

## ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК НА ПОКАЗАНИЯ ТРУБКИ ПОЛНОГО НАПОРА

Ю. Н. Алексеев, И. Д. Желтухин

(Ленинград)

Приводятся результаты измерения давления, воспринимаемого трубкой полного напора в равномерном потоке водных растворов полиакриламида. Обнаружено, что показания трубки зависят от размеров ее приемного носика, скорости течения, концентрации растворов и их температуры.

В работах [1-3] было отмечено, что при течении водных растворов некоторых высокомолекулярных соединений в трубах измерение профиля скорости произведится с погрешностью. Об этом свидетельствует отличие значения расхода, определенного непосредственным измерением, от значения, вычисленного по измеренному профилю скорости. По-видимому, аналогичное явление наблюдалось при измерениях скорости в затопленной турбулентной струе [4]; величина импульса струи, рассчитанная по измеренному профилю скорости, для раствора полимера оказалась на 10—30% меньше значения импульса в начальном сечении струи.

Изучение этого явления имеет большое значение, так как, по данным работы [1], оно наблюдается в растворах лишь тех полимеров, которые при добавлении их к жидкости приводят к снижению сопротивления турбулентному течению.

Ряд исследователей [1-3, 5], связывает погрешность измерения скоростей в течениях типа пограничного слоя (таких, как поток в трубе, течение в струе и т. п.) с наличием сдвига средней скорости в потоке, набегающем на трубку полного напора, и с проявлением обусловленных этим сдвигом нормальных напряжений в течениях растворов полимеров.

Ниже излагаются экспериментальные результаты, свидетельствующие о том, что и в отсутствие сдвига в набегающем потоке, измерение скорости с помощью трубок полного напора в течениях водных растворов высокомолекулярных соединений производится с ошибкой. Величина отношения  $k = H / H_0$  скоростного напора  $H$ , измеряемого при помощи трубки, к истинному значению  $H_0$  скоростного напора зависит от размеров приемного носика трубки, величины  $H_0$ , концентрации раствора  $C$  и температуры  $t$ .

Измерения проводились в прямоугольном рабочем участке гидродинамической трубы, заполнявшейся испытуемой жидкостью (водой или водным раствором полимера). Размеры сечения рабочего участка трубы составляли  $80 \times 125$  мм, длина рабочего участка равнялась примерно 500 мм. Емкость трубы около 100 л.

Измерения скоростей в сечении рабочей части трубы при течении воды показали, что в ядре потока неравномерность поля скоростей не превышает 1%. Это позволило проводить измерения скорости одновременно пятью трубками полного напора различного размера расположенными в ряд по ширине рабочего участка на расстоянии 15 мм одна от другой.

Скорости измерялись трубками, имевшими форму используемых обычно для измерений в пограничном слое микротрубок полного напора — с тупым сплюснутым носиком.

Для этих пяти трубок приводим размеры прямоугольных сечений: высоты  $h$  и ширины  $b$  приемного носика трубки; высоты  $h_0$  и ширины  $b_0$  приемного отверстия трубки.

Значения скоростного напора  $H$  измерялись при помощи батарейного манометра, соединенного с трубками, как разность между величинами давления, воспринимаемого каждой из трубок, и величиной статического давления, отбор которого производился с нижней стенки трубы через дренажное отверстие диаметром 0.4 мм.

Предварительными опытами по измерению расхода при помощи трубок (сопел) Вентури с различной величиной поджатия (от 1:2 до 1:4) было установлено, что в исследованном диапазоне концентраций раствора перепад давлений на расходомерной трубке будет функцией лишь расхода жидкости сквозь нее и не зависит от концентрации раствора. Вследствие этого истинные значения скоростного напора  $H_0$  в рабочем участке трубы при течении растворов определялись по установленной на воде зависимости  $H_0$  от перепада давлений на конфузоре трубы (поджатие 1:3.4). Диапазон изменения значений скоростного напора  $H_0$  составил от нуля до 150 мм вод. ст., что соответствовало изменению скорости в рабочем участке от нуля до 1.7 м/сек.

