

УДК 534.641:517.4

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ШУМЫ И ЭФФЕКТ ТОМСА

*Е. М. Грешилов, А. В. Евтушенко, Л. М. Лямшев*

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния малых полимерных добавок на величину гидродинамического сопротивления трения, спектральные и корреляционные характеристики пристеночных флуктуаций давления при течении водного раствора полиэтиленоксида в канале с гладкими и шероховатыми стенками. Опыты выполнены на специальной лабораторной гидродинамической установке.

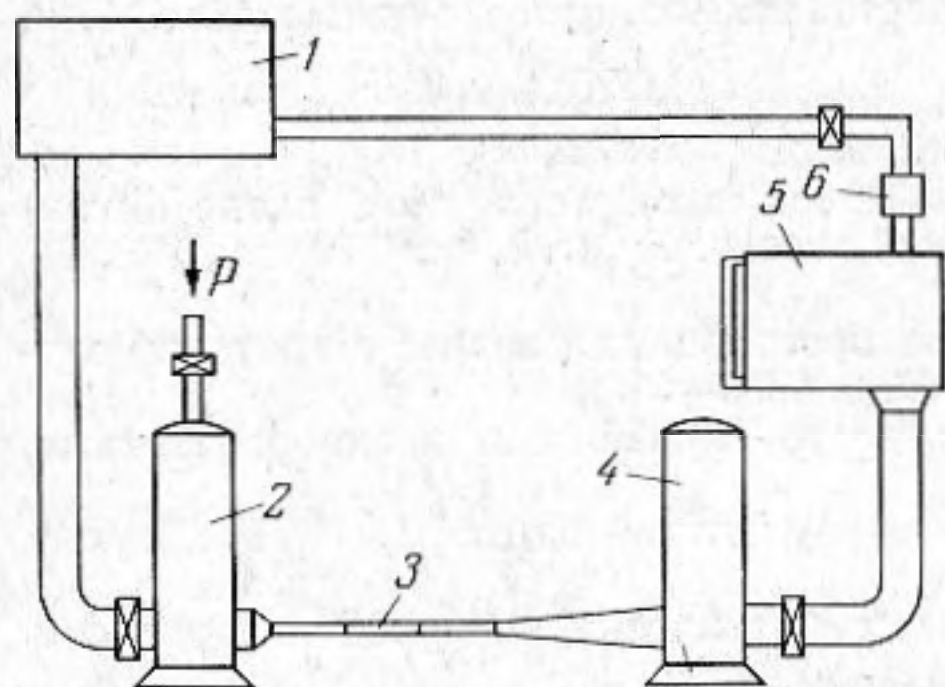
Развитие современной гидродинамики характеризуется поиском эффективных методов управления течением жидкости с целью уменьшения гидродинамического сопротивления. Один из способов управления, привлекающий пристальное внимание исследователей в последнее десятилетие, базируется на эффекте снижения сопротивления трения под влиянием малых полимерных добавок, вводимых в поток (эффект Томса). Несмотря на то, что этот эффект был обнаружен более 20 лет назад, до сих пор нет его однозначного объяснения [1, 2].

В этой связи важное значение могут иметь результаты исследования влияния полимерных добавок на точную структуру турбулентного течения, в частности на флуктуации давления. Известный интерес представляет также выяснение возможности снижения интенсивности гидродинамического шума путем введения в турбулентный пограничный слой малых полимерных добавок [3-5].

Авторами были выполнены комплексные акустико-гидродинамические исследования. Изучалось влияние полимерных добавок на величину сопротивления трения и свойства пристеночных флуктуаций давления: на интегральные, спектральные и корреляционные характеристики флуктуаций давления.

Корректные акустико-гидродинамические исследования возможны лишь на специальных гидродинамических установках. Необходимо обеспечить течение жидкости в условиях гидравлически гладких обтекаемых границ, свести к минимуму возможные помехи вибрационной и звуковой природы, а также избежать деградации растворов полимеров. Этим требованиям удовлетворяет гидродинамическая установка, схематическое изображение которой приведено на фиг. 1.

Можно выделить следующие основные элементы установки: напорный бак 1, успокоительные и звукоизолирующие емкости 2, 4, рабочий участок канала 3, приемный бак 5 и насос 6. Имеются два режима работы установки. В режиме свободного истечения исследуемая жидкость из напорного



Фиг. 1. Схема гидродинамической установки

бака 1, поднятого на высоту 12 м, поступает в приемный бак 5. При этом в рабочем сечении канала может поддерживаться скорость течения жидкости до 10 м/сек (в течение 10 мин). Из приемного бака в верхний — жидкость может подаваться насосом 6. В импульсном режиме работы установки жидкость под действием внешнего давления вытесняется из емкости 2 и поступает в приемный бак 5. В этом случае могут достигаться скорости до 15 м/сек, а время истечения составляет около 30 сек. После завершения рабочего цикла жидкость под действием силы тяжести возвращается из бака 5 в емкость 2.

Размер шероховатости $d$ , см	$u_{ср}$ , см/сек	Эффект снижения сопротивления, %	$V \sqrt{\bar{p}^2} / \tau_w$		$V \sqrt{\bar{p}^2} / \rho u_0^2$	
			вода	ПЭО	вода	ПЭО
0	510	70	1,49	3,48	4,6	3,1
	710		1,31	2,64	4,0	2,1
	930		1,39	2,97	4,4	2,8
$5 \cdot 10^{-3}$	510	80	1,42	4,05	6,3	3,6
	710		1,36	3,94	8,1	3,2
	930		1,33	3,64	6,0	3,5
$1,5 \cdot 10^{-2}$	510	82	1,22	5,27	6,7	4,1
	710		1,14	2,88	6,1	2,7
	930		0,73	2,80	4,3	3,2
$4 \cdot 10^{-2}$	510	70	1,48	3,65	12,3	7,7
	710		1,59	2,92	12,8	6,4
	930		1,63	2,74	14,2	7,1

Установка обеспечивает проведение измерений флуктуаций давления в условиях минимальных помех, поскольку работа каких-либо механизмов (насоса и других устройств) в процессе истечения жидкости исключается.

