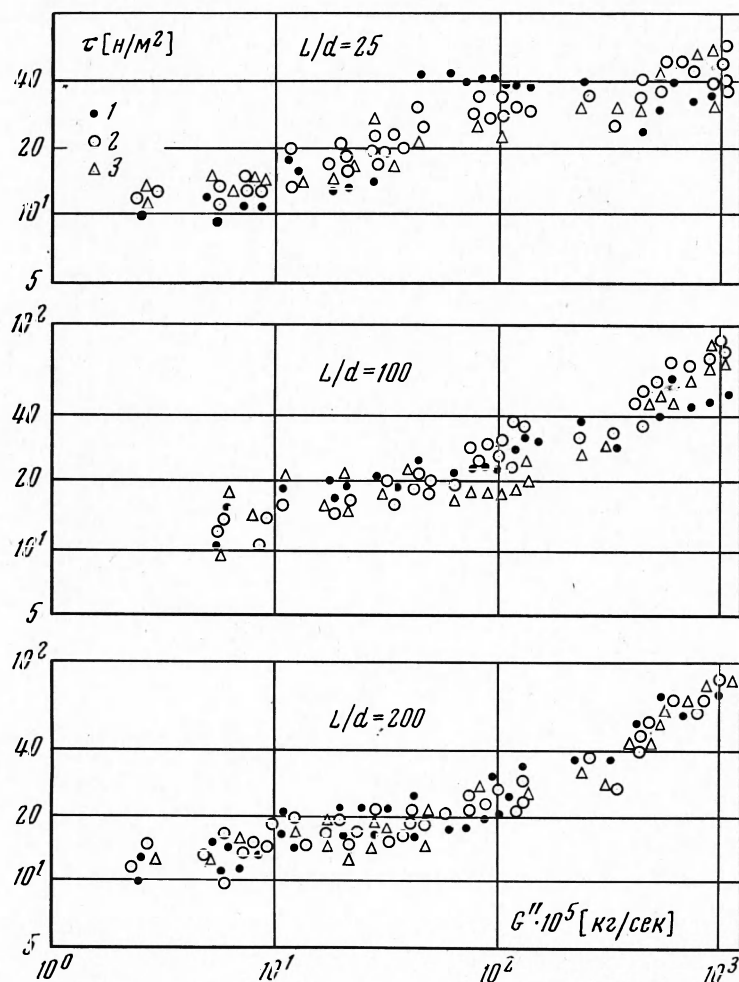


Фиг. 4



Фиг. 5

Как видно, с увеличением расхода газа трение существенно возрастает, например, для $V_0' = 0,1$ м/сек от $\tau/\tau_0 \approx 1$ для расслоенного режима до $\tau/\tau_0 \approx 600$ для развитого кольцевого режима. Здесь и далее придерживаемся общепринятой классификации режимов течения горизонтальных двухфазных потоков. При расслоенных режимах τ рассчитывалась с учетом трения газа о несмоченную поверхность трубы.



Фиг. 6

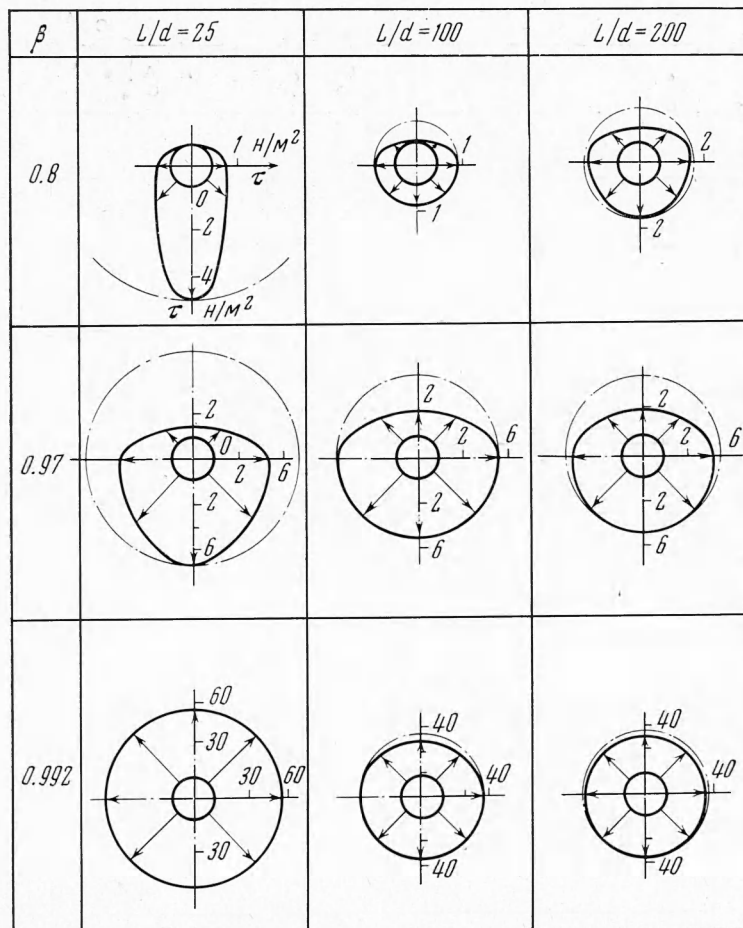
На фиг. 3, 4 приведено также сопоставление результатов эксперимента с известными расчетными методами, где линия 2 — расчет по методу ЦКТИ [4], 3 — по гомогенной модели [5], основанной на предположении отсутствия скольжения между фазами (здесь число R рассчитывается по скорости смеси, а вязкость смеси μ_+ — по формуле

