

УДК 534.641:517.4

## О ВЛИЯНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК НА ФЛЮКТУАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

*И. Ф. Кадыков, Л. М. Лямшев*

Приводятся результаты экспериментального изучения спектральных и корреляционных характеристик пристеночных флюктуаций давления при введении в пограничный слой полимерных добавок, снижающих сопротивление турбулентного трения. Измерения флюктуаций давления производились в тонком пограничном слое на поверхности тела вращения, помещенного в гидродинамическую трубу, при скорости водного потока 10 и 20 м/сек одновременно с измерениями коэффициента сопротивления тела. Использовались водные растворы высокомолекулярного полиоксиэтилена 0,1% и 0,01% концентрации. В процессе опытов расход раствора полимера оставался постоянным. Корреляционный анализ производился в третьоктавных полосах частот в диапазоне 150—3000 гц. Спектральный анализ выполнен в 10-процентной полосе, в области частот от 150 до 6000 гц. Установлено, что введение раствора полимера в пограничный слой приводит к уменьшению коэффициента корреляции и понижению низкочастотных и высокочастотных пристеночных флюктуаций давления.

Со времени открытия Томсом [1] явления снижения сопротивления турбулентного трения при течении жидкости с малыми добавками некоторых растворов полимеров вдоль гладкой поверхности опубликовано довольно большое количество работ. Значительная их часть посвящена изучению интегральных характеристик эффекта, например, зависимости снижения сопротивления от числа Рейнольдса, концентрации раствора полимера, типа полимера и т. п. Лишь в последние годы появились публикации с изложением результатов исследования влияния полимерных добавок на тонкую структуру течения жидкости и свойства турбулентности (см. например, [2—4]). Известный прогресс наблюдается и в изучении внутреннего механизма явления [5, 6]. Выяснилось также, что общепринятые в гидродинамике методики исследования структуры турбулентных течений, основанные на применении термоанемометров и трубок полного напора, приходится использовать для исследования течений растворов полимеров с большой осторожностью [6—8]. В этой связи представляет известный интерес применение миниатюрных акустических приемников для изучения характеристик флюктуаций давления в потоках растворов полимеров и, в частности, флюктуаций давления, действующих на поверхность тела, обтекаемого потоком жидкости с полимерными добавками. Некоторые результаты исследований спектральных и корреляционных характеристик пристеночных флюктуаций давления при введении полимерных добавок в пограничный слой излагаются ниже.

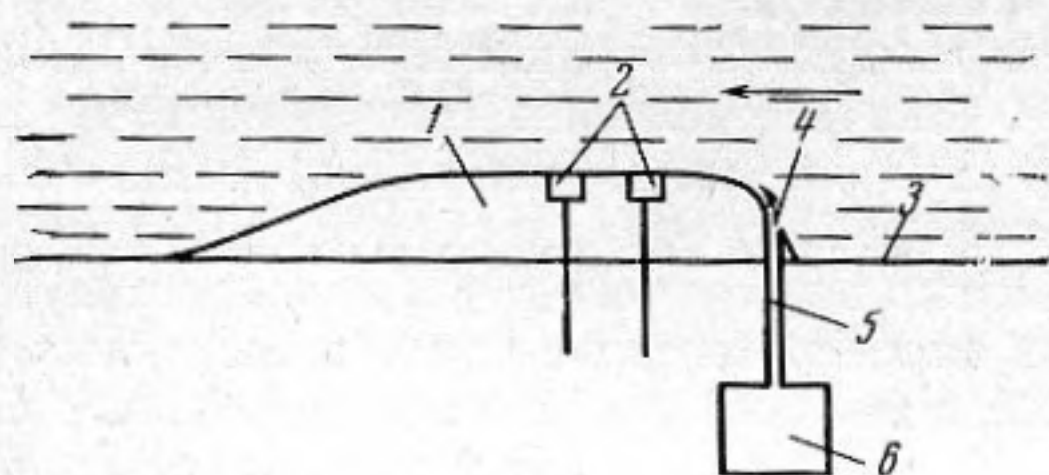
Измерения проводились в прямоугольной рабочей части гидродинамической трубы НИИ Механики МГУ. На столе весов гидротрубы жестко укреплялась модель (см. фиг. 1), представлявшая собой половину тела вращения с простой формой обводов (сфера — цилиндр — конус). На фиг. 1: 1 — полумодель, 2 — приемник флюктуаций давления, 3 — стенка трубы (стол), 4 — щель, 5 — трубка, 6 — резервуар с раствором полимера. Стол соединялся с автоматическими весовыми элементами и приборами, с помощью которых можно было осуществлять измерения коэффициента сопротивления модели.