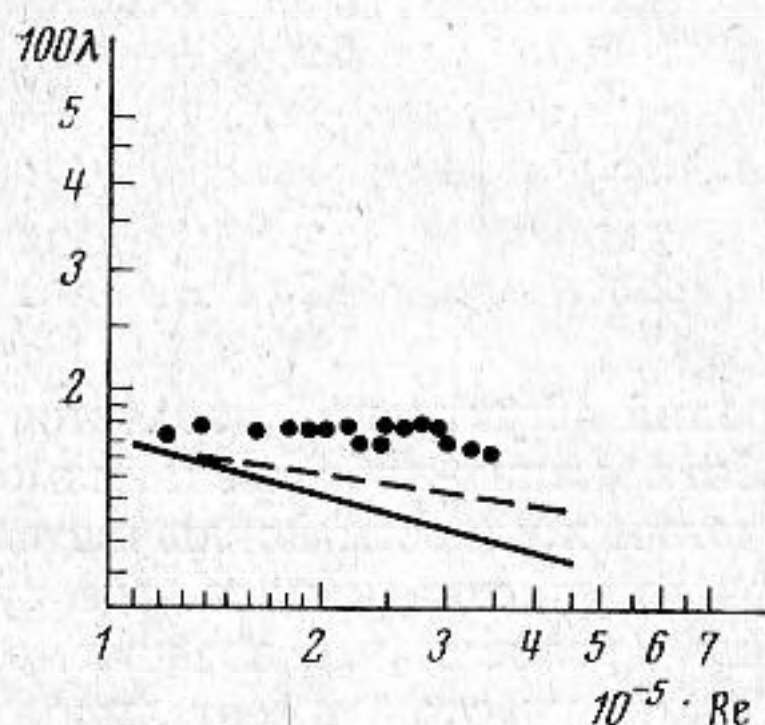
Все измерения проводились в конце рабочего участка канала, где существовало полностью установившееся течение (условия так называемой внутренней гидродинамической задачи). Рабочий участок имеет прямоугольное сечение, его длина составляет  $3 \cdot 10^2$  см. Высота канала в рабочей части равна 2 см, ширина — 7 см. Измерения пристеночных пульсаций давления осуществлялись в полосе частот 20 — 20 000 гц при помощи системы миниатюрных приемников из пьезокерамики с диаметром чувствительной поверхности около  $1,5 \cdot 10^{-1}$  см. Приемники устанавливались заподлицо с широкой стенкой канала. Устройство приемников практически не отличалось от конструкции, описанной в работе [6]. Корреляционный анализ осуществлялся в диапазоне 80—5000 гц в треть-октавных полосах частот. Одновременно с регистрацией флуктуаций давления проводились гидродинамические измерения; фиксировался перепад давления в рабочем участке канала в месте расположения приемников, определялась средняя скорость течения по расходу жидкости через рабочее сечение канала. По этим данным рассчитывались величина касательного напряжения  $\tau_w$  и коэффициент сопротивления  $\lambda$ .

Исследовалось влияние распределенной шероховатости песочного типа и регулярной шероховатости на акустико-гидродинамические явления. Распределенная шероховатость песочного типа создавалась плотным расположением песчинок с максимально возможной степенью монодисперсности. Известно, что дисперсия шероховатостей может оказывать существенное влияние на интегральные характеристики течения, например величину коэффициента сопротивления [7]. Еще более существенно дисперсия шероховатостей, как оказалось, может влиять на спектр пристеночных флуктуаций давления, особенно в высокочастотной области.

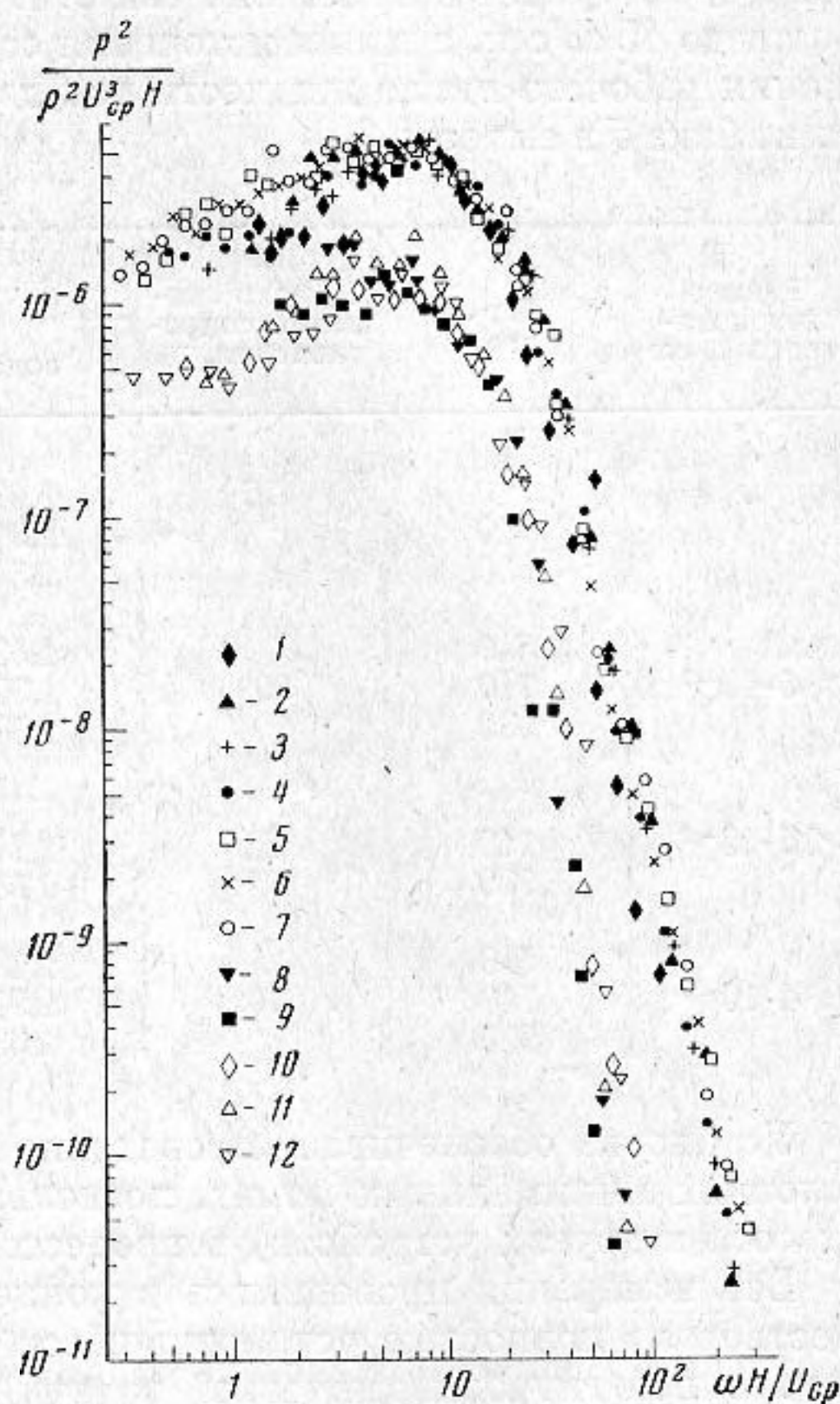
Средний диаметр  $d$  песчинок составлял  $5 \cdot 10^{-3}$ ;  $1,5 \cdot 10^{-2}$  и  $4 \cdot 10^{-2}$  см. В условиях проводимых экспериментов эквивалентная толщина пограничного слоя  $\delta$  составляла 1 см, а шероховатости имели относительную высоту  $d/\delta$ , равную соответственно  $5 \cdot 10^{-3}$ ;  $1,5 \cdot 10^{-2}$ ;  $4 \cdot 10^{-2}$ . Шероховатость наносилась на верхнюю и нижнюю стенки канала вдоль всей рабочей части, включая мембраны приемников.

Регулярная шероховатость создавалась периодически расположенными стерженьками диаметром  $2 \cdot 10^{-3}$  см, которые устанавливались на различных расстояниях  $l$  друг от друга. Были рассмотрены два предельных случая  $d/l=1$  и  $d/l=10$ , для которых, как известно, характер вихреобразования качественно различен [8].

