

А. В. Чупаев, Р. Р. Галямов, А. А. Гайнуллина,  
В. В. Кузьмин

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА

### ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

Ключевые слова: касательное напряжение, электрохимический метод, закрученный поток, диффузионный ток.

В данной статье описана процедура определения пристеночных касательных напряжений в закрученном турбулентном потоке известным электрохимическим методом.

Keywords: shearing stress, electrochemical method, swirling flow, diffusion current.

This article describes a procedure for determining the near-wall shear stresses in the swirling turbulent flow known electrochemical method.

Важнейшей гидродинамической характеристикой потоков, которая определяет энергетические затраты при их практическом использовании, является пристеночное трение.

В данной работе для его определения применен электрохимический метод, развитый в [1 - 3]. Вследствие малой инерционности и высокой чувствительности этот метод позволяет регистрировать как мгновенные, так и осредненные во времени локальные значения касательных напряжений на стенке канала. Одной из существенных особенностей предлагаемой реализации данного метода является то, что датчик – катод монтируется в стенку канала заподлицо и не вносит возмущений в поток, не искажает его структуру. Схема измерения приведена на рис. 1.

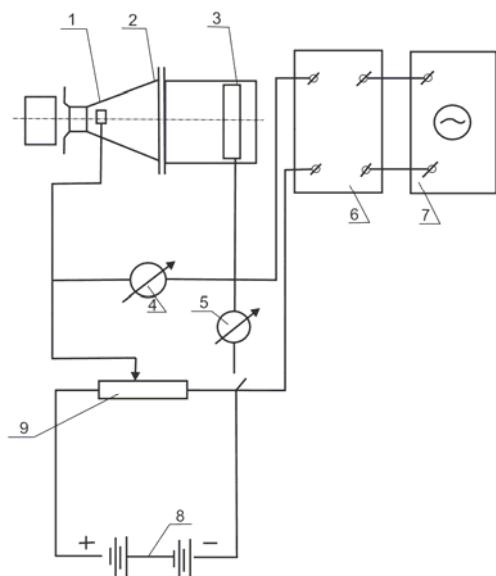


Рис. 1 - Принципиальная схема измерения пристеночных касательных напряжений электрохимическим методом: 1 - датчик – катод; 2 – сопло; 3 – анод; 4 – милливольтметр; 5- микроамперметр; 6 - усилитель постоянного тока; 7 – осциллограф-регистратор DL850; 8 – источник постоянного тока; 9 – реостат

Электролитическая ячейка с двумя электродами – никелевым макроэлектродом – анодом и пла-

тиновым микроэлектродом катодом, погруженными в раствор электролита, имеет поляризационную кривую характерной ступенчатой формы (рис. 2). Электролит содержит деполаризатор и избыток индифферентного вещества – фона. Возрастание тока при плавном изменении напряжения от  $E_1$  до  $E_2$ , приложенного к ячейке, обусловлено процессом деполаризации электрода ионами вещества, содержащимися в растворе. Убыль ионов деполаризатора в приэлектродном пространстве вследствие электрохимической реакции приводит к концентрационной поляризации электрода (участок  $E_1 - E_2$ ).

В режиме концентрационной поляризации ток практически не зависит от напряжения и называется предельным диффузионным током. На его значение влияет изменение концентрации деполаризатора в растворе и температура жидкости: он заметно возрастает при возникновении движения раствора относительно микроэлектрода.

Конвекция жидкости ускоряет доставку ионов деполаризатора из глубины раствора в приэлектродное пространство, обедненное носителями тока. Если концентрация вещества и температура постоянны, то величина предельного тока зависит только от скорости движения жидкости относительно микроэлектрода.

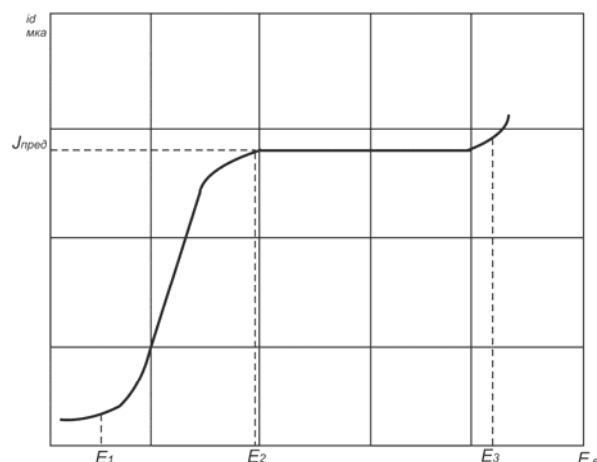


Рис. 2 - Поляризационная кривая электролитической ячейки

Предельный диффузионный ток определяется процессами в очень тонком приэлектродном слое. Иными словами, датчик – катод воспринимает изменение градиента скорости в слое жидкости, находящимся в непосредственной близости от него.

