

УДК 534.231 : 532.542.4

**ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ  
В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ  
ПРИ ДИСКРЕТНОМ ОТСАСЫВАНИИ ЖИДКОСТИ**

*Л. М. Ляшев, С. А. Салосина, А. Г. Шустиков*

Приводятся результаты измерений корреляционных и спектральных характеристик пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое при дискретном отсасывании жидкости из пограничного слоя через щели, пояс из пористого материала и пояс из перфорированного материала. Параллельно измерялись профили средней скорости течения в управляемом пограничном слое. Установлено, что отсасывание приводит к уменьшению продольной и поперечной корреляции и спектральной плотности мощности пристеночных пульсаций давления в области низких частот, причем эффект сильнее выражен в случае поясов отсоса с пористой или перфорированной поверхностью.

Пульсации давления в турбулентном пограничном слое образуют ближнее поле шума пограничного слоя. Отсасывая жидкость с поверхности движущегося тела, можно, по-видимому, снизить интенсивность шума, влияя на характеристики турбулентного пограничного слоя [1—4]. Измерениям характеристик поля пульсаций скорости в турбулентном слое при отсасывании из него жидкости посвящены работы [5—6]. Некоторые экспериментальные данные о влиянии распределенного отсоса на пристеночные пульсации давления приведены в докладе [7].

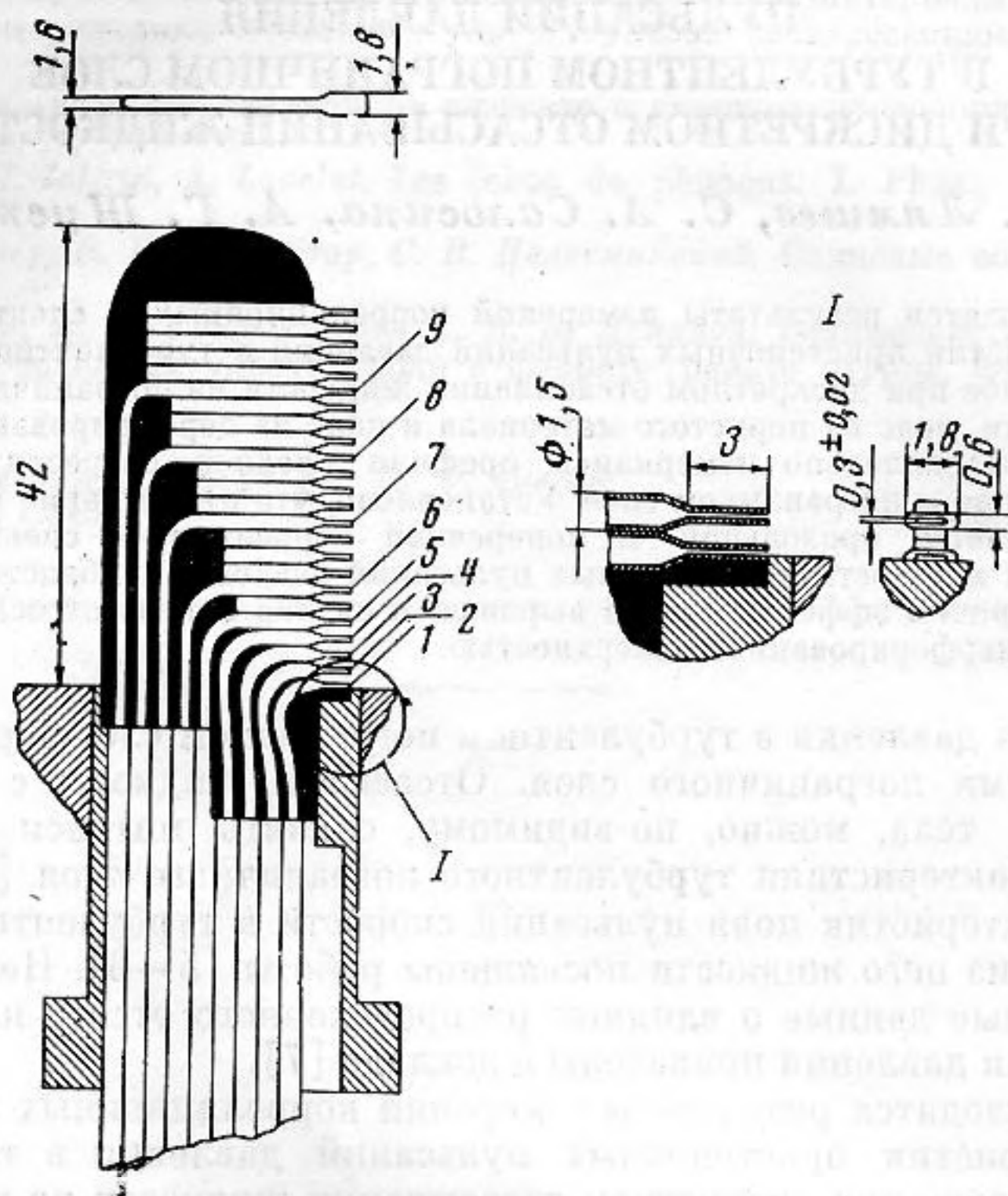
Ниже приводятся результаты измерений корреляционных и спектральных характеристик пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое при дискретном отсасывании жидкости из пограничного слоя. Под дискретным отсасыванием понимается отбор жидкости либо через систему щелей на обтекаемой поверхности тела, либо через систему так называемых поясов отсоса (чередующихся полос проницаемых и непроницаемых участков).