Опыты проводились с



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления  $\lambda$  от числа  $Re$

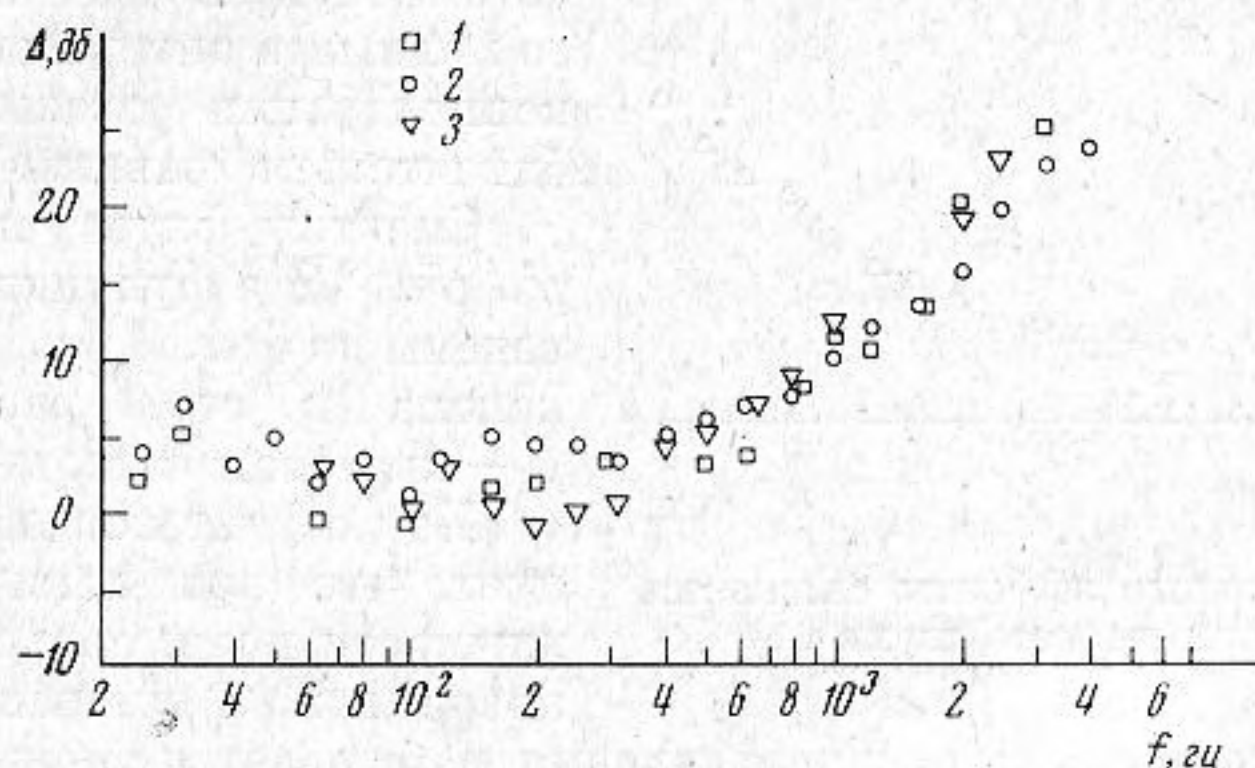
Фиг. 3. Спектры пристеночных флуктуаций давления при течении воды и раствора полиэтиленоксида с концентрацией  $5 \cdot 10^{-5}$  над гладкой поверхностью. Данные 1–7 получены для воды при скорости потока  $u_{ср}$ , равной 2,3; 3,9; 5,1; 6,5; 8,2; 9,3 и 10,5 м/сек соответственно. Данные 8–12 получены для раствора полиэтиленоксида при скорости  $u_{ср}$ , равной 3,9; 5,1; 7,1; 9,3 и 10,5 м/сек

полимером полиэтиленоксид WSR-701. Основные эксперименты осуществлялись в условиях течения однородного свежеприготовленного водного раствора полимера в условиях однократного течения раствора, а некоторые опыты выполнены при подаче концентрированных растворов полимеров через щель, установленную в начале рабочего участка канала. Ниже приводятся некоторые характерные результаты экспериментов и их обсуждение.

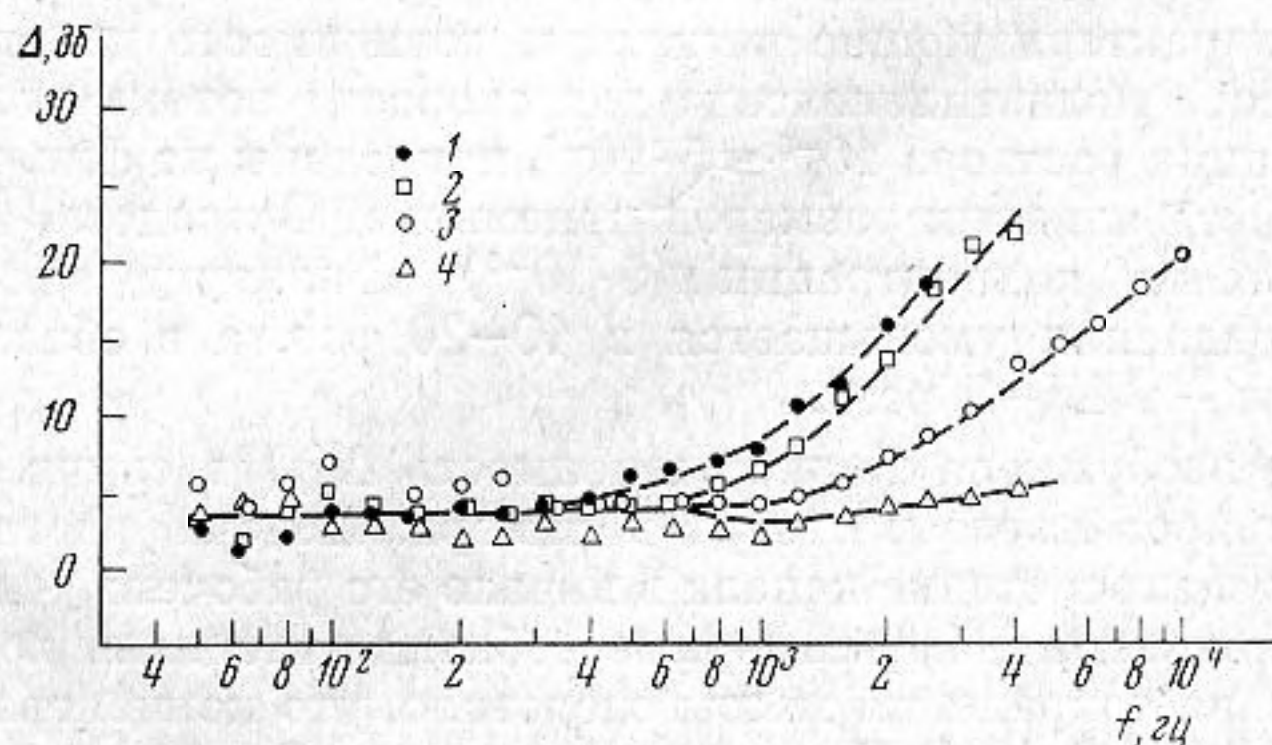
Зависимость коэффициента сопротивления  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $Re$ , составленного по эквивалентному гидродинамическому диаметру, приведена на фиг. 2. Здесь же приведены данные, вычисленные по формуле Блазиуса  $\lambda = 0,31 \cdot Re^{-0,25}$  (сплошная кривая) и по формуле Никурадзе  $\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237}$  (пунктирная кривая). Как известно, формула Никурадзе предпочтительнее при числах Рейнольдса  $Re > 10^5$ . Можно видеть, что экспериментальные значения  $\lambda$  несколько превосходят теоретические,

вычисленные по формуле Никурадзе, что можно объяснить наличием начальной шероховатости стенок канала.

