

ИЗМЕРЕНИЕ ТРЕНИЯ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. А. Кузьмин, Б. Г. Покусев

(Новосибирск)

Полный перепад давления при течении адиабатического двухфазного потока в канале постоянного сечения определяется формулой [1]

$$\Delta p = \Delta p_f + \gamma_+ h + \{\gamma'' (\varphi_2 W_2'^2 - \varphi_1 W_1'^2) + \gamma' [(1 - \varphi_2) W_2'^2 - (1 - \varphi_1) W_1'^2]\} \quad (1)$$

Здесь φ — истинное газосодержание, Δp_f — сопротивление трения, $\gamma_+ h$ — член силы тяжести, γ_+ — удельный вес смеси, зависящий от φ . Выражение в фигурных скобках учитывает потери на ускорение.

Для экспериментального определения Δp_f необходимо знать φ , методы измерения которого [2,3] не дают надежных результатов в большом диапазоне изменения газосодержания в потоке.

Простейшим приближением для расчета Δp_f служит гомогенная модель, по которой

$$\Delta p_f = c_f \frac{\gamma_+ W_+^2 L}{2gd} \quad (2)$$

Здесь W_+ — приведенная скорость смеси, c_f — коэффициент трения гомогенного потока [1], d , L — диаметр и длина канала соответственно. Широко известно также соотношение, предложенное Локкартом и Мартинелли [4].

Для более сложных условий, например неустановившегося течения двухфазного потока, нет методов расчета величины Δp_f .

Ниже описываются результаты измерения касательных напряжений на стенке канала при изотермическом установившемся и неустановившемся течении двухфазного потока электрохимическим методом. Ранее этот метод был разработан Ханратти [5] для однофазной жидкости, а также в работе [6]. Идея метода заключается в измерении предельного диффузионного тока в электролитической ячейке, состоящей из текущего в канале электролита, большого электрода — анода и поляризованного кольцевого датчика — катода. В качестве электролита используется 0.001—0.15 N водный раствор ферри-ферроцианида с фоновым 2N раствором Na(OH). В режиме предельного диффузионного тока скорость электрохимической реакции определяется только интенсивностью массообмена между поверхностью катода и потоком электролита. Связь между потоком массы и предельным током I выражается зависимостью

$$q = I / Fz \quad (3)$$

Здесь F — число Фарадея, z — число передаваемых электронов. При больших числах Прандтля (в рассматриваемом случае $P = 2430$) толщина диффузионного пограничного слоя при достаточно малых размерах датчика много меньше вязкого подслоя. Тогда справедливо допущение Л. Д. Ландау [7] о линейной зависимости продольной компоненты скорости поперечной координаты y

$$u = \tau_w y / \mu \quad (4)$$

Здесь τ_w — касательное напряжение на стенке, M — коэффициент динамической вязкости. Решение уравнения диффузионного пограничного слоя [5,6] дает связь между τ_w и I

$$\tau_w = \frac{1,85 \mu I^3}{z^3 F^3 l^3 h^3 D^2} \left(\frac{A}{c_\infty} \right)^3 \quad (5)$$

Здесь A — молекулярный вес $K_3Fe(CN)_6$, c_∞ — концентрация в объеме электролита, D — коэффициент диффузии, l — продольный размер датчика по потоку, h — ширина датчика.

Формула (5) справедлива для двухфазного потока, если на стенке канала существует неразрывная пленка жидкости.

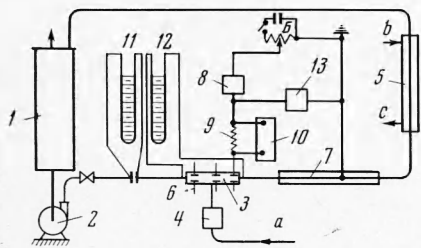
Опыты проводились на горизонтальной и вертикальной трубах на двух различных установках.