Отсасыванию подвергался турбулентный пограничный слой на плоской стенке гидродинамической трубы НИИ Механики МГУ. Заподлицо с поверхностью стенки трубы устанавливался специальный блок с двумя отделениями, одно из которых служило камерой отсоса, а другое, расположенное ниже по течению, предназначалось для размещения измерительных устройств: приемников пульсаций давления и системы микротрубок полного напора, предназначенных для измерения профиля средней скорости течения в пограничном слое. Над камерой отсоса располагался проницаемый участок. В месте расположения измерительных устройств обтекаемая поверхность представляла собой гладкую непроницаемую стенку. Эксперименты проводились с участками отсасывания трех типов: профилированная щель, пояс из пористого материала и пояс из перфорированного металла. Была также выполнена серия экспериментов в условиях, когда вся поверхность блока, совмещенная со стенкой гидродинамической трубы, являлась гладкой непроницаемой стенкой.

Протяженность участков отсасывания в поперечном направлении составляла 200 мм, по потоку пористого и перфорированного участков — 110 мм, а ширина щели — 1,5 мм. Кромки щели были закругленными с



радиусом закругления передней кромки 1,8 мм, а задней — 0,3 мм. Щелевой канал заканчивался диффузором с углом раскрытия  $10^\circ$ . Ширина щели была выдержана с точностью до 0,03 мм. Превышение кромок щели друг относительно друга было не более 10 мк. Размеры пор на пористом участке отсасывания по потоку составляли 150 мк, диаметр отверстий перфорированного пояса — 0,8 мм. Отверстия располагались рядами, ориентированными поперек потока, причем каждый ряд был сдвинут относительно следующего на 1 мм. Расстояние между отверстиями в ряду и



Фиг. 1. Конструкция гребенки микротрубок полного напора

расстояние между рядами составляло 3 мм. Распределенная шероховатость непроницаемой стенки, перфорированной поверхности и поверхности со щелью не превышала 10 мк, шероховатость пояса из пористого материала была  $\sim 40$  мк. Отсасывание жидкости осуществлялось за счет перепада давления между рабочим участком гидродинамической трубы и атмосферой.