При достаточно малых продольных размерах датчика – катода толщина диффузионного слоя может находиться в пределах вязкого подслоя, что позволяет по измеренной величине предельного диффузионного тока, зависящего от градиента скорости в вязком подслое, определять локальные значения касательного напряжения.

В качестве электролита использовался водный раствор ферри- и ферроцианидов калия  $K_4[Fe(CN)_6]$ ,  $K_3[Fe(CN)_6]$ . Феррицианид восстанавливается на катоде, а ферроцианид окисляется на аноде.

Для исключения наложения на процессы молекулярной и конвективной диффузии движения ионов под воздействием электрического поля, в электролит добавлялся раствор хлористого калия  $KCl$ , который служил фоном.

Согласно данным [1,2], связь между величиной касательного напряжения  $\tau_w$  на стенке канала и предельным диффузионным током  $J_{i\delta\delta a}$  электролитической ячейки выражается соотношением:

$$\tau_w = \frac{const \mu L J_{пред}^3}{A^3 F^3 C_\infty^3 D^2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости электролита;  $L$  – размер датчика по направлению потока;  $C_\infty$  – концентрация ферроцианида;  $D$  – коэффициент диффузии;  $F$  – постоянная Фарадея;  $A$  – площадь датчика – катода.

Достоверность этого соотношения подтверждена многочисленными экспериментами, однако его использование для непосредственного вычисления касательных напряжений по измеренным значениям предельного диффузионного тока чревато опасностью внесения существенных погрешностей из – за неточности определения эффективных площадей датчиков – катодов и концентрации ионов ферроцианидов, которые входят в знаменатель выражения (1) в третьей степени.

Величина предельного диффузионного тока электролитической ячейки при прочих постоянных условиях определяется эффективной площадью катода, а последняя почти всегда отличается от геометрической площади. Причиной может быть засорение поверхности осажденными частицами механических примесей, неизбежно присутствующих в рабочей среде. Химическая и механическая обработка не дает гарантии полной очистки этих поверхностей.

Более надежен путь установления экспериментальных зависимостей  $\tau_w = f(J_{i\delta\delta a})$  для каждого датчика в таких гидродинамических условиях, при которых касательные напряжения могут быть определены еще и другим способом. Для этого достаточно обеспечить стабилизацию температуры рабочей среды и максимально сократить промежутки

времени между замерами для сохранения постоянным в формуле (1) на время опыта комплекса

$$\frac{\mu L}{A^3 F^3 C_\infty^3 D^2}$$

т.к. величины  $\mu$  и  $D$  являются функциями температуры, а  $L$ ,  $A$  и  $C_\infty$  могут изменяться с течением времени.

Анализ уравнения (1) позволяет заключить, что при хорошей стабилизации температуры электролита, при неизменной его концентрации и постоянной эффективной поверхности рабочих электродов относительные значения местных касательных напряжений, возникающих на стенках исследуемого канала при движении по нему закрученного потока, могут быть определены из соотношения:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{w\Sigma i}}{\tau_{wxi}} = \frac{J_{пред i}^3}{J_{пред i}^3} \quad (3)$$

где  $J_{пред i}$  – предельный диффузионный ток в цепи  $i$  – ого датчика – катода, измеренный в условиях закрученного потока;  $J_{i\delta\delta a i}$  – предельный диффузионный ток в той же цепи, измеренный при обтекании датчика – катода потоком без закрутки, но при том же значении расхода.

Эксперименты проводились на специальном стенде [4] в диапазоне расхода до 30 м<sup>3</sup>/час, при максимальном рабочем давлении 3 атм. В качестве рабочей среды использовался электролит на основе солей ферри- и ферроцианидов калия и  $KCl$ . Температура раствора поддерживалась на уровне  $20 \pm 0,5^\circ C$ , погрешность измерения расхода не превышала  $\pm 0,5\%$ . Опытными участками служили два конических канала с углами раскрытия  $2^\circ$  и  $8^\circ$ , которые поочередно работали в режимах конфузоров и диффузоров.

В стенки конусов в соответствующих контрольных точках монтировались датчики – катоды, используемые для определения касательных напряжений по электрохимическому методу. Датчики – катоды изготавливались из платиновой проволоки 0,4 мм и размещались в семи контрольных точках каналов, равномерно распределенных по их длине. Площадь рабочей поверхности каждого датчика составляла 0,12 мм<sup>2</sup>.

Для обеспечения нормальных условий работы системы измерения при проведении экспериментов предусмотрены следующие меры:

- а) все соприкасающиеся с электролитом части стенда изготавливались из оргстекла, винипласта и нержавеющей стали;
- б) гидродинамическая система выполнялась в виде контура с замкнутой циркуляцией;
- в) для приготовления электролита использовалась дистиллированная вода и химические реактивы ХЧ и ЧДА;
- г) перед началом каждого измерения проводилась электрическая деполяризация датчиков – катодов;

д) при установке датчиков – катодов особое внимание уделялось точности сопряжения их рабочих поверхностей с внутренней стенкой канала.

