

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 пристеночного 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 платиновым микроэлектродом катодом, погруженными в раствор электролита, имеет поляризационную кривую характерной ступенчатой формы (рис. 2). Электролит содержит депполяризатор и избыток индифферентного вещества - фона. Возрастание тока при плавном изменении напряжения от E_1 до E_2 , приложенного к ячейке, обусловлено процессом депполяризации электрода ионами вещества, содержащимися в растворе. Убыль ионов депполяризатора 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 депполяризатора в растворе и температура жидкости: он заметно возрастает при возникновении движения раствора относительно микроэлектрода. Конвекция жидкости ускоряет доставку ионов депполяризатора 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, . 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 на стенке канала и предельным диффузионным током электролитической ячейки выражается соотношением: $i_{lim} = m \cdot C \cdot D \cdot A \cdot v$ (1) где m - коэффициент динамической вязкости электролита; L - размер датчика по направлению потока; C - 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 значениями 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 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 т.к. величины m и D являются функциями температуры, а L , A имогут 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: $i_{lim} = m \cdot C \cdot D \cdot A \cdot v$ (3) где i_{lim} - предельный диффузионный ток в цепи i - ого датчика - катода, измеренный в условиях закрученного потока; i_{lim0} - 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/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 -

$20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, погрешность измерения расхода не превышала $\pm 0,5\%$. Опытными участками служили два конических канала с углами раскрытия 2° и 8° , 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 $0,4\text{ мм}$ и размещались в семи контрольных точках каналов, равномерно распределенных по их длине. Площадь рабочей поверхности каждого датчика составляла $0,12\text{ мм}^2$. 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 факторов закрутки и продольных (отрицательного 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. 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 m 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 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 конфузорных 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 по длине конфузорного и диффузорного каналов имеет практически противоположный характер.

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