

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

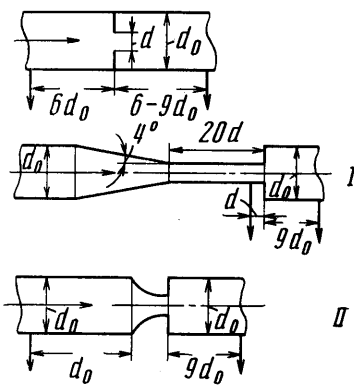
(Москва)

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.

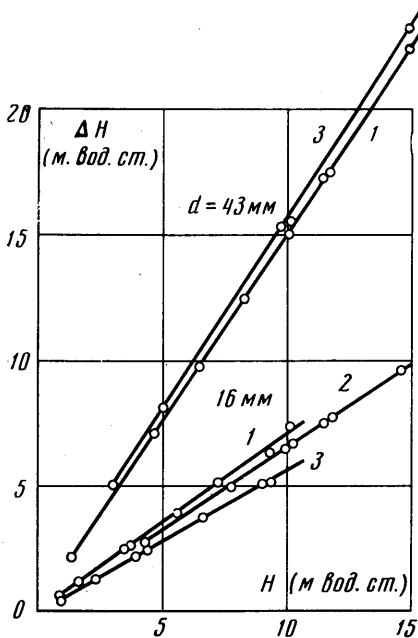
1. Описание опытной установки и условий эксперимента. Экспериментальная установка представляла собой прямой участок полиэтиленовой трубы диаметром $d_0 = 21,5$ мм, соединяющей между собой два бака. Вода с растворенным в ней полимером при помощи центробежного насоса прокачивалась из смесительного в сливной 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 (σ) от 1,81 до 25. Кромки диафрагм были симметрично заострены под углом 45° . 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

Как видно из фигуры, вставки типа I и II (фиг. 1), осуществлявшие внезапное расширение потока, отличались друг от друга различными способами подвода жидкости к плоскости наименьшего сечения. Величина скорости жидкости в мерной трубе варьировалась с помощью изменения числа оборотов насоса и клапаном на выходе из него. В качестве добавок, снижающих сопротивление турбулентного трения, применялись гуаровая смола, полиоксиэтилен (Polyox WSR-301) и полиакриламид.



Фиг. 2

представляют собой прямые линии. Как видно (см. фиг. 2), этот характер зависимостей $\Delta H = f(H)$, в пределах исследованной области динамических напоров не нарушается и для растворов полимеров.

Кривые (фиг. 2) отражают экспериментальные результаты для воды (кривые 1) и растворов гуаровой смолы (кривые 2 при концентрации $c = 0.03\%$ и кривая 3 при концентрации 0.09%) только с двумя диафрагмами ($d = 16$ и 4.3 мм). Все опы-

Вначале для каждого местного сопротивления снимались зависимости перепада давления ΔH от динамического напора H для воды, а затем для раствора полимера в воде. Растворение полимеров производилось непосредственно в смесительном баке установки. Раствор полиоксиэтилена использовался через 2—4 часа после начала приготовления, растворы других полимеров — через 12—24 часа. Температура поддерживалась в пределах $12-16^\circ\text{C}$. В связи с тем что общий объем раствора в установке составлял около 500 л, а для одного измерения требовалось перекачивать только 30—60 л жидкости, которая затем возвращалась в общую систему, в процессе опытов с одним местным сопротивлением (включая и повторные замеры) влияние деградации на изучаемые явления не отмечалось. Для каждого последующего опыта с другим местным сопротивлением готовился свежий раствор.

2. Результаты экспериментов. Результаты экспериментов с диафрагмами представлены на фиг. 2, где приведены графики зависимости потери напора в диафрагме от динамического напора, протекающего через нее потока $H = v^2 / 2g$ (v — средняя скорость в живом сечении диафрагмы). В связи с тем что исследования проводились в автомоделной области по числу Re , зависимости $\Delta H = f(H)$ для воды

Таблица 1

Зависимость коэффициента k от диаметра диафрагмы d , степени сжатия потока σ и концентрации раствора гуаровой смолы c .