Три одинаковых приемника давления с чувствительной поверхностью диаметром около 1,5 мм укреплялись заподлицо с поверхностью модели примерно в средней части модели в области развитого турбулентного пограничного слоя. Приемники располагались вдоль образующей цилиндрической поверхности модели (по потоку). Расстояния между приемниками были равны 4,2 и 16 мм. Устройство приемника схематически представлено на фиг. 2. Здесь 1 — пьезоэлемент, выполненный из пьезокерамики в виде трубки, опертой нижним концом на корпус приемника, 2, 3 — заглушка свободного торца пьезоэлемента, 4 — герметизирующее резиноподобное наполнение, 5 — кабель. Размер чувствительной поверхности датчика определяется диаметром трубки пьезоэлемента. Чувствительность приемников около 0,1 мкв/бар.

Электрические сигналы с приемников давления подавались на вход четырехканального магнитофона. Магнитная запись сигналов осуществлялась в диапазоне частот 0—3000 гц. Корреляционная обработка производилась при помощи коррелометра КЗ-ЗТ в звуковом диапазоне частот от 150 до 3000 гц, при этом к входу каждого из двух каналов коррелометра были подключены фильтры с одинаковыми частотными и фазовыми характеристиками. Корреляционный анализ осуществлялся в третьоктавной полосе.

Анализ спектра сигналов выполнялся в 10-процентной полосе при помощи ана-



Фиг. 1



Фиг. 2

лизатора спектра типа СЧ-7 в диапазоне частот 100—6000 гц непосредственно в процессе эксперимента таким образом, что сигнал с выхода приемника давления поступал на вход анализатора спектра.

Применялись водные растворы высокомолекулярного полиоксиэтилена (молекулярный вес  $\sim 7 \cdot 10^6$ ). Растворы приготавливались путем размешивания в водопроводной воде комнатной температуры необходимого количества полимерного материала. После достижения полного растворения полимера растворы необходимой концентрации заливались в расходный бак и выдавливались сжатым воздухом на поверхность тела.

В процессе опытов производились измерения пристеночных флюктуаций давления в пограничном слое и одновременно коэффициента сопротивления тела при введении в пограничный слой полимерных добавок.

