

введенный параметр k связан с β 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].

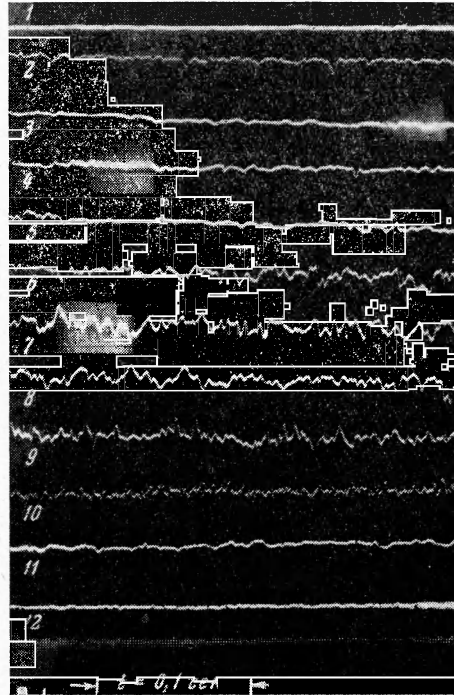
Частицы возникают в растворах по-разному: или путем набухания сухих частиц порошкообразного полимера, или же в результате разрыва сплошной сетки, образованной макромолекулами полимера после его растворения. Возникновение сетки происходит при растворении таких полимеров, как полиоксипропилен; не образует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

Эксперименты проводились при постоянной температуре, равной 20°C . Скорость истечения варьировалась от 0,17 до 2 м/сек и контролировалась по пьезометру, помещенному перед насадком. Выходной сигнал термоанемометра записывался на осциллографе Н102 с гальванометром Н135—06 (рабочая полоса частот 0—600 гц).

На фиг. 1 приведены осциллограммы выходного сигнала термоанемометра, полученные при скорости истечения из насадка 2 м/сек, что соответствует числу Рейнольдса в подводящей трубе, равному 3200. Осциллограмма 1 получена при истечении из насадка чистой воды. Добавление твердых частиц в поток (использовалась алюминиевая пудра) приводит к ударам о чувствительный элемент датчика, что зарегистрировано на осциллограмме 2. Следующие записи получены при течении раствора полиоксидилена весомой концентрацией $3 \cdot 10^{-5}$. Осциллограмма 3 получена через 30 сек после начала истечения. Эта кривая мало отличается от осциллограммы 1, поскольку раствор полиоксидилена в этот момент находится в эластичной фазе. Однако, в процессе течения сетка разрывается на отдельные ассоциаты, которые возмущают поле скорости вблизи чувствительного элемента датчика. Эти возмущения увеличиваются до некоторого момента времени, а затем уменьшаются, когда ассоциаты измельчаются. Рост возмущений наблюдается на осциллограммах 4, 5, 6, 7, 8, снятых через 2, 4, 6, 10, 16 мин после начала течения, соответственно. Затем возмущения уменьшаются, о чем свидетельствуют осциллограммы 9, 10, 11, снятые через 60, 180, 240 мин. На протяжении всего времени течения раствора наблюдается нарастание частоты флуктуаций. Возмущения практически отсутствуют на осциллограмме 12, снятой через 540 мин после начала течения. Приводим значения среднеквадратичных флуктуаций σ мв в различные моменты времени t мин.



