

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРИ МАЛЫХ СТЕПЕНЯХ ГАЗОНАСЫЩЕНИЯ

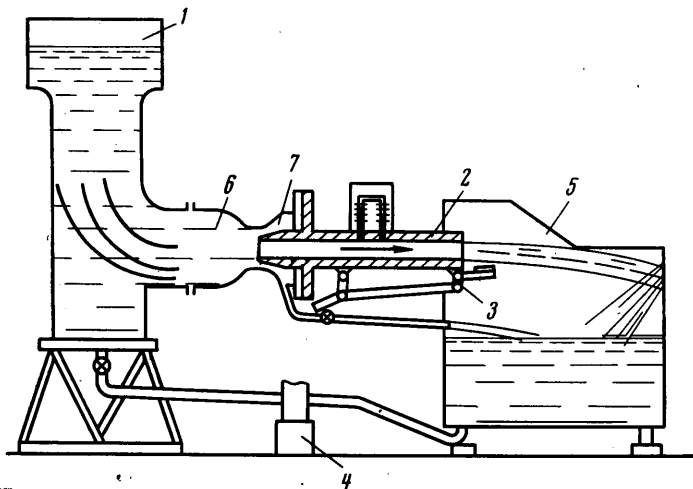
К. Е. БОГОСЛОВСКИЙ, М. А. ГЕНЕРАЛОВ

(Москва)

Проводится исследование газонасыщения турбулентного пограничного слоя на поверхности начального участка трубы при протекании через нее несжимаемой жидкости.

Если предположить, что силы поверхностного натяжения, действующие на границе газ — жидкость — твердое тело отсутствуют, а сами пузырьки имеют настолько малые размеры, что газо-жидкостную смесь в турбулентном пограничном слое можно рассматривать как континуум с непрерывно меняющимися плотностью и вязкостью, то, как показывают расчеты [1], при небольших концентрациях газовой компоненты, сопротивление трения мало зависит от степени газонасыщения.

В реальных условиях пузырьки газа, прежде чем диффундировать в пограничный слой, остаются некоторое время на обтекаемой поверхности, удерживаемые силами поверхностного натяжения, и вызывают дополнительные возмущения, которые,



Фиг. 1

как показано в данной работе, могут существенно повлиять на величину сил трения даже при очень малых степенях газонасыщения турбулентного пограничного слоя.

1. При газонасыщении пограничного слоя немаловажное значение имеет выбор способа транспортировки газа. С этой точки зрения можно выделить два метода.

Первый, осуществляемый обычно путем выдува газа параллельно обтекаемой поверхности, создает газовую прослойку между стенкой и жидкой фазой. Поскольку вязкость и плотность газовой пленки намного ниже вязкости и плотности жидкости, то следует ожидать существенного уменьшения сил трения [1].

Второй метод, рассматриваемый ниже, можно осуществить при помощи подачи газа через пористую стенку или при помощи электролиза обтекающей жидкости. В этом случае в пограничном слое возникает дисперсная смесь пузырьков газа и жидкости.

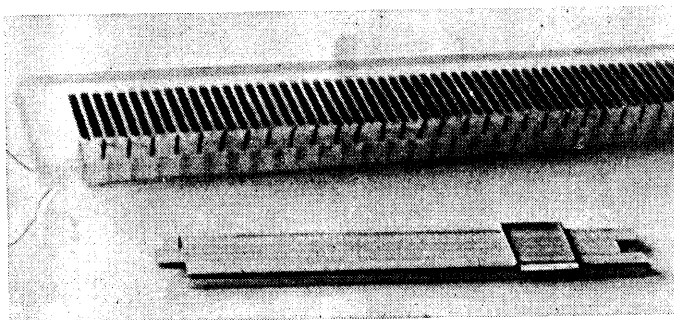
Исследования, проведенные ранее в работе [2], показали, что поведение пузырьков в смеси существенно зависит от их размеров. При малых радиусах ( $r < 0.01$  см) пузырьки начинают вести себя как твердые шарики. Расчеты, проведенные в работах [1, 3], показали, что в случае непрерывной среды заметное снижение сопротивления происходит при достаточно больших концентрациях газа. В этом отношении способ газонасыщения при помощи электролиза оказывается малоэффективным для снижения сил гидродинамического трения, так как для получения больших относительных расходов газа  $q$  требуются очень большие энергетические затраты. Например, при концентрации электролитов, аналогичных морской воде, для получения удельных расходов газа порядка  $0.03$  см/сек требуется напряжение на электродах в 20—30 в. При этом коэффициент полезного действия, определяемый как отношение энергии, погребной для образования газа к полной затраченной энергии, получается