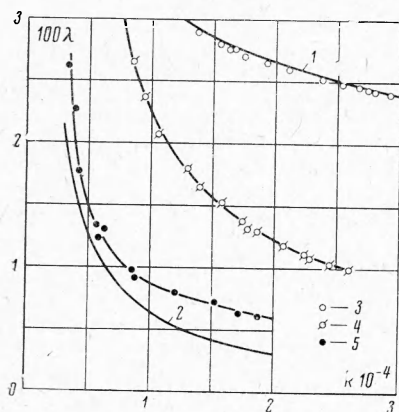
Измерения производились при двух значениях температуры потока 19 и 38° С. Отклонение температуры от указанных значений в условиях опыта не превышало 2°.

№	$h_0$ мм	$h$ мм	$b_0$ мм	$b$ мм
1	0.32	0.60	2.53	2.83
2	0.54	0.82	2.51	2.75
3	0.91	1.50	4.14	5.36
4	2.32	3.10	4.63	6.02
5	0.17	0.61	2.57	2.91

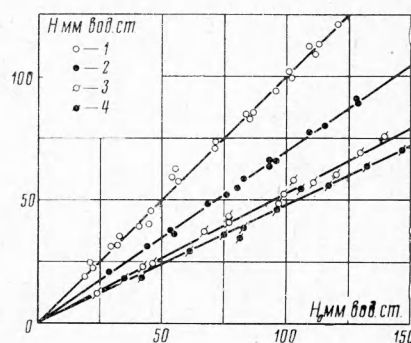
В качестве полимерной добавки использовался полиакриламид отечественного производства со средневесовым молекулярным весом около  $5 \cdot 10^6$ . Были опробованы водные растворы пяти различных концентраций полимера (по весу):  $0.85 \cdot 10^{-4}$ ,  $1.55 \cdot 10^{-4}$ ,  $2.10 \cdot 10^{-4}$ ,  $2.75 \cdot 10^{-4}$ ,  $3.40 \cdot 10^{-4}$ . Значения относительной вязкости (вязкость раствора, отнесенная к вязкости воды при одинаковой температуре) составили соответственно 1.22, 1.42, 1.60, 1.83, 2.10.

В условиях стационарного ламинарного течения водные растворы полиакриламида ведут себя как ньютоновские жидкости: их вязкость не зависит от скорости сдвига.

Аномальное поведение растворов полиакриламида обнаруживается при турбулентном движении и проявляется в том, что в сходных условиях их сопротивление турбулентному течению меньше, чем у воды.



Фиг. 1



Фиг. 2

На фиг. 1 представлена зависимость коэффициента сопротивления  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $R$ , полученная по измерениям гидравлического сопротивления при течении воды и водных растворов полиакриламида в круглой трубе диаметром 7.2 мм. Кривые 1 и 2 соответствуют зависимостям

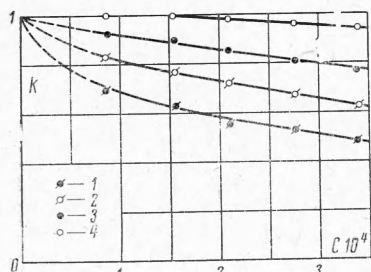
$$100 \lambda = 31.64/R^{-0.25}, \quad 100 \lambda = 6400 / R$$

Точки 3, 4, 5 соответствуют значениям концентраций  $C = 0$ ,  $1.03 \cdot 10^{-4}$ ,  $4.5 \cdot 10^{-4}$ . Отсюда следует, что добавка полимера к воде приводит к уменьшению сопротивления.

На фиг. 2 показана характерная зависимость скоростного напора  $H$ , измеряемого при помощи трубки полного напора, от истинных значений скоростного напора. Зависимость получена по данным измерений, произведенных при помощи трубки 1 в растворах полиакриламида различной концентрации. Точки 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям концентраций  $C = 0.85 \cdot 10^{-4}$ ,  $2.75 \cdot 10^{-4}$ ,  $3.4 \cdot 10^{-4}$ .