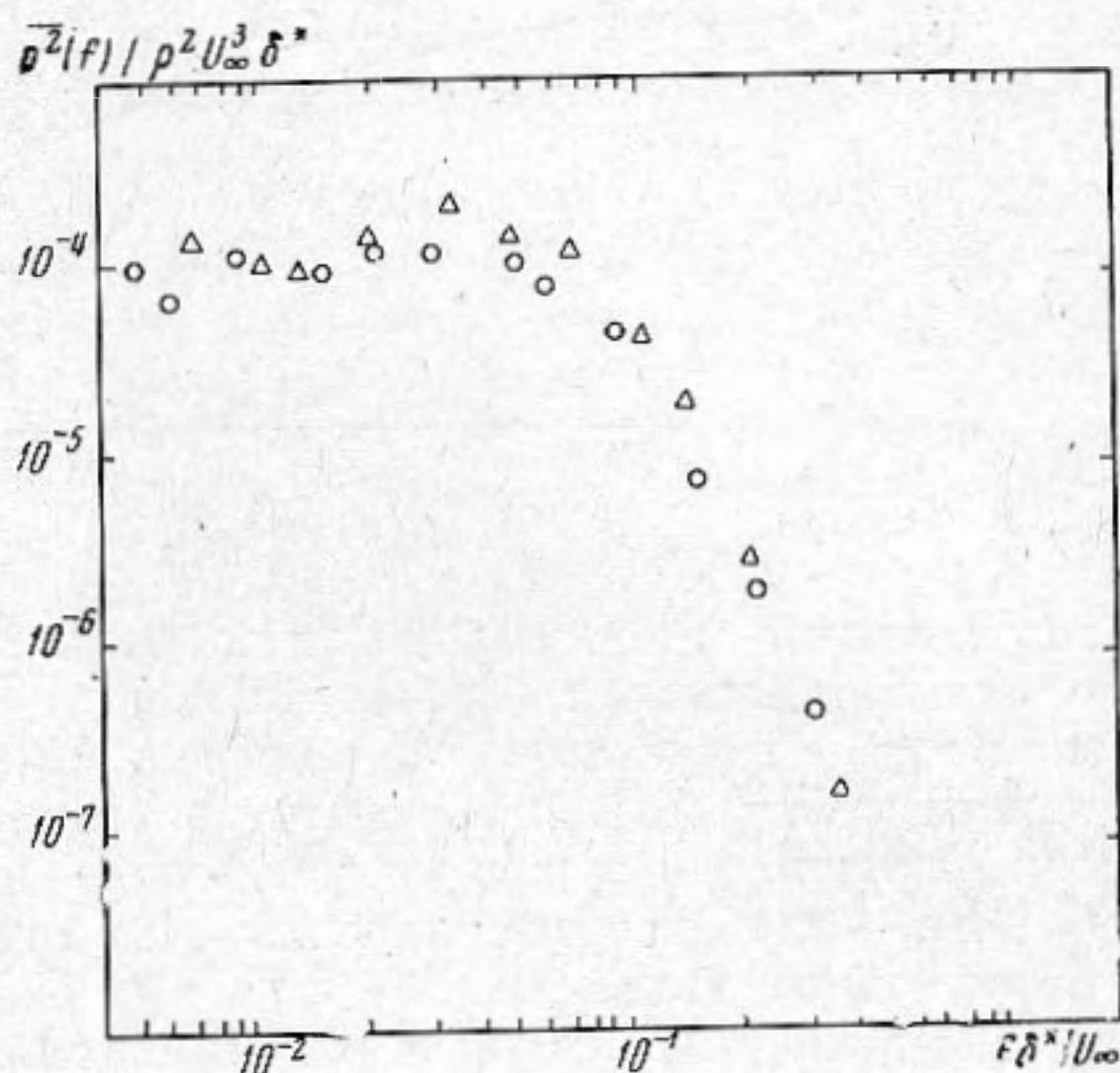
Были приняты во внимание и учтены факторы, оказывающие влияние на результаты измерений коэффициента сопротивления, когда измерения проводятся в условиях гидродинамической трубы: загроможденность потока моделью и слутной струей, наличие продольного градиента статического давления и т. п. Для учета этих факторов использовалась методика, принятая в экспериментах на гидродинамической трубе НИИ Механики МГУ.