Для установления совместного влияния на  $\tau_w$  факторов закрутки и продольных (отрицательно и положительного) градиента давления, конические опытные участки поочередно работали в режимах конфузоров и диффузоров.

На первой стадии каждого эксперимента в опытном участке создавался турбулентный поток без закрутки. При установившемся режиме течения измерялся объемный расход жидкости, ее температура и значения предельных диффузионных токов в каждой электролитической ячейке [5]. Информация использовалась для вычисления опорных значений  $\tau_w$ .

Далее с помощью специального поворотного устройства при работающей установке на входе в опытный участок производилась смена условий течений, т.е. устанавливался требуемый завихритель.

Расход рабочей жидкости на протяжении каждого опыта поддерживался на прежнем уровне и постоянным. В каждом измерительном контуре измерялись новые значения предельных диффузионных токов.

Опыты проводились при двух режимах закрутки потока на входе в исследуемые каналы, значение критерия Рейнольдса по осевой составляющей скорости поддерживалось равным 103000. Закрутка потока обеспечивалась лопаточными завихрителями с конструктивным углом выходных кромок лопаток  $\varphi_k$  45° и 60°.

Результаты проведенных измерений, представленные на рис. 3 и 4, сравниваются с экспериментальными данными, полученными далее при тех же начальных условиях и таким же способом в цилиндрическом канале.

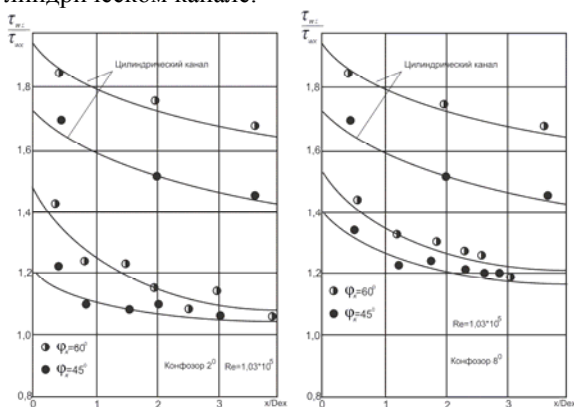


Рис. 3 - Распределение относительных значений пристеночных касательных напряжений по длине цилиндрических и конфузурных каналов при движении по ним турбулентных потоков с равной степенью начальной закрутки

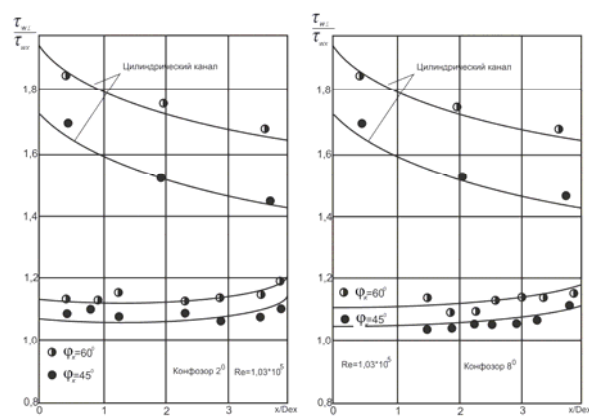


Рис. 4 - Результаты измерений, аналогичных представленным на рис. 3, но проведенных при работе тех же конических рабочих участков в режиме диффузоров

Приведенное на графиках сопоставление позволяет сделать вывод о том, что в целом фактор продольного градиента давления способствует ослаблению влияния закрутки потока на трение при турбулентном течении жидкости в осесимметричном канале, но измерение отношения  $\frac{\tau_w3}{\tau_w0}$  по длине

конфузорного и диффузорного каналов имеет практически противоположный характер.

Полученный материал будет использоваться для тестирования математических моделей турбулентных закрученных потоков в каналах конфузурного и диффузорного типов.

## Литература

1. Левич В.Г. Физико – химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз., 1959.
2. Накоряков В.Е. «ИФЖ». – 1971. - № 6, т. 20.
3. Попов В.Г. и др. – Минск: сб. «Тепло – массоперенос», т. 10. – 1968.
4. Кузьмин В.В. и др. Установка для метрологического обслуживания, динамических испытаний и газодинамических исследований преобразователей расхода / В.В. Кузьмин, А.А. Гайнуллина, А.Н. Ахмерова. Вестник КНИТУ. -2013. № 10. - с. 289-292.
5. Кузьмин В.В. и др. Бесконтактные методы диагностики кинематической структуры потоков жидкостных и газовых сред / В.В. Кузьмин, А.А. Гайнуллина, А.Н. Ахмерова. Вестник КНИТУ. -2013. № 11. - с. 75-79.