Измерения пристеночных пульсаций давления производились за участком отсасывания ниже по течению на гладкой непроницаемой стенке. Расстояние от щели или пояса отсасывания до первого приемника пульсаций давления равнялось 25 мм. Толщина неуправляемого пограничного слоя в зоне измерений составляла  $\sim 15$  мм. Чувствительная (рабочая) поверхность пьезоприемников пульсаций давления имела диаметр 1,5 мм. Их устройство описано в работе [8]. Приемники были заделаны в общий корпус и расположены в виде двух линеек вдоль и поперек потока. После проведения серии измерений приемники пульсаций давления извлекались из экспериментальной измерительной камеры и на их место устанавливалась специально сконструированная гребенка микротрубок полного напора для измерения профиля средней скорости в пограничном слое\*.

\* На принципиальную возможность исследования поля скорости в потоках с помощью гребенки датчиков указывалось в работе [9].



Конструкция гребенки микротрубок полного напора изображена на фиг. 1. Гребенка состояла из рабочих микротрубок 1—9 и расположенных между ними бутафорских носиков, которые обеспечивали одинаковые условия на входе всех рабочих микротрубок. При изготовлении гребенки особое внимание уделялось тому, чтобы размеры щелеобразных приемных отверстий (см. вид I на фиг. 1) и наружные размеры носиков были одинаковыми, все щели располагались строго параллельно обтекаемой стенке, а плоскости приемных отверстий были перпендикулярны потоку. Окончательная доводка носиков производилась под микроскопом. Контрольные измерения показали, что разница в поперечном размере приемных щелевых отверстий у рабочих микротрубок не превышала  $\pm 0,02$  мм. В процессе изготовления гребенки и при работе с ней принимались специальные меры для обеспечения одинаковой инерционности всех измерительных каналов.

В целях проверки поведения данной конструкции гребенки в условиях пограничного слоя проводились измерения профиля средней скорости течения над гладкой непроницаемой стенкой при различных числах Рейнольдса. В каждом режиме измерения повторялись по 10 раз и относительная среднеквадратичная ошибка составила  $\sim 1\%$ . Сопоставление полученных профилей средней скорости с классическими данными [10] подтвердило корректность используемой методики измерений.

Эксперименты с управляемым пограничным слоем проводились при числах Рейнольдса  $2,5 \cdot 10^6 < Re \frac{u_\infty x}{\nu} < 1,5 \cdot 10^7$ , где  $u_\infty$  — скорость набегающего потока, которая изменялась от 3 до 19 м/сек;  $x$  — расстояние от начала рабочего участка гидротрубы до места измерений и  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости.

Относительная интенсивность распределенного отсоса, характеризуемая отношением  $v_0/u_\infty$  ( $v_0$  — осредненная по площади пористого или перфорированного участка скорость отсасывания) изменялась в пределах от  $2,8 \cdot 10^{-3}$  до  $7,5 \cdot 10^{-2}$ . Интервал изменения числа Рейнольдса для щели  $Re_{щ} = \frac{Q}{\nu l}$  ( $l$  — протяженность щели и  $Q$  — расход

жидкости через щель) составлял  $1,5 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4$ . Анализ спектра пульсаций давления выполнялся в третьоктавной полосе в диапазоне частот 100 гц — 10 кгц; корреляционный анализ — в третьоктавной полосе в диапазоне частот 160 гц — 3 кгц. Толщина пограничного слоя и толщина вытеснения  $\delta^*$  определялись по измеренным профилям средней скорости.