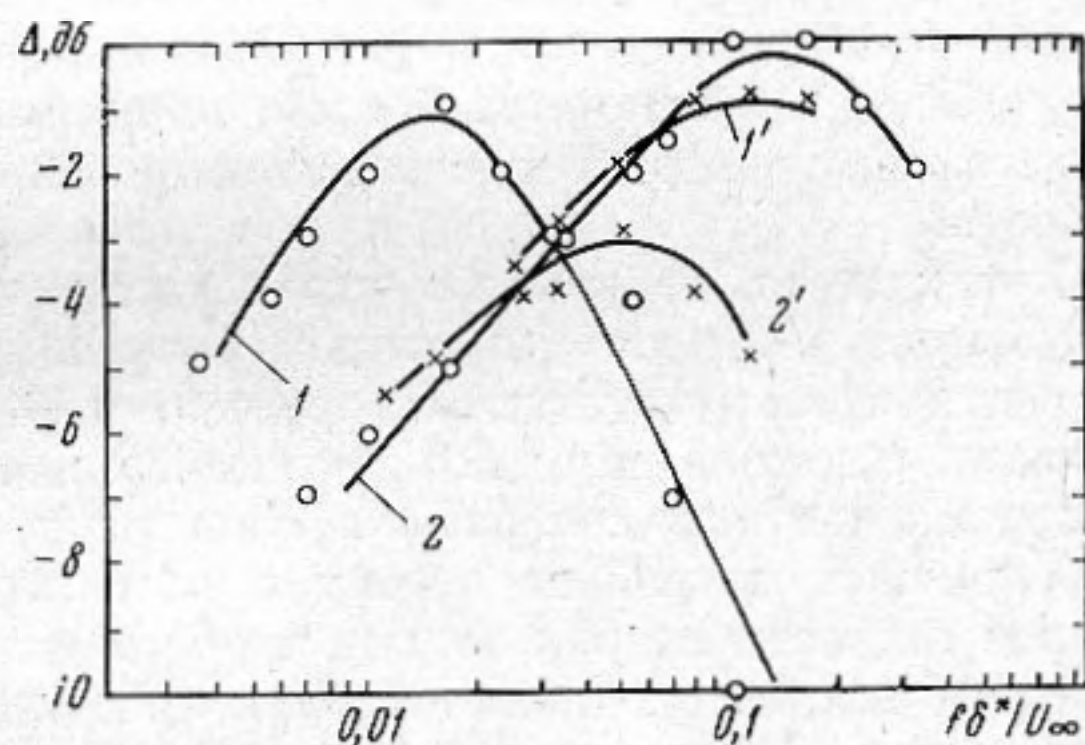
Учитывалось, что кроме флюктуаций давления в пограничном слое на приемник могут действовать вибрации и звук. Были проведены специальные контрольные опыты. Выяснилось, что в области нижней граничной частоты ( $< 100$  гц) существует значительная помеха вибрационного и звукового происхождения. В области высоких частот, когда длина так называемой гидродинамической волны  $\lambda_r$  ( $\lambda_r = \frac{U_c}{f}$ ,  $U_c$  — конвективная скорость и  $f$  — частота колебаний) мала по сравнению с диаметром чувствительной поверхности приемника, помехи звукового и вибрационного происхождения также начинают играть существенную роль. Для устранения влияния вибрационных и звуковых помех частотный диапазон измерений был ограничен со стороны низких и высоких частот так, что соотношение полезного сигнала и помехи составляло не менее 20 дб. При этом в области граничной верхней частоты размеры приемника всегда оставались в 2—3 раза меньше длины гидродинамической волны. Измерения проводились при двух фиксированных скоростях потока 10 и 20 м/сек. Ниже приводятся и обсуждаются некоторые характерные результаты измерений.

Нормированный спектр мощности пристеночных флюктуаций давления в отсутствие полимерных добавок показан на фиг. 3. По вертикальной оси отложены значения  $\overline{p^2} / \rho U_\infty^2 \delta^*$ , где  $\overline{p^2}$  — средний квадрат флюктуаций давления,  $\rho$  — плотность жидкости (воды),  $U_\infty$  — скорость водного потока в трубе,  $\delta^*$  — толщина вытеснения пограничного слоя. По горизонтальной оси отложены значения безразмерной частоты колебаний  $f \delta^* / U_\infty$ . Используются следующие обозначения: светлые кружочки соответствуют скорости потока  $U_\infty = 10$  м/сек, толщине вытеснения  $\delta^* = 0,7$  мм, треугольники —  $U_\infty = 20$  м/сек и  $\delta^* = 0,6$  мм. Значение  $\delta^*$  определялось расчетным путем. Полученные результаты хорошо совпадают с известными литературными данными, например, приведенными в работе [9].

Данные, характеризующие влияние полимерных добавок на спектр мощности флюктуаций давления, показаны на фиг. 4. По вертикальной оси отложена величина «спектральной надбавки» в децибелах, которая характеризует отклонение спектра при введении полимерных добавок от