Данные, характеризующие изменения средней квадратичной величины флуктуаций давления  $\sqrt{\bar{p}^2}$  в зависимости от интегральных характеристик потока приведены в таблице. Значения  $\sqrt{\bar{p}^2}$  указаны без учета корректи-



Фиг. 4. Снижение спектральных уровней флуктуаций давления при течении однородного раствора полимера или при щелевой подаче. 1 — щелевая подача, 2 — однородный раствор с концентрацией  $1 \cdot 10^{-5}$ , 3 — однородный раствор с концентрацией  $5 \cdot 10^{-5}$



Фиг. 5. Снижение спектральных уровней флуктуаций давления в зависимости от скорости потока. Данные 1—4 получены при  $u_{ср}$ , равном соответственно 5,1; 7,1, 9,3 и 14,0 м/сек

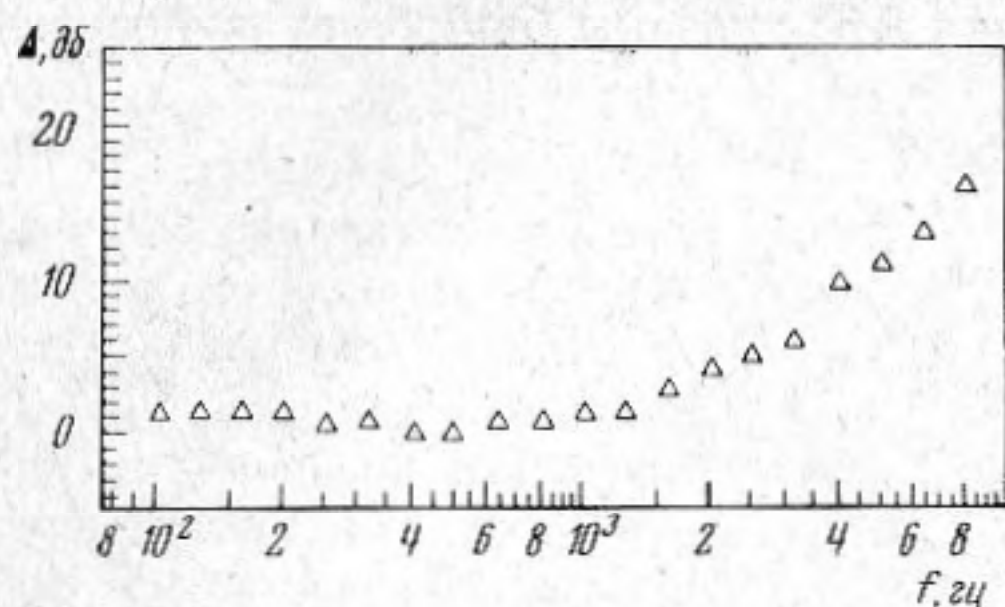
рующих поправок на размеры приемника. Как можно видеть из данных в таблице, при течении растворителя вдоль гладких стенок выполняются соотношения  $\sqrt{\bar{p}^2} \approx 1,5 \tau_w$  и  $\sqrt{\bar{p}^2} = 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{2} \rho u_0^2$ , (где  $u_0$  — скорость на оси канала), что согласуется с литературными данными.

Здесь же приведены данные, характеризующие влияние полимерных добавок с концентрацией  $5 \cdot 10^{-5}$  на величину сопротивления трения при изменении числа Рейнольдса в пределах  $1,5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 4 \cdot 10^5$ . Можно видеть, что во всем диапазоне изменения числа Рейнольдса эффект снижения сопротивления составлял 70—80%, что хорошо согласуется с аналогичными опубликованными данными. Что касается средней квадратичной величины флуктуаций давления  $\sqrt{\bar{p}^2}$ , то она уменьшилась примерно на 50%.

Данные, приведенные в таблице, характеризуют также связь величины  $\sqrt{\bar{p}^2}$  с величиной касательного напряжения на стенке и динамическим напором  $\frac{1}{2} \rho u_0^2$ . Можно видеть, что при наличии полимерных добавок вы-

полняется соотношение  $\sqrt{\bar{p}^2} \approx 3\tau_w$ . Качественно близкий результат получен в работе [9].

Уменьшение величины  $\sqrt{\bar{p}^2}$  (также как и эффект снижения сопротивления) зависит от концентрации раствора полимера, при этом существует



Фиг. 6. Спектральные эффекты снижения гидродинамического шума

некоторое оптимальное значение концентрации. Для исследованного полимера оптимальное значение концентрации оказывается приблизительно равным  $(2 \div 5) \cdot 10^{-5}$ .

Спектры флуктуаций давления  $p^2 / \rho^2 u_{cp}^3 H$  в функции  $\omega H / u_{cp}$  приведены на фиг. 3. Здесь  $H$  — высота канала в его рабочей части,  $\omega$  — круговая частота.

Из результатов измерений следует, что при наличии в потоке жидкости полимерных добавок одновременно с уменьшением вели-

чины гидродинамического сопротивления наблюдается понижение спектральных уровней пристеночных флуктуаций давления, особенно значительное в высокочастотной области.