порядка 5—10%. Основная же доля энергии идет на образование тепла [4]. Малый коэффициент полезного действия делает нецелесообразным использование электролиза для снижения сопротивления тел.

Вместе с этим применение электролиза в лабораторных условиях для исследования физической картины газонасыщения пограничного слоя может оказаться весьма удобным в виду своей простоты.

2. Исследование газонасыщения пограничного слоя производилось на стенках входного участка трубы квадратного сечения. Для получения потока жидкости использовалась гидродинамическая импульсная установка гравитационного действия, схема которой представлена на фиг. 1.

Под действием сил тяжести электропроводящая жидкость (0,5%-ный раствор КОН) из напорного бака 1 поступала в рабочую часть 2, создавая поток с необходи-



Фиг. 2

мыми параметрами. Пуск и прекращение работы установки осуществляется при помощи рычажного затвора 3. После проведения эксперимента раствор электролита насосами 4 перекачивался из сливного бака 5 обратно в напорный бак 1 и установка снова была готова к испытаниям.

Конфузор 6 установки имел квадратное сечение, контур его очерчивался кривой Витошинского, что обеспечивало достаточную равномерность потока на входе в рабочую часть. Для слива пограничного слоя, образующегося на стенках конфузора, применялась специальная система отсоса 7, расход жидкости через которую контролировался трубкой Вентури.

Рабочая часть 2 представляла собой трубу квадратного сечения размером  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>, изготовленную из оргстекла. Стенки трубы изготавливались из отдельных панелей, в которые устанавливались и заливались эпоксидной смолой электроды из никеля. После затвердевания эпоксидной смолы панели фрезеровались, шлифовались и полировались (фиг. 2). Изготовленная таким способом рабочая часть имела отклонения размеров сечения от номинальных не более  $\pm 0,07$  мм. Передние кромки рабочей части имели плавные скругления и входили в контур с зазорами в 2 мм, обеспечивающими отсос пограничного слоя.

Все емкости установки, с которыми соприкасался электролит, были выполнены из оргстекла. Это позволило свести к минимуму химическое взаимодействие электролита с материалом установки.

Газонасыщение пограничного слоя производилось при помощи электролиза, протекающего через рабочую часть электролита. Напряжение подводилось к электродам, заделанным в стенках рабочей части. В качестве источников питания использовались батареи аккумуляторов. Для равномерного распределения выделяющегося на электродах газа они подсоединялись к батарее в следующем порядке: один электрод кислородный, затем два подряд водородные, потом опять один кислородный и т. д.

В процессе эксперимента измерялась величина проходящего тока  $I$ , после чего по известной формуле [4] определялся секундный расход газа:  $Q = 0,174I$  см<sup>3</sup>/сек. Изменение скорости потока в рабочей части производилось с помощью диафрагм, устанавливаемых в конце рабочей части. Максимальное значение массовой скорости  $w$  потока равнялось 5,51 м/сек.

Для фиксации точки перехода вблизи входа в рабочую часть на последнюю наклеивались специальные турбулизирующие полоски.

Полный коэффициент трения находился по перепаду статического давления в начале и в конце исследуемого участка длиной  $l$ , причём в процессе обработки экспериментальных материалов вводились поправки на величину скорости, определяемые толщиной вытеснения турбулентного пограничного слоя.

На фиг. 3 приведены значения полного коэффициента сопротивления  $C_x^\circ$ , полученные при отсутствии электролиза. Они хорошо совпадают с данными Прадтля и Шлихтинга для плоской гладкой пластинки [5].