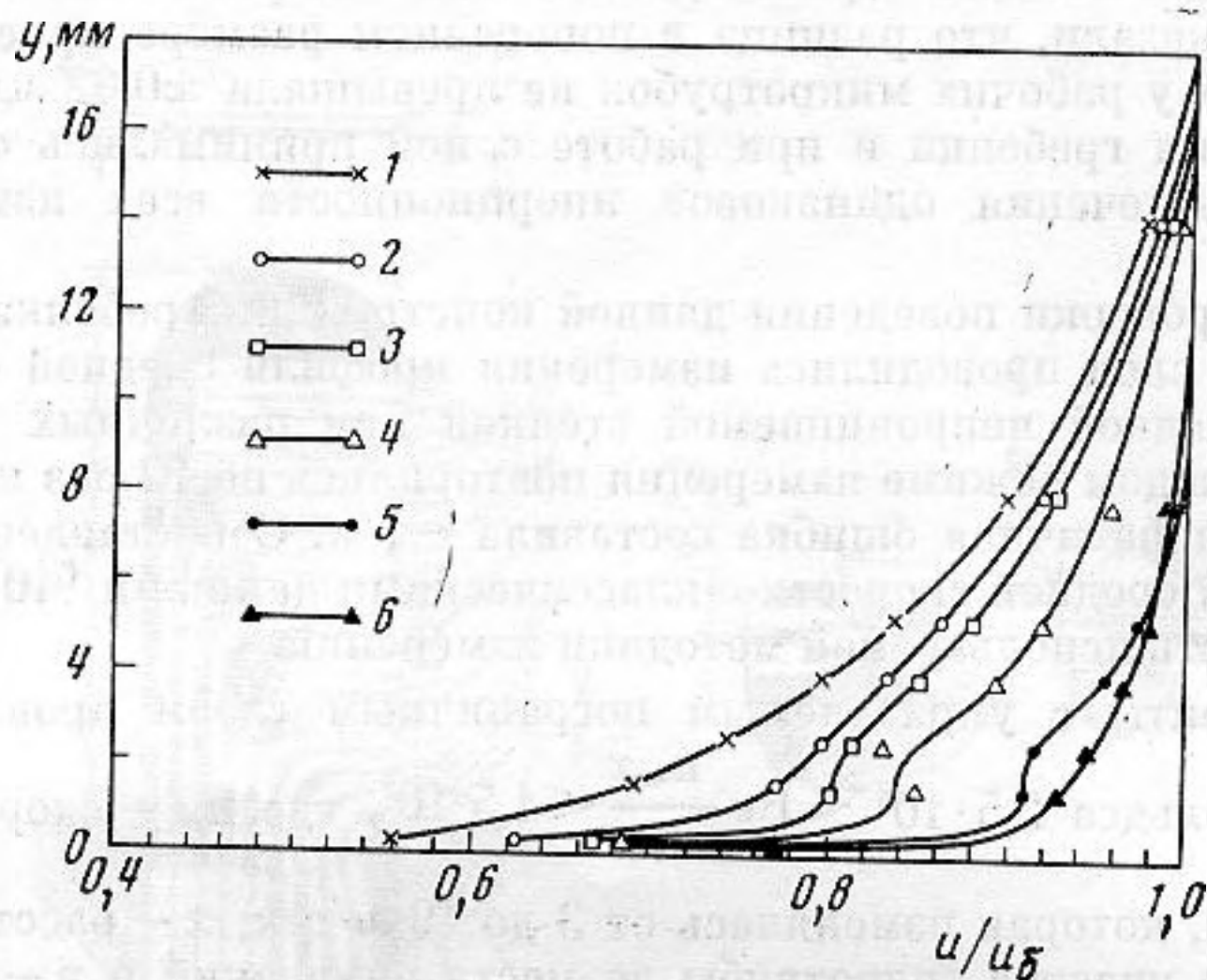
При постановке экспериментов учитывался тот факт, что кроме пульсаций давления псевдозвуковой природы на приемник могут действовать вибрации и звук. Для контроля уровня вибрационной помехи один из приемников, по конструкции идентичный приемникам в линейке, заделывался так, что его рабочая поверхность надежно экранировалась от непосредственного воздействия турбулентного потока. Как показал спектральный анализ в области частот 200 гц — 4 кгц, уровень пульсаций давления в неуправляемом пограничном слое превышал уровень вибрационной помехи не менее чем на 15 дб. В процессе экспериментов было установлено также, что работающая система отсоса практически не увеличивала вибраций.