d , мм	σ	$Re/10^5$	100 к %	
			$c = 0.03\%$	$c = 0.09\%$
16	1.81	0.71—2.7	—6	—16
12	3.21	0.53—2.1	—2	—6
8	7.22	0.35—1.4	0	—
6.2	12.02	0.27—1.1	0	—
4.3	25.00	0.19—0.7	—	4

ты с промежуточными по размерам диафрагмами привели к аналогичным по характеру зависимостям $\Delta H / H$ от H . Конечные результаты опытов с диафрагмами сведены в табл. 1, где приведены значения коэффициента $k = (\xi_p - \xi_w) / \xi_w$. Здесь $\xi = \Delta H / H$ — среднее значение коэффициента сопротивления диафрагмы, индексы p и w относятся к раствору полимеров и воде соответственно. В дополнение к данным этой таблицы следует упомянуть, что диафрагма с $d = 4$ мм была проверена

на растворе полиоксидилену при концентрации 0.03%. Величина K в этом случае оказалась близкой к нулю.

Результаты опытов по влиянию добавок полимеров на сопротивление при внезапном расширении потока сведены в табл. 2. Первые три строки таблицы относятся к

Таблица 2

Зависимость коэффициента k от диаметра узкого сечения, степени сжатия потока σ и концентрации растворов полимеров

d, мм	σ	Re/10 ⁵	100 k (%)		
			I	II	III
8.00	7.22	0.94—1.70	-10.0	-11.0	—
4.11	27.37	0.48—0.90	-3.3	-5.4	-3.0
2.65	65.82	0.16—0.60	-3.0	-5.5	—
4.15	26.84	0.35—1.70	1.8	-1.7	2.9
2.57	69.99	0.22—0.90	2.2	-1.2	4.9

опытам со вставкой типа I и две следующие — со вставкой типа II. В столбце I приведены данные для раствора гуаровой смолы с концентрацией 0.05%, в столбцах II и III — для полиоксидилену и полиакриламида с концентрацией 0.03%.

В табл. 2 не помещен результат опыта со вставкой типа I при $d = 8$ мм и концентрацией раствора гуаровой смолы 0.03%. Для этого случая получено $K = -9\%$. Ниже приводятся результаты опытов с внезапным расширением потока

d, мм	σ	Re/10 ⁵	a	b	c
8.00	7.22	0.35—1.1	+13	+57	+23
4.09	27.64	0.18—0.6	—	—	+59

Здесь a , b и c есть коэффициенты K для растворов гуаровой смолы с концентрациями 0.03 и 0.09% и полиоксидилену с концентрацией 0.03% соответственно.

Зависимости $\Delta H = f(H)$ для воды и растворов полимеров при внезапном расширении и сжатии потоков, так же как и для диафрагм, представляют собой прямые линии, что свидетельствует об автомодельности величин ξ_w и ξ_p по числу Re.

3. Из полученных результатов видно, что добавки гуаровой смолы в концентрации 0.03 и 0.09% снижают (начиная с некоторых малых значений σ) сопротивление диафрагм потоку воды. При некоторых промежуточных значениях σ они не оказывают влияния на сопротивление, а при $\sigma \geq 25$ сопротивление увеличивается. При небольшой абсолютной величине эффекта влияния добавок на сопротивление его относительное изменение в зависимости от σ и концентрации существенно.

В опытах с геометрией канала типа I (фиг. 1) поток протекал по трубе диаметром d и длиной $20d$, прежде чем происходило его расширение. Тем самым создавались условия, благоприятные для снижения уровня турбулентности до расширения за счет известного воздействия полимерных добавок на поток. Результаты экспериментов показали уменьшение потерь в этом канале и тенденцию к затуханию эффекта снижения сопротивления при больших значениях σ .

Для геометрии канала типа II (фиг. 1), где до расширения потока участок трубы малого диаметра был заменен коротким профилированным насадком, при больших σ сопротивление при добавках полимеров увеличивается; при дальнейшем увеличении σ эта тенденция усиливается. Результат, полученный для этого случая при добавке полиоксидилену (см. данные II табл. 2), по-видимому, не опровергает последнего вывода, а свидетельствует о том, что отмеченная тенденция для этого полимера проявляется при более высоких значениях σ , чем для гуаровой смолы и полиакриламида.