3. Образующиеся на электродах в результате электролиза пузырьки водорода и кислорода не сразу поступают в пограничный слой. Увеличиваясь в размерах, они достигают некоторого максимального диаметра и после этого отрываются. На их месте образуются новые пузырьки.

Оторвавшиеся пузырьки газа создают в пограничном слое газо-жидкостную смесь.

«Сидящие» же на обтекаемой поверхности пузырьки, находящиеся в стадии роста, взаимодействуют с пограничным слоем аналогично тому, как это имеет место при обтекании шероховатой поверхности. При этом возможны три режима течения:

1) режим без проявления шероховатости, когда размер пузырьков  $k = 2r$  настолько мал, что они не выступают за границу ламинарного подслоя;

2) переходный режим, при котором пузырьки частично выступают из ламинарного подслоя. Сопротивление Рейнольдса  $R = vl / \nu$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость;

ление трения в этом случае зависит от числа

3) режим с полным проявлением шероховатости, когда все пузырьки выступают из ламинарного подслоя. Сопротивление для этого режима зависит только от отношения  $l/k$  и не зависит от  $R$ .

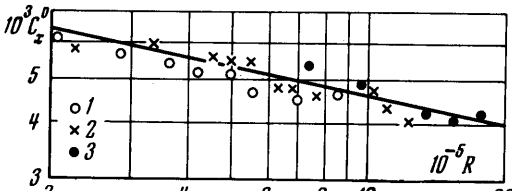
При образовании газовых пузырьков могут реализоваться все три режима. Однако в отличие от обычной «твердой» шероховатости, имеющей постоянную, не зависящую от скорости конфигурацию, пузырьковая шероховатость имеет размеры и конфигурацию, зависящие от режима течения и от величины сил поверхностного натяжения.

Поэтому при достаточно больших скоростях величина пузырьков, сидящих на обтекаемой поверхности, может оказаться настолько малой, что они не будут выступать из ламинарного подслоя, т. е. не будут оказывать влияния на сопротивление трения. Рассматривая зависимости  $C_x/C_x^\circ = f(q)$ , приведенные на фиг. 4 ( $C_x$  — коэффициент сопротивления при наличии электролиза,  $q$  — относительный расход газа на единицу площади), можно сказать, что этому случаю соответствует скорость  $v = 5.1$  м/сек. Точки 1—3 были получены в экспериментах с  $v$ , равной 1.51, 2.39 и 5.1 м/сек соответственно. Данные в верхней части фиг. 4 соответствуют  $l = 0.25$  м, в средней —  $l = 0.2$  м, в нижней —  $l = 0.15$  м.

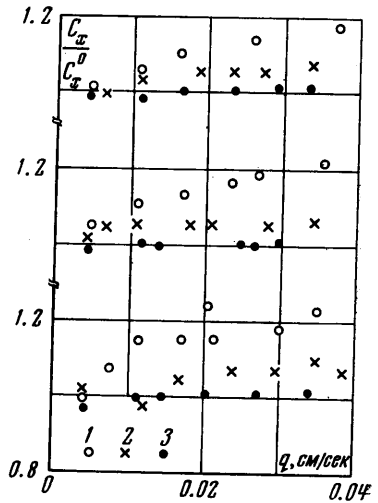
С уменьшением скорости уменьшаются поверхностные силы, действующие на стенку. Размеры отрывающихся пузырьков увеличиваются, они начинают выступать из ламинарного подслоя, что приводит к росту сопротивления. Например (см. фиг. 4), при скорости 2.39 м/сек,  $q = 0.03$  см/сек и  $l = 0.2$  м  $C_x/C_x^\circ$  увеличивается приблизительно на 6%, а при скорости 1.51 м/сек и тех же  $q$  и  $l$  — на 20%.

Интересно отметить, что на всех испытанных режимах обтекания снижения сопротивления трения за счет газонасыщения не наблюдалось.