Фиг. 3

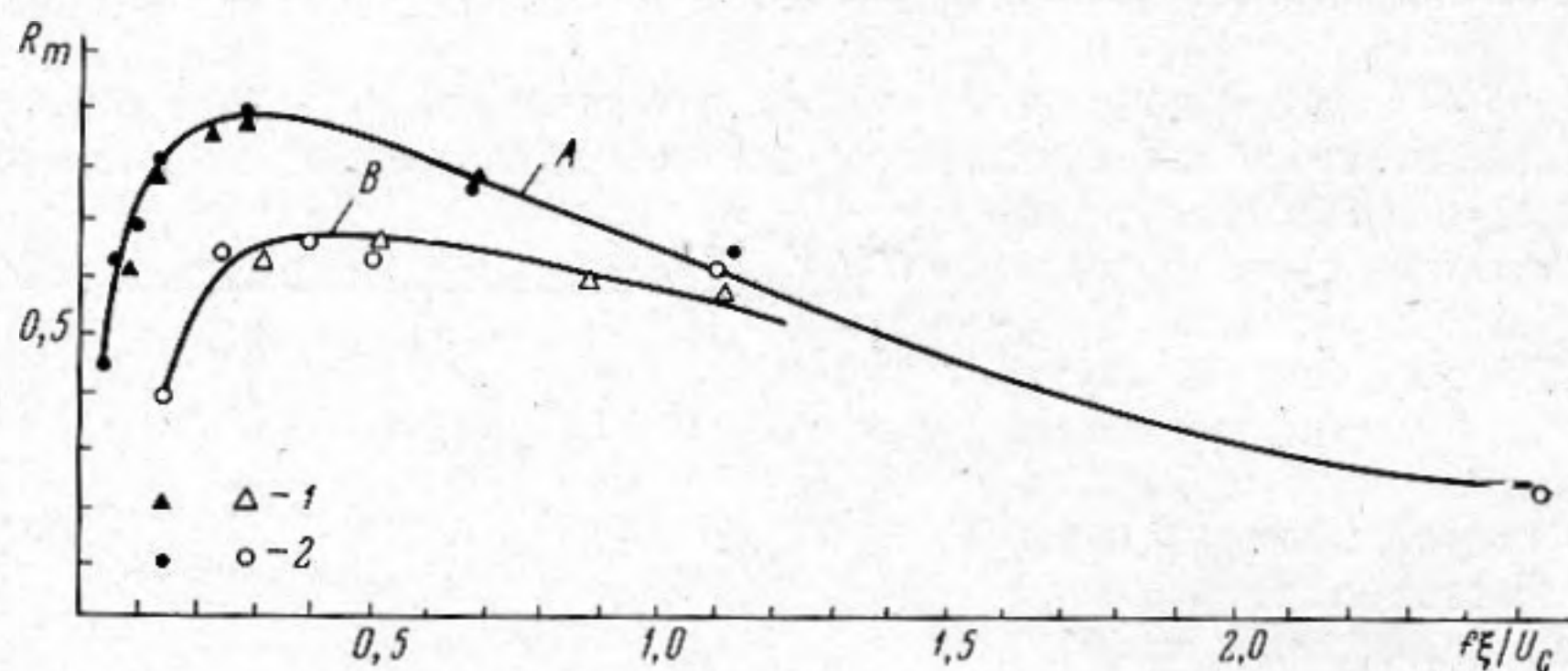


Фиг. 4



его стандартной величины, представленной на фиг. 3. Светлыми кружочками обозначены результаты, полученные при скорости потока  $U_\infty = 10$  м/сек, а крестиками — при скорости  $U_\infty = 20$  м/сек. Кривые 1 и 1' относятся к концентрации раствора  $\gamma = 10^{-3}$ , а 2, 2' — к  $\gamma = 10^{-4}$ .

Как видно из представленных результатов, наблюдается понижение низкочастотных и высокочастотных флюктуаций давления при введении



Фиг. 5

в пограничный слой полимерных добавок. Полезно заметить, что понижение низкочастотных и высокочастотных флюктуаций давления вблизи стенки трубы в пограничном слое водного раствора полимера отмечалось авторами работы [2]. Авторы этой работы производили измерения флюктуаций давления в турбулентном потоке при течении водного раствора 0,05% Na — карбоксилметилцеллюлозы в трубе.

Полученные выше результаты могут быть пояснены следующим образом. Известно [10], что величина пристеночных флюктуаций давления в высокочастотной части спектра определяется главным образом флюктуациями скорости и связана с взаимодействием типа турбулентность — турбулентность. В низкочастотной области спектра основной вклад обусловлен взаимодействием сдвиг — турбулентность. Понижение низкочастотных и высокочастотных флюктуаций давления при введении полимерных добавок в пограничный слой, по-видимому, обусловлено уменьшением высокочастотных флюктуаций скорости и изменением сдвига средней скорости.