Из приведенных данных следует, что при неизменных размерах приемного носика трубки значение воспринимаемого ею давления тем меньше, чем выше концентрация

полимерной добавки. В исследованном диапазоне скоростей зависимость  $H(H_0)$ , полученная для трубок различного размера в растворах различной концентрации, является линейной, что позволяет характеризовать ошибку при измерении скорости с помощью трубки полного напора параметром  $k = H / H_0$ . На фиг. 3 представлены зависимости параметра  $k$  от концентрации раствора при неизменной температуре; кривые 1, 2, 3, 4 построены по измерениям напора соответственно трубками 1, 2, 3, 4 с размерами приемного носика, указанными выше. Как следует из фиг. 3, значение воспринимаемого трубкой давления тем меньше, чем выше концентрация полимерной добавки в растворе и чем меньше размеры приемного носика трубок. На фиг. 4 представлены



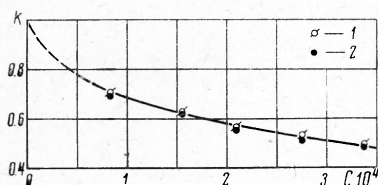
Фиг. 3

результаты измерений трубками с одинаковыми размерами приемного носика, но с различными размерами приемного отверстия (трубка 1 — кривая 1 и трубка 5 — кривая 2). Из приведенных данных следует, что величина давления, воспринимаемого трубкой полного напора в растворе, определяется не размерами ее приемного отверстия, а размерами и формой ее приемного носика. На фиг. 5 показана зависимость

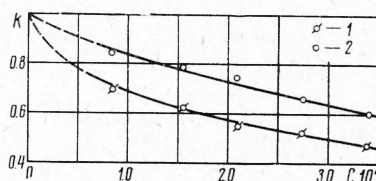
параметра  $k$  от концентрации для раствора с температурой  $t = 19^\circ \text{C}$  (кривая 1) и раствора с температурой  $t = 38^\circ \text{C}$ , полученные при измерениях давления трубкой 1. Отсюда следует, что с ростом температуры ошибка в определении скоростного напора уменьшается.

В результате выполненного исследования установлено, что использование трубок полного напора для измерения скорости приводит к заниженным, по сравнению с истинными, значениям скорости. Отсюда следует необходимость проведения перед измерениями в потоке с неравномерным распределением скорости (например, в трубе или пограничном слое) предварительной тарировки применяемой трубки полного напора в равномерном потоке.

Причины, обуславливающие отклонение измеряемого трубкой полного напора от его истинной величины, не ясны. Представляется вероятным, что указанное отклонение вызвано проявлением дополнительных вязкоупругих напряжений, возникающих в жидкости вблизи приемного носика трубки при резком торможении потока. Это подтверждается следующими ниже качественными соображениями.



Фиг. 4



Фиг. 5

Используя прием учета влияния вязких напряжений на показания трубки полного напора, указанный в работе [6], рассмотрим уравнения движения жидкости в напряжениях в проекции на ось  $x$ , совпадающую с критической линией тока

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  — плотность жидкости,  $u$  — составляющая скорости вдоль оси  $x$ ,  $p$  — статическое давление и  $\sigma$  — напряжения, обусловленные в рассматриваемом случае как вязкостью, так и упругостью жидкости. Интегрируя обе части уравнения (1) от  $x = 0$ , до  $x = \delta$  ( $\delta$  — толщина пограничного слоя вблизи критической точки), получаем

$$p_0 = (p_* + \frac{1}{2}\rho U_*^2) - (\sigma_* - \sigma_0) \quad (2)$$

Здесь  $p_0$  — давление, воспринимаемое трубкой;  $\sigma_0$  — дополнительные напряжения в критической точке при  $x = 0$ . Звездочкой обозначены значения рассматриваемых величин при  $x = \delta$ . Дополнительные напряжения, обусловленные влиянием упругих свойств жидкости, при малых значениях скоростей сдвига пропорциональны [7] их квадрату, или в рассматриваемом случае величине  $(\partial u / \partial x)^2$ .

Пренебрегая вкладом вязких напряжений и учитывая, что  $\partial u / \partial x = 0$  при  $x = 0$ , получаем

$$\sigma_* - \sigma_0 \approx \sigma_* \sim \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_*^2 \quad (3)$$

где  $\sim$  — знак пропорциональности.