$$\frac{1}{\mu_+} = \frac{1}{\mu''} x + \frac{1}{\mu'} (1 - x)$$

где μ' , μ'' — вязкость жидкости и газа соответственно, x — весовое газо-содержание потока; 4 — по формуле А. А. Арманда [6]

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{C}{(1 - 0.833\beta)^{1.75}} \quad \text{при } \beta < 0.9$$

при $\beta > 0.9$ константа перед β равна 1. Прямая 5 — по методу Бэкера [7], 6 — по методу Локарта — Мартинелли [7], 7 — по методу Нельсона — Мартинелли [7], основанных на схеме раздельного течения фаз. Как видно, ни один из методов не описывает удовлетворительно результаты экспериментов во всем диапазоне изменения газосодержания. Тем не менее для $V_0' \geq 1$ м/сек можно рекомендовать метод Нельсона — Мартинелли, а для $V_0' \leq 0.5$ м/сек и $\beta > 0.9-0.95$ методы ЦКТИ и гомогенной модели.



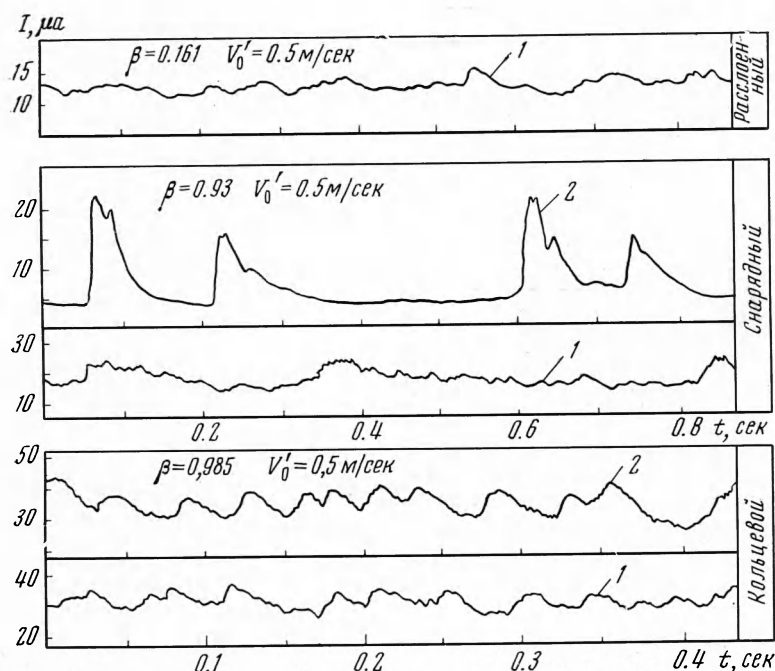
Фиг. 7

На фиг. 5, 6 приведены экспериментальные данные для $V_0' = 0.25$ и 2 м/сек по локальному трению в зависимости от весового расхода газа G'' для сечений 25, 100 и 200 калибров от входа. На графиках: 1 — показания верхнего, 2 — бокового и 3 — нижнего датчиков. Одновременная запись показаний электродиффузионных датчиков позволяет: а) фиксировать некоторые режимы течения, б) судить об асимметрии потока. Действительно, как видно из фиг. 5 для $V_0' = 0.25$ м/сек и $L/d = 100$, переход от расслоенного режима к пробковому четко фиксируется по первым показаниям верхнего датчика при $G'' = 0.1 \cdot 10^{-2}$ кг/сек. Выделение режимов течения проводилось визуально с помощью построения эпюр трения по периметру трубы, а также по характеру пульсаций тока (трения).

Следует отметить, что визуальное разделение режимов часто субъективно. Так, например, при $V_0' = 1-2$ м/сек и при некоторых значениях β наблюдался расслоенный режим течения, в то время как показания электродиффузионных датчиков указывали на существование пленки жидкости в верхней части трубы. Как видно из фиг. 5, 6, при дисперсно-кольцевом режиме показания всех датчиков близки между собой.

Более наглядно об асимметрии потока по длине трубы при различных газосодержаниях β можно судить из рассмотрения эпюр касательных напряжений, показанных на фиг. 7 для $V_0' = 0.25$ м/сек. С ростом β вид эпюр существенно меняется от вытянутых вниз при расслоенном и пробковом режимах до осесимметричных при кольцевом режиме течения.