Эти результаты лишь подчеркивают то обстоятельство, что в рассматриваемых случаях имеют место аналогичные явления, но в несколько отличных условиях. Действительно, указанные течения отличаются одно от другого лишь тем, что эффект снижения уровня турбулентности (до расширения) полимерными добавками в первом случае существенно сильнее, чем во втором. Отсюда вытекает, по-видимому, что предварительное снижение уровня турбулентности и обуславливает полученное в опытах снижение сопротивления при внезапном расширении. Это влияние предварительного гашения турбулентности настолько значительно, что оно подавляет то

увеличение сопротивления, которого можно было бы ожидать при растекании струи раствора полимера на основании результатов [2], где показано, что уровень турбулентности в струе увеличивается при добавках гуаровой смолы и полиоксиэтилена (в неэластичной фазе). Следовательно, можно ожидать, что в случаях, когда предварительное гашение турбулентности незначительно, а под влиянием добавки полимера турбулентность расширяющейся струи возрастает, то и потери энергии потока будут больше. Это подтверждается сравнением результатов опытов, полученных для течений в каналах типа I и II.

Заметим, что изменение в широких пределах степени расширения потока σ аналогично (по воздействию на потери энергии) переходу от течения слабых растворов полимеров по трубе, что соответствует малым значениям σ , к растеканию свободной струи в безграничной массе жидкости, при больших значениях этой величины. В зависимости от степени сжатия потока имеют как бы преобладающее значение закономерности движения растворов полимеров или в трубах, или в растекающихся свободных струях.

Приведенные выше рассуждения справедливы также и для опытов с диафрагмами, так как потери в диафрагмах — это тоже потери при расширении потока, но с той лишь разницей, что действительное сужение потока в них существенно больше, чем номинальное значение величины σ . Именно последним обстоятельством и приведенными выше замечаниями о влиянии величины σ можно объяснить то, что при диафрагме с $d = 8$ мм эффект добавки гуаровой смолы равен нулю, а при том же диаметре узкого сечения, но для случая внезапного расширения имеет место уменьшение сопротивления на 10%. В аналогичном опыте при диаметре диафрагмы 4.3 мм получено увеличение потерь на 4% против их уменьшения на 3% при внезапном расширении (при $d = 4.11$ мм). В опытах с внезапным сужением потока в трубе эффект влияния добавок полимеров оказался значительно большим, чем для всех других описанных выше экспериментов.

Картина течения, наблюдаемая при внезапном сужении потока, сходна с течением через диафрагмы, но столь сильного влияния добавок полимеров не обнаружено. Это может быть объяснено тем, что при внезапном сужении можно ожидать большие степени дополнительного сжатия струи за узким сечением (во всяком случае при выбранном способе выполнения кромок отверстия диафрагм) и, соответственно, большего отличия истинной величины σ от номинальной, чем это имеет место в исследованных диафрагмах. По-видимому, этого соображения недостаточно для объяснения столь сильного эффекта воздействия добавок на поток, и полное его выяснение требует дополнительных исследований. Вместе с тем при внезапном сужении, как и в других приведенных выше случаях, сохраняется увеличение степени влияния полимерных добавок на поток при увеличении концентрации раствора, а также зависимость этого влияния от свойств добавляемого полимера.

Объяснение полученных результатов, относящихся к потокам, протекающим через различные местные сопротивления, может быть в известной мере сведено к одновременному проявлению двух тенденций. С одной стороны, к уменьшению уровня турбулентности в потоке до местного сопротивления, с другой стороны, к увеличению этого уровня в свободных струях, образующихся в местных сопротивлениях при отрыве основного течения от ограничивающих его стенок. Превалирование для каждого конкретного случая движения потока первой или второй тенденции, по-видимому, может определять не только величину, но и знак влияния добавки полимера на величину потерь в местном сопротивлении.

В заключение автор благодарит Г. И. Баренблатта за внимание к работе, В. Н. Калашникова за помощь при ее выполнении.

Поступило 22 IV 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Bate H. G. Orifice plate calibration in a dilute polymer solution. Nature, 1967, vol. 216.
2. Баренблатт Г. И., Калашников В. Н. О влиянии надмолекулярных образований в разбавленных растворах полимеров на турбулентность. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 3.