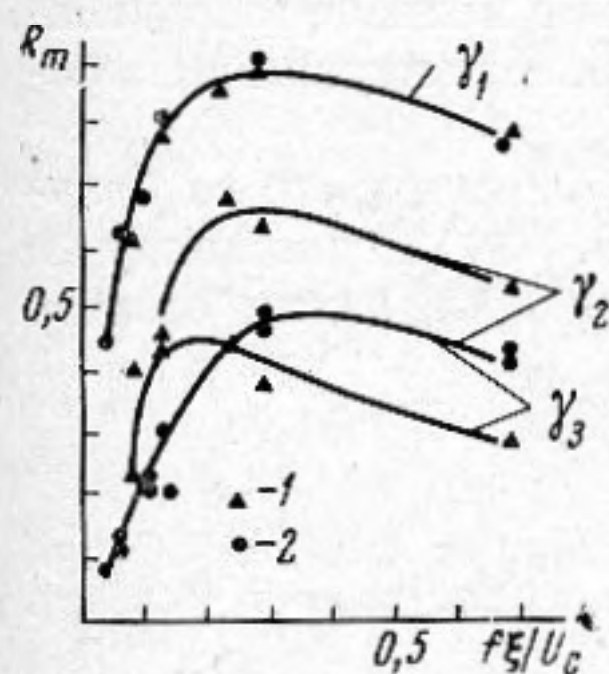
Остановимся теперь на результатах корреляционного анализа. На фиг. 5 приведены данные, характеризующие изменение максимума коэффициента пространственной корреляции  $R_m$  пристеночных флюктуаций давления в потоке воды без полимерных добавок, в зависимости от безразмерной частоты колебаний. Напомним, что  $U_c$  — скорость переноса турбулентных вихрей по потоку в пограничном слое. Точки 1 и 2 относятся к скорости потока воды в трубе, соответственно 10 и 20 м/сек. Параметром является отношение фиксированного расстояния  $\xi$  между приемниками к  $\delta^*$  толщине вытеснения пограничного слоя. Для кривой A значение параметра  $\xi/\delta^* = 6,5$ , а для кривой B  $\xi/\delta^* = 24,5$ . Зависимость коэффициента корреляции от величины параметра  $\xi/\delta^*$  отражает тот факт, что в низкочастотной области спектра пространственный масштаб корреляции пристеночных флюктуаций давления определяется толщиной пограничного слоя, а не длиной гидродинамической волны, как в высокочастотной области.

Результаты, представленные на фиг. 6, иллюстрируют влияние на величину коэффициента пространственной корреляции пристеночных флюктуаций давления полимерных добавок, вводимых в пограничный слой. Данные приведены для одного значения безразмерного параметра  $\xi/\delta^* = 6,5$ . Верхняя кривая относится к случаю, когда раствор полимера в пограничный слой не вводился. Эти данные уже приводились выше на