Резюмируя указанное выше, можно заключить, что при малых степенях газонасыщения турбулентного пограничного слоя может возникнуть повышение сопротивления, обусловленное увеличением степени шероховатости обтекаемой поверхности. Для воды и слабых растворов электролитов (морская вода) это явление наблюдается при скоростях, меньших 5 м/сек. При скоростях, равных или больших 5 м/сек, размеры образующихся при электролизе пузырьков настолько малы, что они не выступают за пределы ламинарного подслоя и увеличение сопротивления в этом случае не происходит.



Фиг. 3



Фиг. 4

## ЛИТЕРАТУРА

1. Басин А. М., Короткин А. И., Козлов Л. Ф. Управление пограничным слоем судна. Л., «Судостроение», 1968.
2. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1959.
3. Лапин Ю. В. Трение и теплообмен в сжимаемом турбулентном пограничном слое при наличии ввода вещества. Ж. техн. физ., 1960, т. 30, вып. 8.
4. Плейдерер Г. Электролиз воды. Л., Химтеоретиздат, 1935.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Изд-во иностр. лит., 1956.

УДК 532.526.7:532.55:541.12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТРЕНИЕ ПРИ РЕЗКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ ЖИВОГО СЕЧЕНИЯ ПОТОКА В ТРУБАХ

Б. В. ЛИПАТОВ

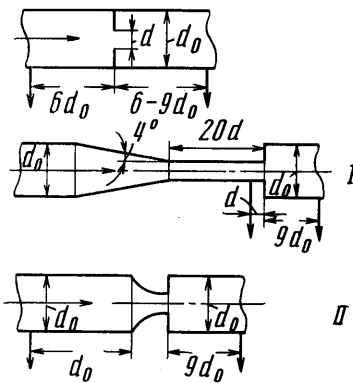
(Москва)

Экспериментально исследован эффект воздействия полимерных добавок на турбулентный поток воды в трубе при наличии в ней местных сопротивлений в виде диафрагм, внезапных расширений и сжатий потока при нескольких степенях изменения сечения и разных концентрациях различных полимеров. Исследования проводились при числах  $R \geq 10^4$ , при которых режим движения можно считать автомодельным. Именно эти режимы движения характерны для турбулентных потоков, представляющих наибольший интерес для практики.

Движению растворов полимеров при резких изменениях живого сечения потока в трубах посвящена лишь одна работа [1], в которой описан опыт с диафрагмой при ламинарном движении жидкости в трубе до сужения и приведены данные для одной степени сжатия потока и одной концентрации полимерного раствора. Вместе с тем существенно исследование движения такого типа в более широком диапазоне изменения живого сечения и концентраций полимеров.

1. Описание опытной установки и условий эксперимента. Экспериментальная установка представляла собой прямой участок полиэтиленовой трубы диаметром  $d_0 = 21,5$  мм, соединяющей между собой два бака. Вода с растворенным в ней полимером при помощи центробежного насоса прокачивалась из смесительного в сливной бак. В одной части трубы была расположена соединительная муфта, которая позволяла помещать в трубе диафрагмы с различными диаметрами отверстий или специальные вставки, создающие либо внезапное расширение, либо внезапное сужение потока.

Серия сменных диафрагм имела диаметры:  $d = 4, 3, 6,2, 8,0, 12,0, 16,0$  мм. Это позволяло получать отношения площадей живого сечения потока в подводящей трубе к живому сечению в отверстии диафрагмы ( $\sigma$ ) от 1,81 до 25. Кромки диафрагм были симметрично заострены под углом  $45^\circ$ . Специальные вставки двух типов для внезапного расширения потока обеспечивали степени расширения  $\sigma = 7,22, 26,84, 27,37, 65,82, 69,99$ . Схемы установки диафрагм в трубе и вставок для внезапного расширения потока приведены на фиг. 1. На схемах стрелками показаны места отбора давления и направления движения потока. Вставка для внезапного сужения потока аналогична вставке типа I (фиг. 1), но с противоположным направлением движения потока и соответствующим размещением мест отбора давления. Для этой вставки степени сужения потока 7,22 и 27,64.



Фиг. 1