Схема одной из них (для горизонтальной трубы) показана на фиг. 1. Обе установки состоят из замкнутых циркуляционных контуров, включающих центробежный насос 2, изготовленный из нержавеющей стали, емкости — сепаратор 1, расходомерные устройства по газу и жидкости, участки стабилизации. В контуре использовались трубы только из винилпласта или органического стекла. Во избежание окисления электролита кислородом воздуха, а также вследствие того что потенциалы разложения кислорода и

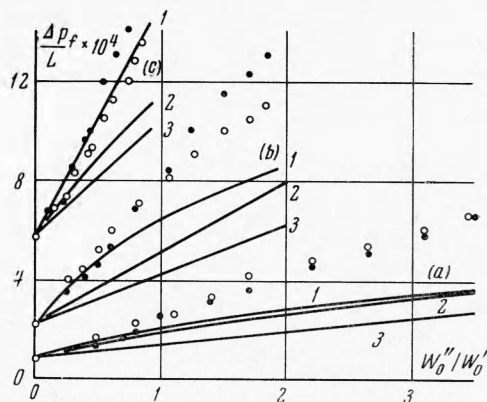
феррицианида очень близки, в качестве легкой фазы использовался чистый азот (стрелка *a* — подача газа). Температура жидкости регулировалась на уровне 25° С при помощи водяного холодильника 5 (стрелки *b* и *c* — вход и выход воды). Измерение температуры двухфазной среды производилось на входе и выходе из опытного участка медь-константановыми термопарами с точностью до 0.1° С.

Влияние температуры на величину τ_w весьма существенно, поскольку вязкость и коэффициент диффузии зависят от температуры. Данные по коэффициенту диффузии были взяты из литературы [8], а значения вязкости были измерены нами в диапазоне изменения температур от 17 до 35° С.

Экспериментальный участок 3 был выполнен в виде трубки диаметром



Фиг. 1



Фиг. 2

($d = 11.2$ мм) и длиной ($L = 100$ мм), изготовленной из органического стекла. По длине трубки размещались девять электрохимических датчиков через 5—10 мм. Датчики изготавливались в виде колец из никелевой ленты толщиной 0.2 и 0.5 мм. Газожидкостная смесь создавалась вдувом газа через пористую трубку ($d = 11.2$ мм), которая располагалась на расстоянии трех калибров от первого датчика.

Особое внимание было уделено тщательности обработки рабочей поверхности датчиков. Проверкой качества датчиков служила тарировка, проводимая сопоставлением данных измерения τ_w электрохимическим методом, по перепаду давления и рассчитанных значений τ_w по известным теоретическим зависимостям при различных значениях числа Рейнольдса R для однофазной жидкости.

Коэффициент, учитывающий неточность измерения длины рабочей поверхности для каждого датчика, оставался постоянным во всем диапазоне изменения R от 10^4 до $1.2 \cdot 10^5$. Анод 7, изготовленный из той же никелевой ленты, располагался вниз по потоку. Измерительная цепь включала источник постоянного тока напряжением 4 в, сопротивление 10—20 ом. Величины регулируемого напряжения и предельного тока в цепи измерялись соответственно вольтметром 13 и миллиамперметром 8.

Измерение концентрации ионов феррицианида в растворе производилось потенциометрическим титрованием.

В экспериментах на вертикальной трубе ($d = 15$ мм) датчики имели длину 0.5 и 3 мм и располагались на расстоянии 1 м друг от друга. Показания их по значению τ_w совпадали. Газожидкостная смесь создавалась в смесителе на расстоянии 150 калибров от первого датчика вдувом газа через пористую пластинку или через сопло.

При снарядном режиме течения истинная скорость газовой фазы считалась равной скорости движения снарядов и определялась по времени прохождения одиночного снаряда между двумя точечными электродами. Истинное газосодержание в этом случае рассчитывалось по формуле

$$\varphi = W_0'' / W'' \quad (6)$$

Здесь W'' — скорость снарядов, W_0'' — приведенная скорость газовой фазы.

На фиг. 2 представлены результаты опытов для неустановившегося двухфазного потока, проведенных в горизонтальной трубе, в виде зависимости $\Delta p_f / L$ в $[н/м \cdot м^2]$ от безразмерной приведенной скорости газа W_0'' / W_0' , светлыми кружками показаны осредненные значения показаний девяти электрохимических датчиков, темными кружками — опытные данные по перепаду статического давления, области (а), (б) и (с) соответствуют скоростям жидкости $W_0' = 2.8, 4.13, 8.06$ м/сек. Потери на трение определялись по формуле