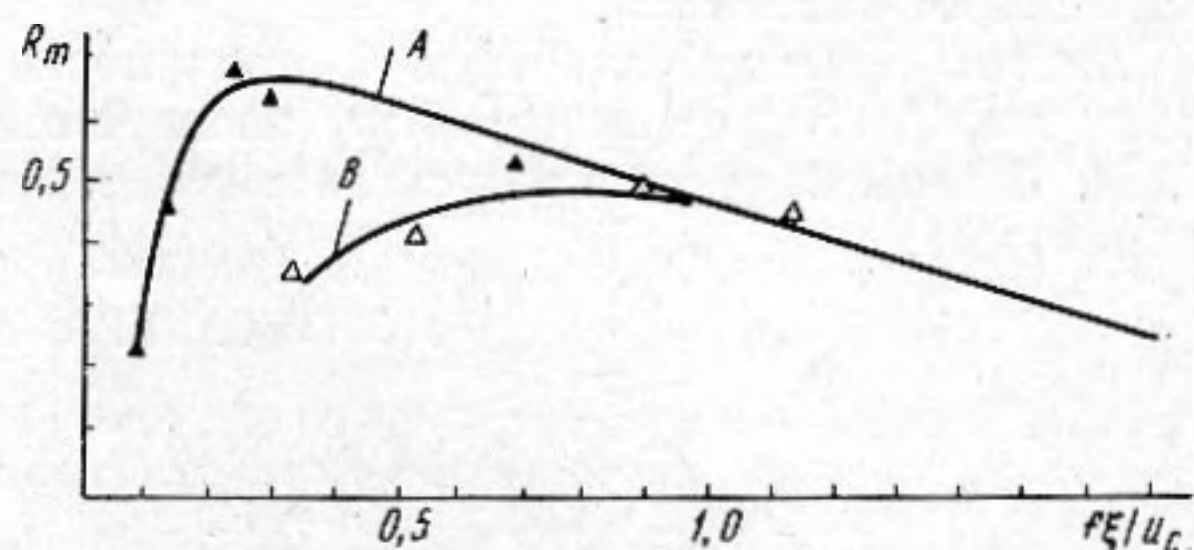


Фиг. 5. Обозначения 1, 2 относятся соответственно к скорости потока в трубе 10 и 20 м/сек.  $\gamma$  — означает концентрацию раствора полимера, причем  $\gamma_1 = 0$ ,  $\gamma_2 = 10^{-3}$ ,  $\gamma_3 = 10^{-4}$ . Как видно из приведенных данных, при введении полимерных добавок в пограничный слой корреляция флюктуаций давления в области низких частот уменьшается.

Отметим, что результаты спектральных и корреляционных измерений, представленных выше, удовлетворительно согласуются. Так например,



Фиг. 6



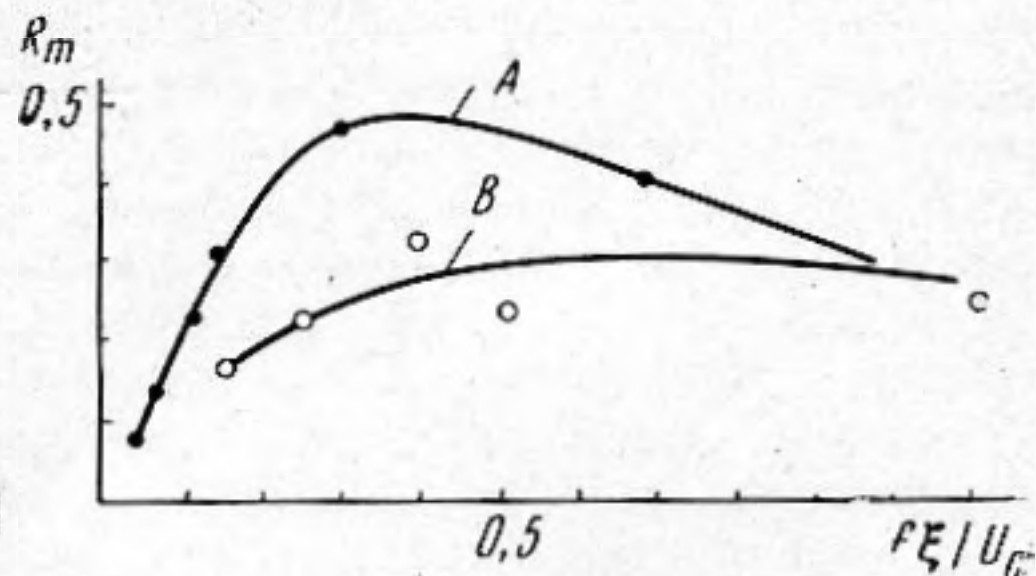
Фиг. 7

при скорости потока 20 м/сек увеличение концентрации полимера не приводит к дальнейшему уменьшению корреляции. Заметим, что из данных, показанных на фиг. 4 и относящихся к спектру мощностей флюктуаций, видно, что низкочастотная часть спектра для той же скорости потока при увеличении концентрации раствора полимера также не претерпевает заметных изменений.