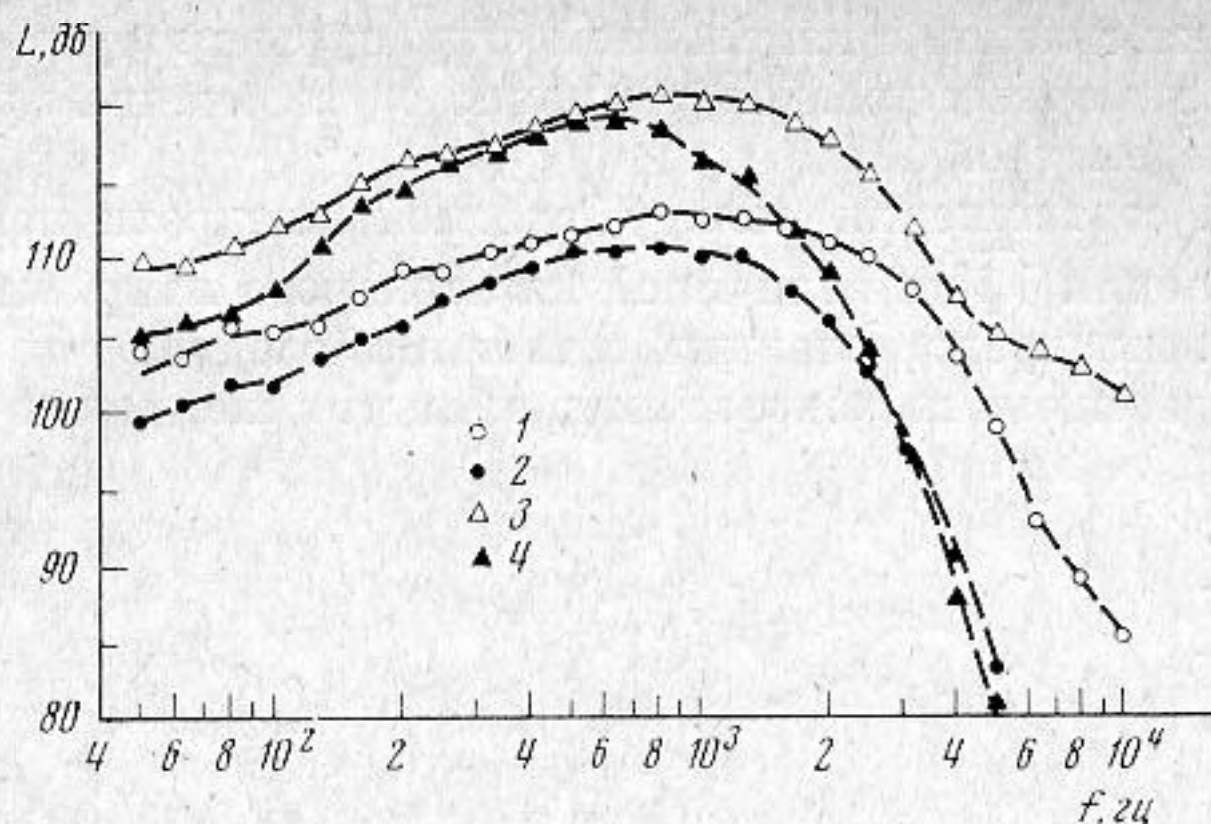
Влияние полимерных добавок на спектры флуктуаций давления оценивалось по разности  $\Delta(f)$  спектральных уровней флуктуаций давления, измеренных при течении чистой воды и при течении раствора полимера. Результаты, характеризующие частотную зависимость для течения однородного раствора полиэтиленоксида для скорости потока около 5 м/сек и при концентрации раствора  $10^{-5}$  и  $5 \cdot 10^{-5}$ , приведены на фиг. 4. Данные показаны без учета влияния размеров приемника. Оказалось, что при оптимальном значении концентрации ( $5 \cdot 10^{-5}$ ) амплитуда высокочастотных флуктуаций давления уменьшается в 10–20 раз, а в области низких и средних частот — в 1,5–2 раза.

На фиг. 4 изображена также зависимость  $\Delta(f)$  в случае щелевой подачи концентрированного раствора полимера. Подача раствора осуществлялась через щель в стенке канала в начале его рабочего участка. В месте расположения приемника полимерные добавки заполняли все сечение канала; из условия сохранения массы следовало, что концентрация раствора здесь составляла  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ . Приведенные результаты показывают, что характер воздействия полимерных добавок на турбулентность в рассматриваемом случае не зависит от способа подачи полимера и определяется его локальной концентрацией.

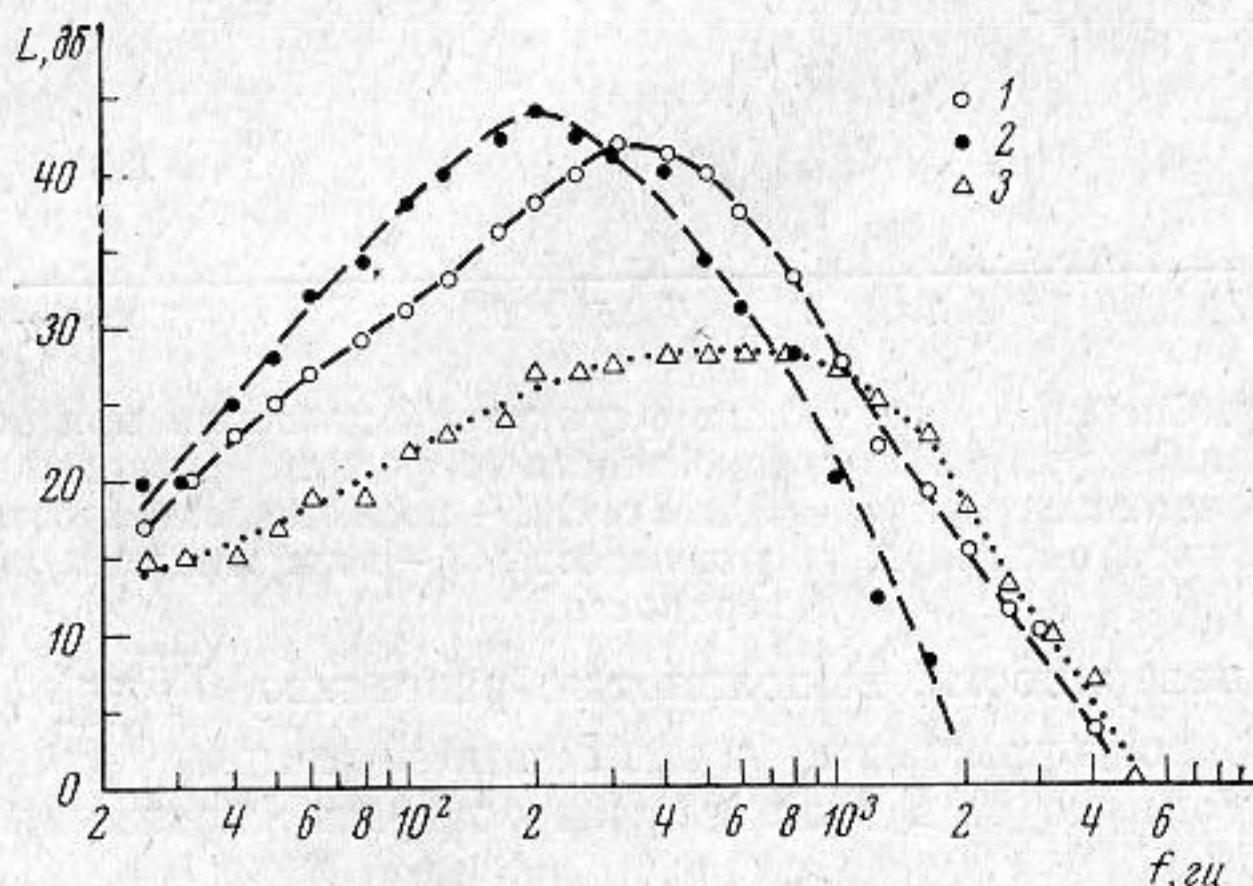
Спектральные эффекты существенно зависят от скорости течения (фиг. 5). Приведенные здесь результаты получены при изменении скорости потока в пределах от 4 до 14 м/сек. Можно видеть, что если в области низких частот величина снижения спектральных уровней флуктуаций давления  $\Delta(f)$  слабо зависит от скорости потока (уменьшение составляет приблизительно 3–6 дБ), то, напротив, в высокочастотной области эта зависимость оказывается существенной. Например, на частоте 2 кгц при скорости потока 5 м/сек спектральная интенсивность флуктуаций давления уменьшается практически на 20 дБ.

Поскольку посторонние помехи были сведены к минимуму, то оказалось возможным исследовать также и характер влияния полимерных добавок на звуковое поле в камере с звукопрозрачной стенкой в рабочей части канала. Спектральные эффекты снижения звука полимерными добавками с концентрацией  $5 \cdot 10^{-5}$  при скорости потока 10 м/сек приведены на фиг. 6.