Для изучения звукового поля, возникающего внутри гидродинамической трубы при отсосе, проводились измерения пристеночных пульсаций давления в отсутствие набегающего потока при различных расходах отсасываемой жидкости. Корреляционный и спектральный анализ результатов этого исследования показал, что отсасывание жидкости сопровождается излучением звука, интенсивность и спектральный состав которого зависят от типа проницаемого участка и скорости отсоса. Будем называть этот звук шумом всасывания. При достаточно большой относительной интен-



сивности отсоса  $v/u_\infty$  уровень шума всасывания на высоких частотах (а в случае щелевого отсоса и на низких частотах) приближается к уровню турбулентных пульсаций давления в пограничном слое. Зависимость шума всасывания от типа проницаемого участка свидетельствует о том, что регистрируемый звук не является помехой, обусловленной работой системы отсоса, а принципиально связан с самим процессом отсасывания.

Рассмотрим некоторые характерные результаты измерений профиля средней скорости и пристеночных пульсаций давления.



Фиг. 2. Профили средней скорости при отсосе через перфорированный участок ( $Re=2,5 \cdot 10^6$ ) для разных значений  $v_0/u_\infty$ : 1 — 0 (гладкая стенка); 2 — 0,006; 3 — 0,015; 4 — 0,030; 5 — 0,060; 6 — 0,075

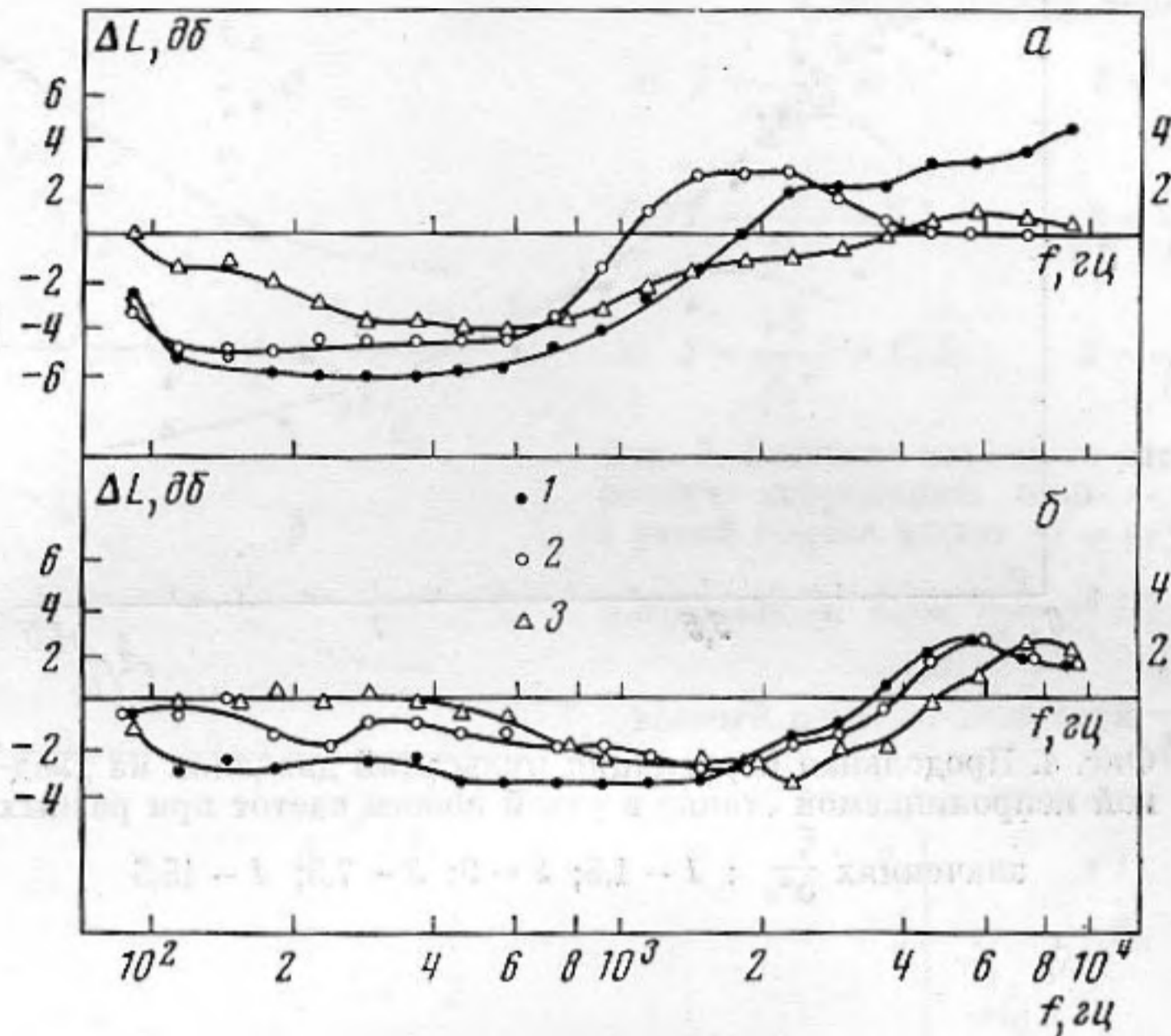
При всех исследованных способах отсасывания изменения профиля средней скорости течения в пограничном слое имели общие черты: профиль скорости становился более полным, градиент средней скорости в пристеночной области увеличивался, а в остальной, большей части пограничного слоя, в целом, уменьшался. На фиг. 2 приведены профили средней скорости в случае отсоса через перфорированный участок. По вертикальной оси отложено расстояние от стенки  $y$  в миллиметрах, по горизонтальной — отношение величины средней скорости течения внутри пограничного слоя ( $u$ ) к скорости на его внешней границе ( $u_\infty$ ). На фиг. 2 виден перегиб кривых при интенсивностях отсоса  $v_0/u_\infty > 0,006$ , что совпадает с данными Фавра [5]. При  $v_0/u_\infty = 0,075$  (такие большие интенсивности отсасывания раньше экспериментально не исследовались) получен качественно новый результат: точка перегиба исчезла, кривая профиля скорости приобрела более плавный характер. Отметим, что при отсосе через щель профиль скорости имел точку перегиба на всех исследованных режимах обтекания.