$$\Delta p_f / L = 4\tau_w / d \quad (7)$$

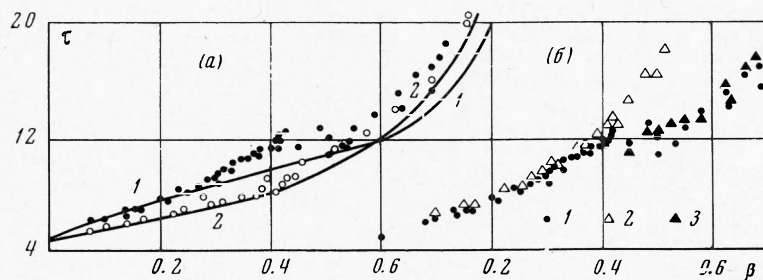
Как видно, значения $\Delta p_f / L$, измеренные по перепаду давления, лежат выше данных, полученных электрохимическим методом. Такое расхождение объясняется тем,

что в первом методе не учитываются потери на ускорение. Линии 1, 2, 3 показывают результаты расчетов сопротивления трения методом Локкарта — Мартинелли [4], по гомогенной модели и по рекомендациям, разработанным в ЦКТИ [9].

Анализ экспериментов и расчетов показывает, что метод [4] дает хорошее совпадение с экспериментом для скорости $W_0' = 8.06$ м/сек. С уменьшением приведенной скорости жидкости при значениях $W_0'' / W_0' > 0.8$ этот метод дает заниженные результаты.

Расчеты по гомогенной модели и по нормам ЦКТИ дают худшее совпадение с экспериментом.

Результаты опытов на вертикальной трубе для приведенной скорости жидкости 1.1 м/сек показаны на фиг. 3, а, б в виде зависимости τ_w в [н/м²] от расходного объемного газосодержания β . При вдуве газа через пористую пластину переход от пузырькового режима течения к снарядному происходил при значении $\beta \approx 0.43$, при сопловом подводе газа — при $\beta \approx 0.1$.



Фиг. 3

На фиг. 3, а точками даны результаты эксперимента (электрохимия); светлые точки — вдув через сопло, темные — через пористую пластину, кривая 1 — расчет по Локкарту — Мартинелли, 2 — гомогенная модель. Как видно из графика, трение при пузырьковом режиме больше, чем при снарядном.

На фиг. 3, б приведены данные по трению, полученные электрохимическим методом при вдуве через пористую пластину, а также данные, вычисленные по формуле

$$\tau_w = \frac{d}{4L} [\Delta p - \gamma L (i_+^2 - \beta)] \quad (8)$$

Здесь Δp — замеренный перепад статического давления.

На фиг. 3, б точки 1 — электрохимический расчет, 2 — расчет по β и Δp , 3 — расчет по ϕ и Δp . Из этой фигуры вытекает, что при $\beta > 0.43$ (в области снарядного режима) расхождение между значениями τ_w , измеренными различными методами, велико. Разница исчезает, если в формуле (8) вместо β использовать значение ϕ , определенное по формуле (6).

Поступила 28 IV 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидравлика газо-жидкостных систем. М., Госэнергоиздат, 1968.
2. Арманд А. А. Сопротивление при движении двухфазной системы по горизонтальным трубам. Изв. Всес. теплотехн. ин-та, 1946, № 1.
3. Isbin H. S., Sher N. C., Eddy K. C. Void fractions in two-phase steam water flow. A. I. Ch. E. Journal, 1957, vol. 3, No. 1.
4. Streeter V. L., Handbook of fluid dynamics. McGraw-Hill Book Company, N. Y., 1961, pp. 17—3.
5. Mitchell I., Hanratty J. A study of turbulence at a wall using an electrochemical wall shear stress meter. J. Fluid Mech., 1966, vol. 26, pt. 1.
6. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е., Бурдуков А. П., Кузьмин В. А. Применение электрохимического метода измерения трения в гидродинамике двухфазных сред. Тр. III Всес. конф. по тепломассообмену, Минск, 1968, т. 2, стр. 367.
7. Ландау А. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1954.
8. Arvia A. I., Marchiand S. L., Podesta I. I. The diffusion of ferrocyanid and ferricianid ions in aqueous solutions of potassium hydroxide. Electrochimica Acta 1967, vol. 12, p. 259. Pergamon Press Ltd., Printed in Northern Ireland.
9. Нормы расчета циркуляции воды в паровых котлах. М.—Л., Машиз, 1950.