Мы видим, что на частотах 3–10 кгц полимерные добавки снижают гидродинамический шум на 8–15 дБ. Уменьшение гидродинамического шума полимерными добавками отмечалось также в работе [5].



Фиг. 7. Влияние шероховатости на спектральные уровни флуктуаций давления при  $u_{\text{ср}}=5,1$  м/сек,  $k=4 \cdot 10^{-2}$  см. 1 — гладкая поверхность, вода 2 — гладкая поверхность, раствор полимера, 3 — шероховатая поверхность, вода; 4 — шероховатая поверхность, раствор полимера



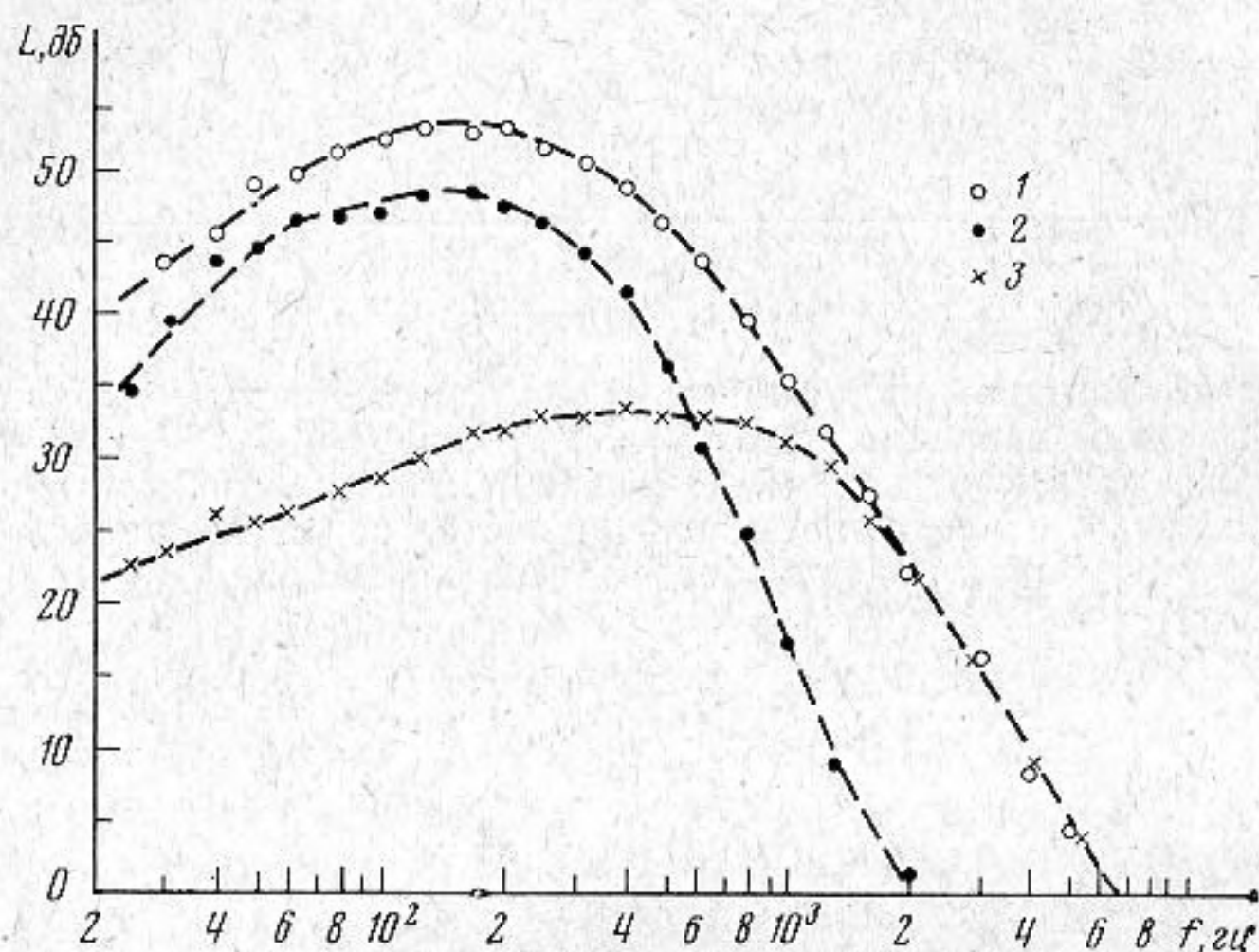
Фиг. 8. Спектральные уровни флуктуаций давления при обтекании регулярной шероховатости с плотным расположением элементов при  $u_{\text{ср}}=5,1$  м/сек; 1 — вода, шероховатость, 2 — раствор полимера, шероховатость, 3 — вода, гладкая поверхность

Рассмотрим теперь особенности влияния полимерных добавок на сопротивление трения и характеристики флуктуаций давления в случае шероховатых границ.

Из представленных в таблице данных, характеризующих влияние шероховатости на величину коэффициента сопротивления, следует, что наибольшие эффекты снижения сопротивления, превышающие эффекты снижения сопротивления в случае гладких границ, наблюдались при течении жидкости над шероховатостью, высота которой составляла  $5 \cdot 10^{-3}$  и  $1,5 \cdot 10^{-2}$  см. Для шероховатости  $4 \cdot 10^{-2}$  см эффект снижения сопротивления оказался сопоставим со случаем гладкой поверхности. Если обратиться к результатам измерений величины касательного напряжения на стенке и вычислить величину параметра  $dv^*/\nu$  (где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости для воды,  $v^*$  — динамическая скорость), характеризующего режим течения над шероховатой поверхностью, то можно отметить следующее. Наличие полимерных добавок в потоке привело к тому, что при шероховатости высотой  $5 \cdot 10^{-3}$  см так называемый переходный режим течения чистой воды сменился режимом течения, характерным для обтекания гидродинамически гладкой поверхности. Эта особенность трансформации в

характере течения связана с изменением структуры турбулентного потока при введении полимерных добавок, а именно с увеличением размеров вязкого подслоя и переходной области.

Что касается соотношения между средней квадратичной величиной флуктуаций давления  $\sqrt{\overline{p^2}}$  и величиной касательного напряжения на стенке  $\tau_w$  то, из данных, представленных в таблице, следует, что в случае течения чистой воды вдоль шероховатых границ так же, как и при течении



Фиг. 9. Спектральные уровни флуктуаций давления при обтекании регулярной шероховатости с редким расположением элементов при  $u_{ср} = 5,1$  м/сек. 1 — вода, шероховатость, 2 — раствор полимера, шероховатость, 3 — вода, гладкая поверхность

вдоль гладкой поверхности, выполняется равенство  $\sqrt{\overline{p^2}} \approx 1,5\tau_w$ . Наличие полимерных добавок приводит к уменьшению величины  $\sqrt{\overline{p^2}}$  и при наличии шероховатости, однако и в этом случае эффект снижения  $\tau_w$  больше, чем  $\sqrt{\overline{p^2}}$ .

Рассмотрим теперь влияние полимерных добавок на спектр флуктуаций давления в случае шероховатых границ.

На фиг. 7 приведены спектральные характеристики флуктуаций давления для течения воды и водного раствора полиэтиленоксида над гладкой и шероховатой (при монодисперсной шероховатости зернистого типа) поверхностями. Здесь, а также на фиг. 8 и 9 приведены относительные спектральные уровни в треть-октавных полосах частот.