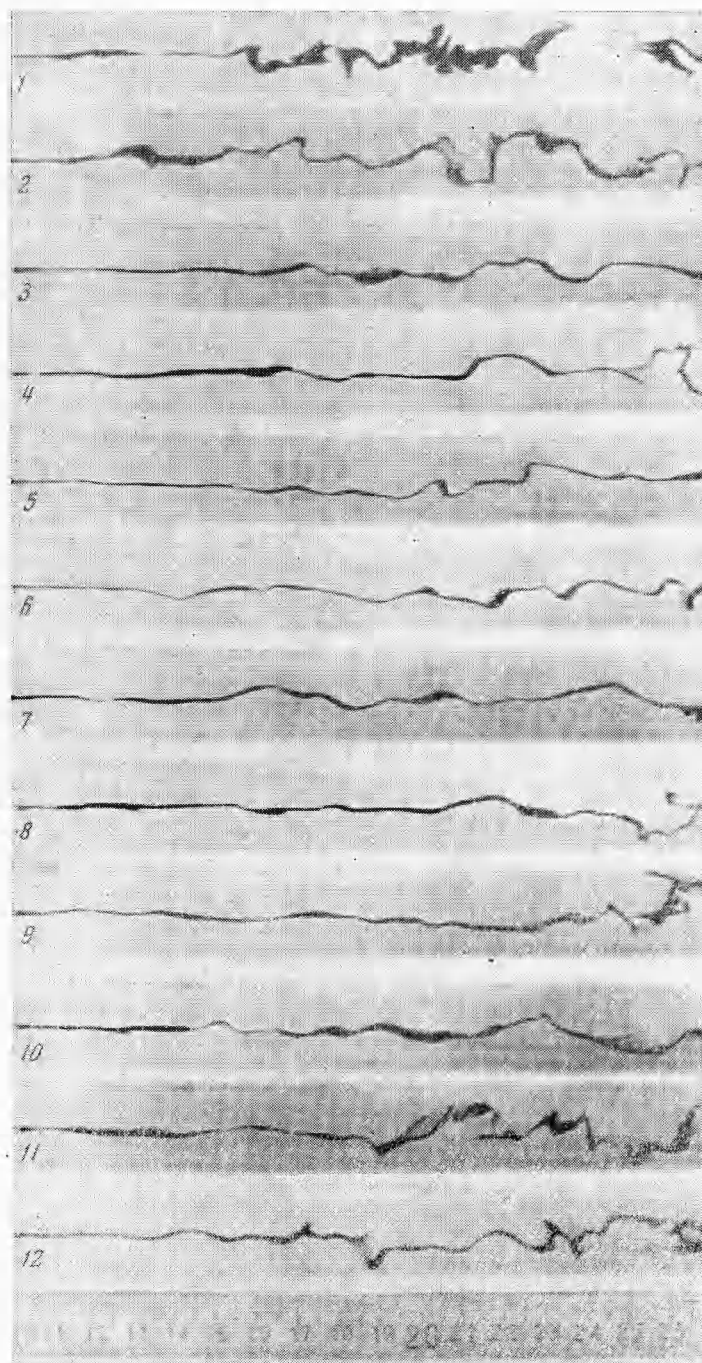
Фиг. 1

$t = 0.5$	2	4	6	10	16	60	180	240	540	Вода
$\sigma = 10$	13.5	19	21	28	30	20	14	13	11	9.8

Полученные данные хорошо коррелируются с данными об измельчении ассоциатов при деградации раствора, опубликованными в работе [5].

Ассоциаты, находящиеся в потоке, существенно по-разному проявляют себя в зависимости от режима течения раствора в трубе перед насадком. Представленные на фиг. 1 осциллограммы были получены при турбулентном режиме движения жидкости в подводящей трубе. Как только число Рейнольдса в этой трубе становилось меньше критического значения, флуктуации на осциллограммах почти полностью исчезали. Исчезновение флуктуаций можно было добиться установлением ламинарного режима течения в подводящей трубе как путем снижения скорости течения, так и переходом к трубе большего диаметра (использовалась труба диаметром 44 мм) при сохранении скорости истечения из насадка и диаметра насадка неизменными. Такое поведение ассоциатов может быть объяснено тем, что в ламинарном потоке и, следовательно, в ламинарном ядре струи ассоциаты, которые, по-видимому, представляют собой длинные гибкие нитеобразные структуры, двигаясь вдоль линий тока, обтекают датчик, практически не нарушая поле скорости вокруг него. Лишь случайные, по какой-либо причине неориентированные вдоль линий тока ассоциаты касаются чувствительного элемента, что фиксируется как отдельные всплески на осциллограмме.

При турбулентном течении в подводящей трубе и потенциальном ядре струи ориентация ассоциатов под воздействием турбулентных вихрей может быть самой произвольной, возможно образование клубков и беспорядочных сплетений ассоциатов. По этой причине, а также из-за поперечных пульсаций скорости, исключается плавное обтекание датчика ассоциатами. Они попадают на чувствительный элемент датчика и возмущают поле скорости около него, что и фиксируется термоанемометром.