Значение  $(\partial u / \partial x)_*^2$  может быть определено [8] по теории потенциального обтекания носика трубки полного напора и по порядку величины составляет

$$\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_*^2 \sim \frac{U_0^2}{l^2} \quad (4)$$

Здесь  $l$  — характерный размер приемного носика трубки. С учетом (3) и (4) для напряжения  $\sigma_*$  имеем

$$\sigma_* = \beta H_0 \quad (5)$$

Здесь  $H_0$  — скоростной напор;  $\beta$  — параметр, зависящий от упругих характеристик жидкости и условий течения вблизи приемного носика трубки. Вычитая из обеих частей равенства (2) значения статического давления, с учетом (5), найдем, что ранее

введенный параметр  $k$  связан с  $\beta$  соотношением

$$k = H / H_0 = 1 - \beta \quad (6)$$

Из (4) и (5) следует, что при малых скоростях, когда выполняется условие (3), величина  $k$  не зависит от скорости и чем меньше характерный размер  $l$  трубки полного напора, тем меньше  $k$ , что подтверждается описанным экспериментом.

Поступила 18 III 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Astarita G., Nicodemo L. Velocity Distributions and Normal Stresses in Viscoelastic Turbulent Pipe Flow. A.I.Ch.E. Journal, 1966, vol. 12, No. 3, pp. 478—484.
2. Smith K. A., Merrill E. W., Mickle y H. S., Virk P. S. Anomalous Pitot Tube and Hot—Film Measurements in Dilute Polymer Solutions. Chem. Engr. Sci., 1967, vol. 22, No. 4, pp. 619—626.
3. Metzner A. B., Astarita G. External Flows of Viscoelastic Materials: Fluid Property Restrictions on the Use of Velocity—Sensitive Probes. A.I.Ch.E. Journal, 1967, vol. 13, No. 3, May, pp. 550—555.
4. Jackley D. N. Drag—Reducing Fluids in a Free Turbulent jet. International Shipbuilding Progress, 1967, vol. 14, No. 152.
5. Savins J. G. A Pitot Tube Method for Measuring the First Normal Stress Difference and Its Influence on Laminar Velocity Profile Determinations. A.I.Ch.E. J., 1965, vol. 11, No. 4, pp. 673—677.
6. Ш а м б р э П. Л., Ш а ф С. А. Измерение давления. В сб.: «Физические измерения в газовой динамике и при горении», М., Изд-во иностр. лит., 1957.
7. R o s c o e R. On the Rheology of a Suspensions of Viscoelastic Spheres in a Viscous Liquid. J. Fluid Mech., 1967, vol. 28, pp. 2, 273—293.

#### ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА

*Г. И. Баренблатт, В. Н. Калашиников, А. М. Еудин*

(Москва)

Некоторые растворимые полимеры больших молекулярных весов резко снижают гидродинамическое сопротивление при добавлении их к текущей в турбулентном режиме жидкости [1,2]. Такое действие полимерных добавок, по мнению авторов, связано с возникновением в растворах крупных ассоциаций макромолекул полимера и молекул растворителя, ведущих себя по отношению к высокочастотным турбулентным пульсациям как достаточно жесткие частицы [3—5].

Частицы возникают в растворах по-разному: или путем набухания сухих частиц порошкообразного полимера, или же в результате разрыва сплошной сетки, образованной макромолекулами полимера после его растворения. Возникновение сетки происходит при растворении таких полимеров, как полиоксипропилен; не образует сплошную сетку при растворении гуаровая смола.

Наличие частиц в растворе приводит к экранировке трубок Пито, заключающейся в снижении показаний последних тогда, когда их диаметр сравним с диаметром частиц [5,6]. В литературе имеются данные об аномальных показаниях термоанемометра в полимерных растворах [6,7], в частности, о появлении дополнительных всплесков на кривой, полученной с выхода термоанемометра.

Проведенные эксперименты показали, что термоанемометр может быть с успехом применен как индикатор ассоциатов в слабых полимерных растворах. В экспериментах использовался термоанемометр постоянной температуры фирмы DISA Elektronik с нитяными и пленочными датчиками. Исследовались растворы полиоксипропилена с молекулярным весом  $4 \cdot 10^6$ . Датчик термоанемометра устанавливался в потенциальном ядре струи, истекающей из цилиндрического насадка диаметром 4 мм; исследуемая жидкость нагнеталась через насадок насосом термостата по прямолинейной трубе диаметром 10 мм длиной 150 диаметров. Жидкость циркулировала по замкнутому контуру, возвращаясь в термостат из емкости, в которую происходило истечение струи.