Можно видеть, что эффект снижения интенсивности высокочастотных флуктуаций давления у шероховатой поверхности, обусловленных, как оказалось, генерацией мелкомасштабных вихрей, срывающихся с бугорков шероховатостей, выражен сильнее, чем в случае гладкой стенки.

На фиг. 8 и 9 приведены спектры пристеночных флуктуаций давления, полученные при течении воды и раствора полиэтиленоксида над шероховатой поверхностью с регулярными неровностями в виде стерженьков — цилиндров диаметром 0,2 см. Данные, представленные на фиг. 8, относятся к случаю плотного расположения элементов шероховатости. Расстояние между отдельными элементами равно их высоте. Датчик пульсаций давления располагался заподлицо со стенкой канала между двумя элементами шероховатости. Можно видеть характерный максимум, обусловленный процессом образования вихревой дорожки на элементах шероховатости, а также происходящее под влиянием полимерных добавок изменение (смещение) характерной частоты вихреобразования. Этот своеобразный механизм приводит как бы к дополнительному понижению интенсивности высоко-

частотных флуктуаций давления. Отметим, в связи с этим, что влияние полимерных добавок на вихревую дорожку рассматривалось в работе [10], авторы которой обнаружили, что при обтекании препятствия свежеприготовленным раствором полиэтиленоксида частота вихреобразования и интенсивность вихрей уменьшается.

В случае редко расположенных выступов (фиг. 9), расстояние между отдельными стержнями на порядок превышало их высоту, вместо регулярных вихревых структур за каждым элементом шероховатости возникают срывные течения. Полученные данные указывают на то, что полимерные добавки действуют на мелкомасштабную турбулентность и в срывных течениях.

Рассмотрим результаты корреляционных измерений. Напомним, что корреляционный анализ проводился в треть-октавных полосах частот в диапазоне от 80 до 5000 *гц*. Результаты, характеризующие влияние полимерных добавок на пространственную корреляцию пристеночных флуктуаций давления в продольном и поперечном направлениях при течении жидкости над гладкой поверхностью, приведены на фиг. 10. Заметим, что на фиг. 10 и ниже показаны изменения максимума пространственно-временной корреляции в треть-октавных полосах частот, а по существу взаимного спектра мощности. Можно видеть, что при обтекании гладкой стенки полимерные добавки приводят к уменьшению модуля взаимного спектра мощности в продольном и к увеличению его в поперечном направлении в области малых значений аргумента  $\omega \xi_1 / u_c$ ;  $\omega \xi_2 / u_c$ ; здесь  $\omega$  — частота,  $u_c$  — фазовая скорость переноса,  $\xi_1$  и  $\xi_2$  — расстояние между приемниками соответственно в продольном и поперечном направлениях.

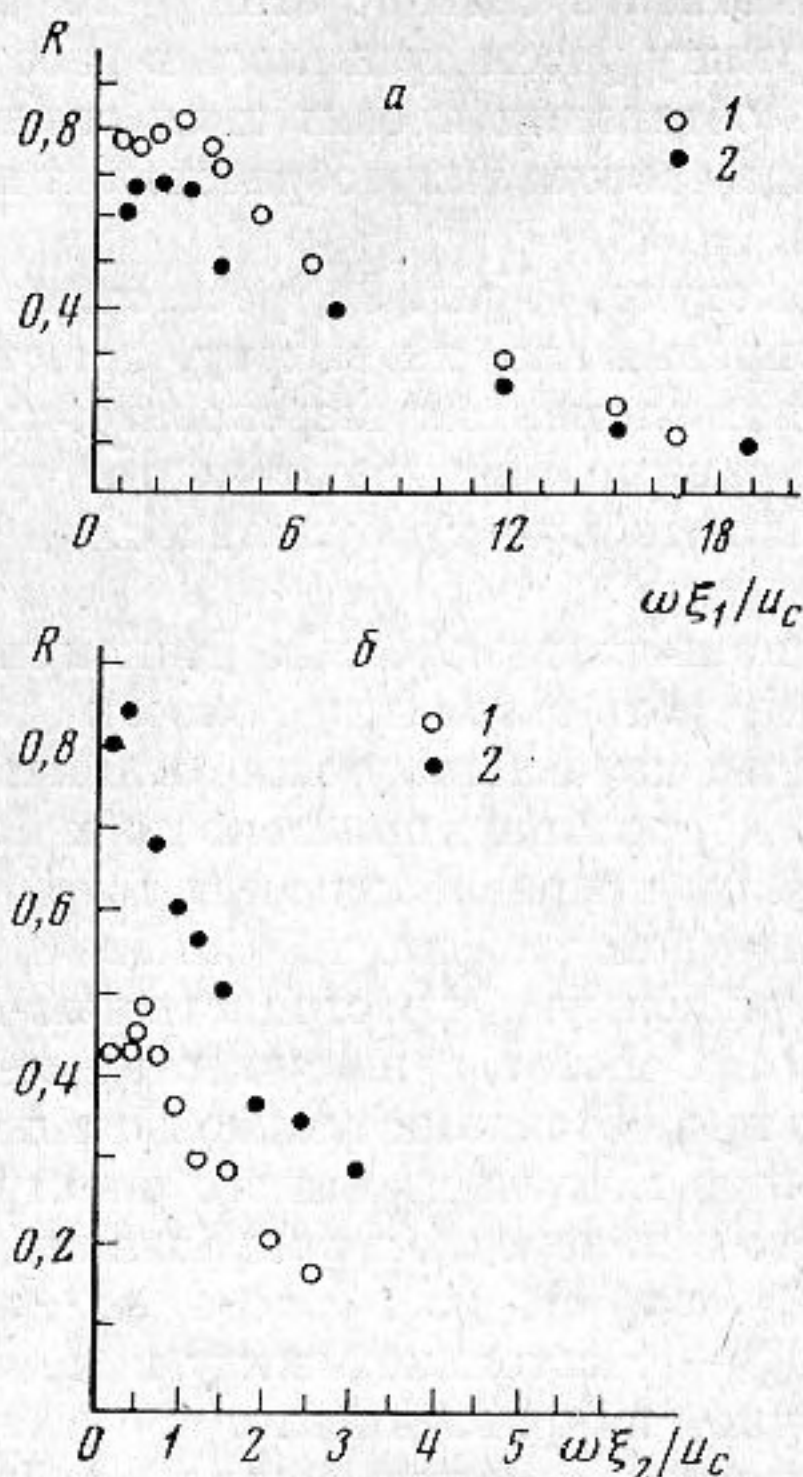
Аналогичные результаты, относящиеся к течению воды и слабого раствора полиэтиленоксида над шероховатой поверхностью, представлены на фиг. 11. Из этих данных следует, что, как и в случае гидравлически гладкой поверхности, полимерные добавки приводят к увеличению пространственной корреляции флуктуаций давления в поперечном направлении. Что же касается корреляции в продольном направлении, то в отличие от случая гидравлически гладкой поверхности, продольная корреляция не только не уменьшается, но даже возрастает. Причина такого «аномального» влияния полимерных добавок на характер спектра взаимной мощности флуктуаций давления состоит в следующем.