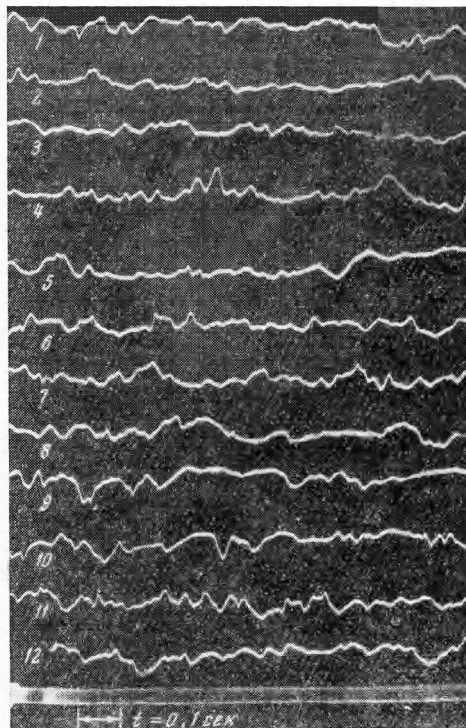
Фиг. 2

Показательным в этом смысле является следующее наблюдение: датчик, чувствительным элементом которого была платиновая нить диаметром 5 мк , в случае турбулентного течения по подводящей трубе выходил из строя не позднее, чем через $2-3 \text{ мин}$ работы. В то же время при ламинарном течении (скорость истечения из насадка в двух случаях оставалась постоянной; смена режима происходила за счет изменения диамет-

ра подводящей трубы) этот же датчик нормально работал больше 2 час. В случае турбулентного течения по подводящей трубе платиновая нить была вся покрыта студнеобразным налетом, доходившим по толщине до 1 мм. При ламинарном течении в подводящей трубе диаметр платиновой нити практически не изменялся, после 2 час работы он не превышал 6—7 мк. Тем не менее остаются возражения, не позволяющие однозначно толковать результаты проведенного эксперимента. Суть возражений состоит в том, что, быть может, фиксируемые флуктуации не связаны с присутствием ассоциатов в растворе, а являются обычными турбулентными пульсациями, разросшимися под действием добавленного полимера. Такое возможное толкование результатов, хотя оно и является маловероятным, поскольку полимерные добавки, уменьшающие сопротивление, снижают уровень турбулентности при течении по трубам [8], заставило провести дополнительные эксперименты. В этих экспериментах датчик термоанемометра был установлен в трубе, по которой происходило течение жидкости. В поток жидкости вводилась струйка краски. Интенсивность турбулентной диффузии краски сопоставлялась с показаниями термоанемометра.

Была использована стеклянная труба диаметром 23.5 мм и длиной в 56 диаметров. Так же как в предыдущем эксперименте, жидкость нагнеталась насосом термостата. Датчик термоанемометра устанавливался в конце трубы. Краска подавалась в поток на расстоянии 53 см от начала трубы. Все эксперименты были проведены при постоянной скорости течения по трубе, равной 16 см/сек, что соответствует приблизительно числу Рейнольдса $R = 3.5 \cdot 10^3$.

На фиг. 2 представлены фотографии перемешивания струйки краски в потоке воды (фото 1) и в растворе полиоксиэтилена концентрацией $3 \cdot 10^{-5}$ в различные моменты времени после начала его течения (фото 2—12). В таблице приведено время фотографирования (t , мин), средние значения выходного сигнала (v , ϕ) регистрируемые термоанемометром, и относительная интенсивность флуктуаций σ в процентах. Соответствующие осциллограммы выходных сигналов термоанемометра представлены на фиг. 3.



Фиг. 3

Вода		Раствор полиоксиэтилена концентрацией $3 \cdot 10^{-5}$										
t	—	2	4	6	8	10	15	20	30	60	90	120
v	8.8	8.4	8.6	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.8	8.8	8.7
σ	0.535	0.441	0.419	0.449	0.562	0.609	0.629	0.610	0.606	0.591	0.568	0.552

Как следует из приведенных данных, добавка полимера в поток воды приводит к уменьшению уровня турбулентной диффузии краски и, следовательно, уровня турбулентности. С другой стороны, термоанемометр при этом фиксирует увеличение уровня флуктуаций, что может быть однозначно связано с добавочными возмущениями поля скорости вблизи датчика ассоциатами. Минимальная диффузия подкрашенной струйки хорошо коррелируется с максимальным уровнем флуктуаций. В дальнейшем диффузия вновь увеличивается, а уровень флуктуаций уменьшается. Все это хорошо согласуется с предыдущим экспериментом и его объяснением.

