

ОБ ОДНОМ ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ДОБАВОК  
ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ТУРБУЛЕНТНОСТЬГ. И. Баренблатт, И. Г. Булина, Я. Б. Зельдович,  
В. Н. Калашиников, Г. И. Шоломович

(Москва)

В многочисленных экспериментальных исследованиях установлен факт снижения сопротивления турбулентного потока воды при введении в поток малых добавок растворимых высокомолекулярных соединений [1-4]. В работах [5,6] непосредственным наблюдением за перемешиванием растворимых красок показано, что этот эффект связан с гашением турбулентных пульсаций, в особенности в высокочастотной области. Эти факты настоятельно требуют детального объяснения.

Ясно, что отдельные молекулы добавляемых соединений влиять на режим движения не могут — их количество мало, а размер ( $10^{-5}$  —  $10^{-4}$  см) ничтожно мал сравнительно с колмогоровским внутренним масштабом турбулентности.

По нашему мнению, механизм гашения пульсаций в общих чертах сводится к следующему. При попадании в поток длинных молекул высокомолекулярных соединений они захватывают в достаточно большом количестве молекулы воды, образуя своеобразную надмолекулярную структуру раствора. Получившиеся глобулы не малы, они имеют порядок величины, больший или равный внутреннему масштабу турбулентности потока жидкости без полимерных добавок, однако плотность их пренебрежимо мало отличается от плотности воды.

Образно говоря, можно представить себе эти глобулы как достаточно жесткие плавающие в жидкости отдельные образования равной с жидкостью плотности. Действие таких образований на вихри будет существенно различным в зависимости от масштаба вихря. Если вихрь имеет масштаб, много больший размера глобулы, то он переносит глобулу как целое, и она не оказывает на вихрь непосредственного влияния. Если же масштаб вихря сопоставим с размером глобулы, то такие вихри должны интенсивно гаситься на глобулах, что и создает избыточную диссипацию на высоких частотах, подавляющую высокочастотную часть спектра.

Для опытов, описанных в работе [5], оценка колмогоровского внутреннего масштаба турбулентности  $\lambda_0 = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4}$  дает ( $\nu \sim 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/сек,  $\varepsilon \sim 10^4$  —  $10^4$  см<sup>2</sup>/сек<sup>3</sup>)  $\lambda_0 = 10^{-3}$  —  $10^{-2}$  см. Стало быть, для существования описанного выше механизма гашения пульсаций необходимо, чтобы в полимерном растворе существовали надмолекулярные структуры с характерными масштабам того же или большего порядка.

Для обнаружения надмолекулярных образований в исследуемом полимерном растворе были проделаны опыты трех типов: на установке с капиллярными трубками, на установке с фильтрами и на вискозиметре Геплера с падающими шариками.

В качестве исследуемой среды был использован водный раствор натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы, которая дает наибольший эффект в опытах по снижению сопротивления. Концентрация раствора не превышала 0.4%. Для сравнения в экспериментах был применен водный раствор глицерина.

Установка с капиллярами и фильтрами представляла собой цилиндр высотой 0.5 м, в который заливался исследуемый раствор. В нижней съемной крышке находился штуцер, к которому накидной гайкой прижимались сменные лагунные диски с впаянными в них десятью стальными калиброванными капиллярами разных диаметров (0.02, 0.03, 0.05, 0.07 см).

Установка имела специальное приспособление для крепления фильтров вместо капилляров. В ходе экспериментов определялось время истечения жидкости. Вязкость полимерного раствора, определенная на капиллярном вискозиметре Оствальда (диаметр капилляра 0.08 см, длина капилляра 10 см) составляла  $2.8 \cdot 10^{-2}$  пз. Такую же вязкость, определенную на том же вискозиметре, имел раствор глицерина.

В результате экспериментов установлено, что на капиллярах диаметром больше 0.02 см скорости истечения глицерина и раствора карбоксиметилцеллюлозы сопоставимы. Из капилляра диаметром 0.02 см раствор карбоксиметилцеллюлозы совсем не вытекал, тогда как глицерин вытекал со скоростью 12 см/сек.

Такие же опыты были проделаны с фильтром с проницаемостью по воде, равной  $1.35 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>, т. е. со средним диаметром пор порядка  $10^{-2}$  см. Скорость истечения глицерина составляла 1.3 см/сек, раствор полимера практически не фильтровался вообще.

Вискозиметр Геплера представляет собой наклонную стеклянную трубку, заполненную исследуемой жидкостью. В верхней части трубки (диаметр 1.60 см) помещается шарик, диаметр которого несколько меньше внутреннего диаметра трубки. Вязкость известным способом определяется по времени падения шарика. Имеется набор шариков различного диаметра. Каждый из них предназначен для измерения вязкости в определенном диапазоне.