Известно [11, 12], что наличие шероховатости на обтекаемой поверхности приводит к более быстрому вырождению турбулентности в пограничном слое. Было установлено, что это вырождение увеличивается по мере перехода режима течения от переходного к автомодельному. Взаимный спектр мощности в высокочастотной части спадает тем круче, чем ближе режим течения в пограничном слое к автомодельному. Однако после наступления автомодельного характера течения жидкости над шероховатой поверхностью дальнейшее увеличение скорости течения не приводит к изменению высокочастотной части спектра, поскольку характер течения остается автомодельным.

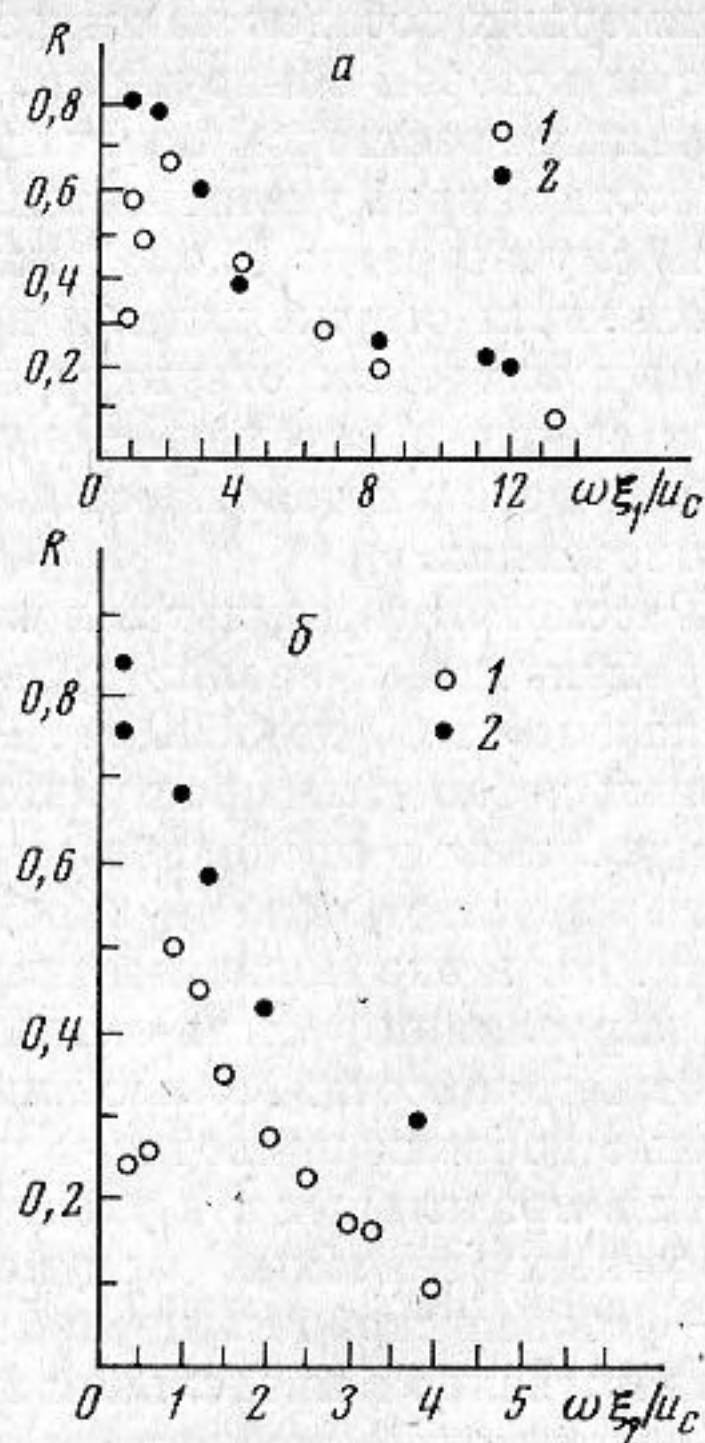
Результаты, представленные на фиг. 11, *а* относятся к такому случаю, когда течение воды без полимерных добавок у шероховатой поверхности носило автомодельный характер. Введение полимерных добавок изменило характер течения. Режим течения стал переходным, поскольку под действием полимерных добавок увеличилась толщина вязкого подслоя. Это и привело к росту корреляции в продольном направлении.

Итак, можно отметить следующее. Введение малых полимерных добавок в турбулентное течение жидкости (воды) приводит не только к эффекту снижения сопротивления трения, но одновременно оказывает существенное влияние на спектральные и корреляционные характеристики флуктуаций давления в потоке и порождаемые ими гидродинамические шумы. Полимерные добавки приводят к существенному (до 20 *дб*) сниже-





Фиг. 10



Фиг. 11

Фиг. 10. Модуль взаимного спектра мощности флуктуаций давления в продольном (а) и поперечном (б) направлениях при обтекании гладкой поверхности: 1 — вода, 2 — раствор полимера

Фиг. 11. Модуль взаимного спектра мощности флуктуаций давления в продольном (а) и поперечном (б) направлениях: 1 — вода, 2 — раствор полимера

нию спектральной интенсивности флуктуаций давления в высокочастотной части спектра. В случае шероховатых поверхностей спектральные и корреляционные эффекты полимерных добавок определяются режимом течения жидкости в пристеночной области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. M. Gadd. Reduction of turbulent drag in liquids. Nature, 1971, 230, 2, 29–31.
2. А. Ю. Ишлинский. О проблеме гидродинамического воздействия малых полимерных добавок. Инж. физ. ж., 1973, 25, 6, 965–966.
3. Л. М. Лямшев. О шуме управляемого пограничного слоя. Сб. Морское приборостроение, серия Акустика, 1972, вып. 1, 126–137.
4. Е. М. Грешилов, А. В. Евтушенко, Л. М. Лямшев. О флуктуациях давления при течении слабых растворов полимеров вдоль шероховатых границ. Докл. АН СССР, 1972, 207, 6, 1288–1291.
5. S. J. Barker. Radiated noise from turbulent boundary layer in dilute polymer solutions. Physics of fluids, 1973, 16, 9, 1387–1394.
6. И. Ф. Кадыков, Л. М. Лямшев. О влиянии полимерных добавок на флуктуации давления в пограничном слое. Акуст. ж., 1970, 16, 1, 75–80.
7. М. Д. Миллионщиков. Турбулентные течения в пограничном слое и трубах. М., «Наука», 1969.
8. R. L. Simpson. A generalized correlation of Roughness density effects on the turbulent boundary layer. A. JAA J, 1973, 11, 2, 142–145.
9. Viscous drag reduction, edited by Wells N. Y. Plenum Press, 1969.
10. В. Н. Калашиников, А. М. Кудин. Вихри Кармана в потоках растворов полимера, снижающих сопротивление трения. Изв. АН СССР. Сер. механ. жидкости и газов, 1969, № 4, 184–185.
11. Е. М. Грешилов, Л. М. Лямшев. О спектре и корреляции пристеночных пульсаций давления при обтекании шероховатой стенки. Акуст. ж., 1969, 15, 1, 126–128.
12. W. Blake. Turbulent boundary layer wall pressure fluctuations on smooth and rough walls. J. Fluid Mech., 1970, 44, 4, 637–660.