Результаты измерений, представленные на фиг. 7 и 8, относятся к зависимости коэффициента корреляции от безразмерной частоты при введении полимерных добавок в пограничный слой для одного значения концентрации  $\gamma = 10^{-3}$  и скорости потока  $U_\infty = 10$  м/сек (фиг. 7), скорости потока  $U_\infty = 20$  м/сек (фиг. 8) и двух значений безразмерного параметра  $\xi/\delta^*$ . Обозначения A, B соответствуют  $\xi/\delta^* = 6,5$  и  $\xi/\delta^* = 24,5$ .

Сопоставляя данные, относящиеся к различным значениям параметра  $\xi/\delta^*$  можно видеть, что влияние полимерных добавок приводит как бы к уменьшению толщины вытеснения пограничного слоя.

Как отмечалось выше, одновременно с флюктуациями давления производились измерения коэффициента сопротивления. Эти измерения были выполнены совместно с Н. М. Калиниченко. Полученные результаты находятся в соответствии с данными измерений спектральных и корреляционных характеристик пристеночных флюктуаций давления. Установлено, что для малых концентраций и расходов раствора полимерных добавок, вводимых в пограничный слой, эффект снижения сопротивления не зависит от скорости потока в пределах изменений скорости потока от 10 до 20 м/сек.



Фиг. 8

С увеличением концентрации и расхода раствора полимера, вводимого в пограничный слой, эффект снижения сопротивления возрастает и оказывается тем больше, чем больше скорость потока. Важно заметить, что это происходит даже в том случае, когда низкочастотная часть спектра пристеночных флюктуаций давления уже мало изменяется с увеличением



скорости потока, в то время как в высокочастотной части спектра все еще наблюдается заметное снижение энергии флюктуации давления. Как отмечалось выше, высокочастотная часть спектра флюктуаций давления обусловлена в основном взаимодействием типа турбулентность — турбулентность. Следовательно, происходит уменьшение высокочастотных флюктуаций скорости в пограничном слое. Этот факт находится в соответствии с известными соображениями о том, что эффект снижения сопротивления обусловлен главным образом воздействием полимерных добавок на высокочастотную часть спектра турбулентных флюктуаций скорости в пограничном слое.

Авторы приносят глубокую благодарность Н. М. Калиниченко за большую помощь при проведении экспериментов, В. Ф. Шуппанову и Г. И. Шоломовичу за предоставленную возможность проведения опытов и внимание.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. B. A. Toms. Some observation on the flow of linear polymer solution through straight tubes at large Reynolds numbers. Proc. I st Intern. Congress on Reology. North Holland Pub. Co. 1948, II, 135—141.
2. C. S. Wells, J. Harkness, W. A. Meyer. Turbulence measurements in pipe flow of a drag-reducing non-newtonian fluid. AIAA J., 1968, 6, 2, 250—255.
3. B. Johnson, R. Barchi. The effect of drag-reducing additives on boundary layer turbulence. AIAA 3 rd Propulsion Joint Specialist Conference. 1967, № 67—459.
4. F. White. An analysis of the effect of polymer additives on boundary layer noise. AIAA 4 th Propulsion Joint Specialist Conference. 1968, № 68—642.
5. Г. И. Баренблатт, И. Г. Булина, В. Н. Калашников, Н. М. Калиниченко. О структуре слабых растворов полимеров, обнаруживающих эффект гашения турбулентности. Пр. мат. и техн. физ., 1966, 6, 108—110.
6. Г. И. Баренблатт, В. Н. Калашников. О влиянии надмолекулярных образований в разбавленных растворах полимера на турбулентность. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, 3, 351—354.
7. K. A. Smith, E. W. Merrill, H. S. Mickly, P. S. Virk. Anomalous pitot tube and hot-film measurements in dilute polymer solutions. Chem. Engn. Sci., 1967, 22, 4, 619—625.
8. Ю. Н. Алексеев, И. Д. Желтухин. Влияние полимерных добавок на показания трубки полного напора, Пр. мат. и техн. физ., 1968, 5, 115—118.
9. W. W. Willmarth, C. E. Wooldridge. Measurements of the fluctuating pressure at the wall beneath a thick turbulent boundary layer. J. Fluid Mech., 1962, 14, 187—194.
10. R. H. Kraichnan. Pressure fluctuations in turbulent flow over a flat plate. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 3, 378—384.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступила в редакцию  
2 ноября 1969 г.