На фиг. 8 показан пример записи диффузионного тока на шлейфовом осциллографе для нижнего (линия 1) и верхнего (линия 2) датчиков при значении $V_0' = 0.5$ м/сек. Для расслоенного ($\beta = 0.161$) и снарядного ($\beta = 0.93$) режимов течения скорость протяжки ленты осциллографа $V_s = 0.5$ м/сек, а для кольцевого режима ($\beta = 0.985$) $V_s = 1$ м/сек.



Фиг. 8

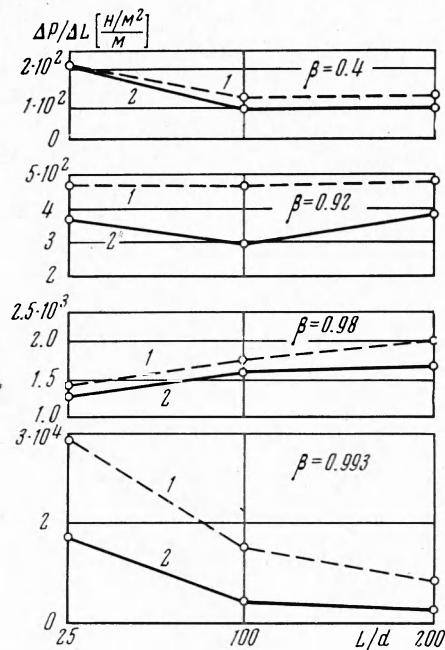
Видно, что пульсации тока для этих режимов течения существенно различаются как по амплитуде, так и по частоте. С другой стороны, если при $\beta = 0.93$ пульсации тока обоих датчиков близки по частоте прохождения снарядов газа, но различаются по амплитуде, то для $\beta = 0.985$ пульсации тока совпадают по амплитуде и по частоте. Как было показано в [7], статистический анализ такой информации может быть использован для идентификации режимов течения. Обычно о стабилизации двухфазного потока судят по тому факту, что потеря давления на единицу длины принимает постоянное значение.

На фиг. 9, 10 для $V_0' = 0.25$ и 2 м/сек показаны результаты измерения трения 2 и полного перепада давления 1 в зависимости от расстояния от

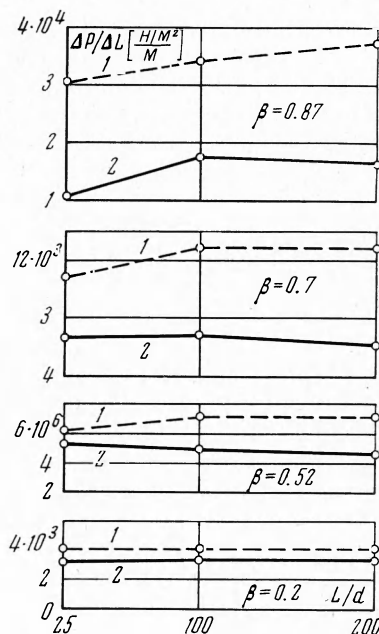
смесительной камеры. Так как измерения проводились только в трех точках по длине трубы, то характер изменения результатов эксперимента от 25 до 200 калибров показан качественно. Потери на трение рассчитывались по формуле

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{4\tau}{d}$$

а τ осреднялось по показаниям 12 датчиков в одном сечении.



Фиг. 9



Фиг. 10

Из анализа графиков фиг. 7 и 9 следует, что даже для больших значений β по длине трубы от 100 до 200 калибров меняются режимы течения и потери на трение. Для $V_0 = 2$ м/сек стабилизация потока наступает раньше.

Имея данные полного перепада давления и трения, можно рассчитать, так называемые потери напора на ускорение для различных значений β . Например, из фиг. 10 видно, что потери на ускорение могут составлять до 100%.

Поступила 21 VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е., Бурдуков А. П., Кузьмин В. А. Применение электрохимического метода измерения трения в гидравлике двухфазных сред. Тр. Всес. конф. по тепломассообмену, т. 2, Минск, 1968.
2. Кузьмин В. А., Покусев Б. Г. Измерение трения в двухфазных потоках электрохимическим методом. ПМТФ, 1969, № 5.
3. Miruschina T. The electrochemical method in transport phenomena. Advances in Heat Transfer, vol. 7, N. Y., 1971.
4. Нормативный метод гидравлического расчета паровых потоков. Л., ВТИ — ЦКТИ, 1968.
5. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидравлика газожидкостных систем. М., Гостехиздат, 1968.
6. Арманд А. А. Сопротивление при движении двухфазной смеси по горизонтальным трубам. Изв. Всес. теплотехн. ин-т, 1946, № 1.
7. Сильвестри М. Гидродинамика и теплообмен в дисперснокольцевом режиме двухфазного потока. Сб. «Проблемы теплообмена», М., Атомиздат, 1967.