Проведенные эксперименты подтверждают возможность использования термоанемометра для исследования структуры разбавленных растворов полимеров, и в частно-

сти для установления присутствия ассоциатов в них. Вместе с тем они указывают на определенные ограничения в использовании термоанемометра для измерения пульсаций скорости жидкости и спектра турбулентных пульсаций в потоках разбавленных полимерных растворов, содержащих крупные вязко-упругие ассоциаты. При обтекании датчика такими растворами возникают флуктуации выходного напряжения термоанемометра, вызванные, по-видимому, как возмущением скорости, так и флуктуациями теплопроводности при натекании ассоциатов на датчик. О некотором возможном отличии теплопроводности ассоциатов от теплопроводности окружающей жидкости можно судить по тому факту, что тарировочные кривые термоанемометра при течении эластичного раствора полиоксидилена менее круты, чем при течении воды. В процессе деградации раствора тарировочная кривая становится более крутой, постепенно приближаясь к тарировочной кривой на воде. Такое изменение тарировочных кривых с изменением состояния раствора также создает определенные трудности при использовании термоанемометра.

В заключение авторы приносят благодарность В. В. Тихомирову и Г. Г. Степанову за помощь в проведении экспериментов.

Поступила 22 IV 68

ЛИТЕРАТУРА

1. T o m s V. A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds number. Proc. Internat. Rheolog. Congress, Holland, 1948.
2. G a d d G.E. Turbulence damping and drag reduction produced by certain additives in water. Nature, 1965, vol. 206, No. 4983.
3. Б а р е н б л а т т Г. И., Б у л и н а И. Г., З е л ь д о в и ч Я. Б., К а л а ш н и к о в В. Н., Ш о л о м о в и ч Г. И. Об одном возможном механизме влияния малых добавок высокомолекулярных соединений на турбулентность. ПМТФ, 1965, № 5.
4. Б а р е н б л а т т Г. И., Б у л и н а И. Г., К а л а ш н и к о в В. Н., К а л и н и ч е н к о Н. М. О структуре слабых растворов полимеров, обнаруживающих эффект гашения турбулентности. ПМТФ, 1966, № 6.
5. Б а р е н б л а т т Г. И., К а л а ш н и к о в В. Н. О влиянии надмолекулярных образований в разбавленных растворах полимеров на турбулентность. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 3.
6. S m i t h K. A., M e r r i l E.W., M i c k l e y H. S., V i r k P. S. Anomalous Pitot tube and hot film measurements in dilute polymer solutions. Chem. Engng. Sci., 1967, vol. 22.
7. F a b u l a A. G., L u m l e y J. L., T a y l o r W. D. Some interpretations of Toms effect. Modern Developments in Mechanics of Continuum. N.— Y., Academic Press, 1966.
8. Б а р е н б л а т т Г. И., Б у л и н а И. Г., М я с н и к о в В. П., Ш о л о м о в и ч Г. И. О влиянии малых добавок растворимых высокомолекулярных соединений на режим движения жидкости. ПМТФ, 1965, № 4.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ ПО ДАННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН ВОЗМУЩЕНИЕМ СТАЦИОНАРНОГО ИХ СОСТОЯНИЯ

Р. И. Медведский

(Баку)

Как известно, в пористом пласте, фильтрация жидкости в котором определяется уравнением Дарси, забойные давления и расходы скважин связаны между собой линейными зависимостями

$$p_0 - p_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} q_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

Здесь p_0 — давление на контуре питания залежи, p_i и q_i — забойное давление и расход i -й скважины, n — число скважин на площади, a_{ij} — коэффициенты влияния. Зная их, можно определить суммарный отбор жидкости с площади, распределение текущих расходов нефтяных и нагнетательных скважин, полную извлечения нефти, добычу попутной воды, оптимальный процент обводнения и т. п.