В табл. 1 приведены данные измерений времени падения шариков различных диаметров в водном растворе глицерина, вязкость которого по независимому измерению при помощи капиллярного вискозиметра составляла  $2.8 \cdot 10^{-2}$  пз.

В диапазоне 0.3—7.0 *снз* вязкость на вискозиметре следует определять при помощи

Таблица 1

Шарик	Диаметр, мм	Время падения, сек	Вязкость, $10^{-2}$ пз
1	15.80	224.0	2,80
2	15.63	30.6	3,06
3	15.15	4.1	4,17

Таблица 2

Шарик	Диаметр, мм	Время падения, сек	Вязкость, $10^{-2}$ пз
1	15.80	505.8	6.73
		487.3	6.48
		396.0	5.27
		343.2	4.56
2	15.63	24.6	2.62
		24.5	2.60
		24.5	2.60
3	15.15	3.8	4.15
		3.8	4.15
		3.8	4.15

шарика диаметром 1.58 см. В табл. 1 также приведена формально вычисленная (кажущаяся) вязкость по измерениям и с двумя другими шариками меньшего диаметра. Эти данные понадобятся для сравнения с кажущейся вязкостью раствора натриевой соли карбоксиметицеллюлозы.

Исследуемый полимерный раствор был приготовлен таким образом, чтобы его вязкость по измерению на капиллярном приборе совпадала с вязкостью раствора глицерина.

Измерения времен падения шарика в полимерном растворе сведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, кажущиеся вязкости полимерного раствора и раствора глицерина примерно совпадают для второго и третьего шариков (разности диаметров шариков и цилиндра соответственно 0.037 и 0.085 см). Однако определение вязкости полимерного раствора при помощи первого шарика (разность диаметров шарика и цилиндра 0.02 см) дает значение, существенно превышающее значение вязкости раствора глицерина.

Время падения первого шарика в полимерном растворе примерно в 2.5 раза больше, чем в растворе глицерина.

В табл. 2 приведены времена падения шариков (и соответствующие им кажущиеся вязкости), определенные для ряда последовательных падений, следующих одно за другим. Как видно, эти времена для первого шарика последовательно уменьшаются. На основе проделанных опытов трех различных типов можно сделать заключение, что в полимерном растворе, для которого обнаруживается эффект гашения турбулентности, отверстия размером порядка  $10^{-2}$  см становятся слабо или совсем непроницаемыми, что определенно свидетельствует о наличии в этом растворе структурных образований такого размера.

Следует отметить, что наличие достаточно крупных структурных образований в растворах полимеров вне связи с проблемой гашения турбулентности указывалось в работах П. А. Ребиндера и его школы [7], В. А. Каргина и его школы [8].

Авторы благодарят В. А. Городцова и В. П. Мясникова за обсуждение, Е. А. Мякотина — за помощь в конструировании установки, а также В. А. Авсеенко, С. Б. Герашенко, З. П. Титову и А. Г. Цыпкина — за участие в проведении экспериментов.

Поступила 26 VII 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shaver R. G., Merrill E. W., Turbulent flow of pseudoplastic polymer solutions in straight cylindrical tubes. Amer. Inst. Engnd Chem. J., 1959, vol. 5, No 2.
2. Savins I. G. Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow. Soc. Petrol. Engng J. 1964, vol. 4, No 3.
3. Metzner A. B., Graham P. M., Turbulent flow characteristics of viscoelastic fluids. Fluid Mech., 1964, vol. 20, No 2.
4. Баренблатт Г. И., Булина И. Г., Мясников В. П. Влияние растворов некоторых высокомолекулярных соединений на снижение сопротивления при обтекании тел турбулентным потоком. ПМТФ, 1965, № 3.
5. Баренблатт Г. И., Булина И. Г., Мясников В. П., Шоломович Г. И. О влиянии малых добавок растворимых высокомолекулярных соединений на режим движения жидкости. ПМТФ, 1965, № 4.
6. Gadd G. E. Turbulence damping and drag reduction produced by certain additives in water. Nature, 1965, vol. 206, No 4983.
7. Ребиндер П. А. Поверхностно-активные вещества, их значение и применение в нефтяной промышленности. Сб. «Применение поверхностно-активных веществ в нефтяной промышленности». Госоптехиздат, 1961.
8. Зубов П. И., Журкина З. Н., Каргин В. А. Строение студней. Докл. АН СССР, 1949, т. 67, № 4.