Влияние отсоса на спектр мощности пристеночных пульсаций давления при различных способах отсасывания жидкости из турбулентного пограничного слоя показано на фиг. 3. По вертикальной оси отложено отклонение в децибелах спектрального уровня пульсаций давления в отсасываемом пограничном слое от уровня пульсаций в неуправляемом пограничном слое; по горизонтальной оси — частота настройки фильтра. Для сравнения выбраны результаты, полученные в условиях, когда отсос жидкости через щель или через пояса отсоса приводил к одному и тому же уменьшению толщины вытеснения пограничного слоя  $\delta_A^*/\delta_0^*$  (индекс «0» соответствует случаю гладкой непроницаемой стенке, индекс «A» — слу-



чаю отсасываемого пограничного слоя). Представленные на фиг. 3 результаты относятся к умеренным интенсивностям отсасывания. Можно видеть, что отсос приводит к уменьшению спектральной плотности мощности пульсаций давления в низкочастотной части спектра и к увеличению — на высоких частотах, причем влияние отсоса жидкости через пояса отсоса оказывается более существенным.

Наблюдавшиеся при отсосе изменения спектра мощности пристеночных пульсаций давления связаны, по-видимому, с тремя основными фактора-



Фиг. 3. Влияние отсоса на спектр мощности пульсаций давления при разных способах отсасывания: 1 — поры; 2 — перфорация; 3 — щель, а)  $u_\infty = 4$  м/сек,  $\frac{\delta_{\Delta^*}}{\delta_0^*} = 0,6$ ;  
б)  $u_\infty = 16$  м/сек,  $\frac{\delta_{\Delta^*}}{\delta_0^*} = 0,95$

ми: с общим снижением интенсивности турбулентности в отсасываемом пограничном слое [5, 6]; с перестройкой масштабов турбулентности, вызванной уменьшением толщины турбулизованного слоя жидкости и, как показал корреляционный анализ, с появлением шума всасывания.

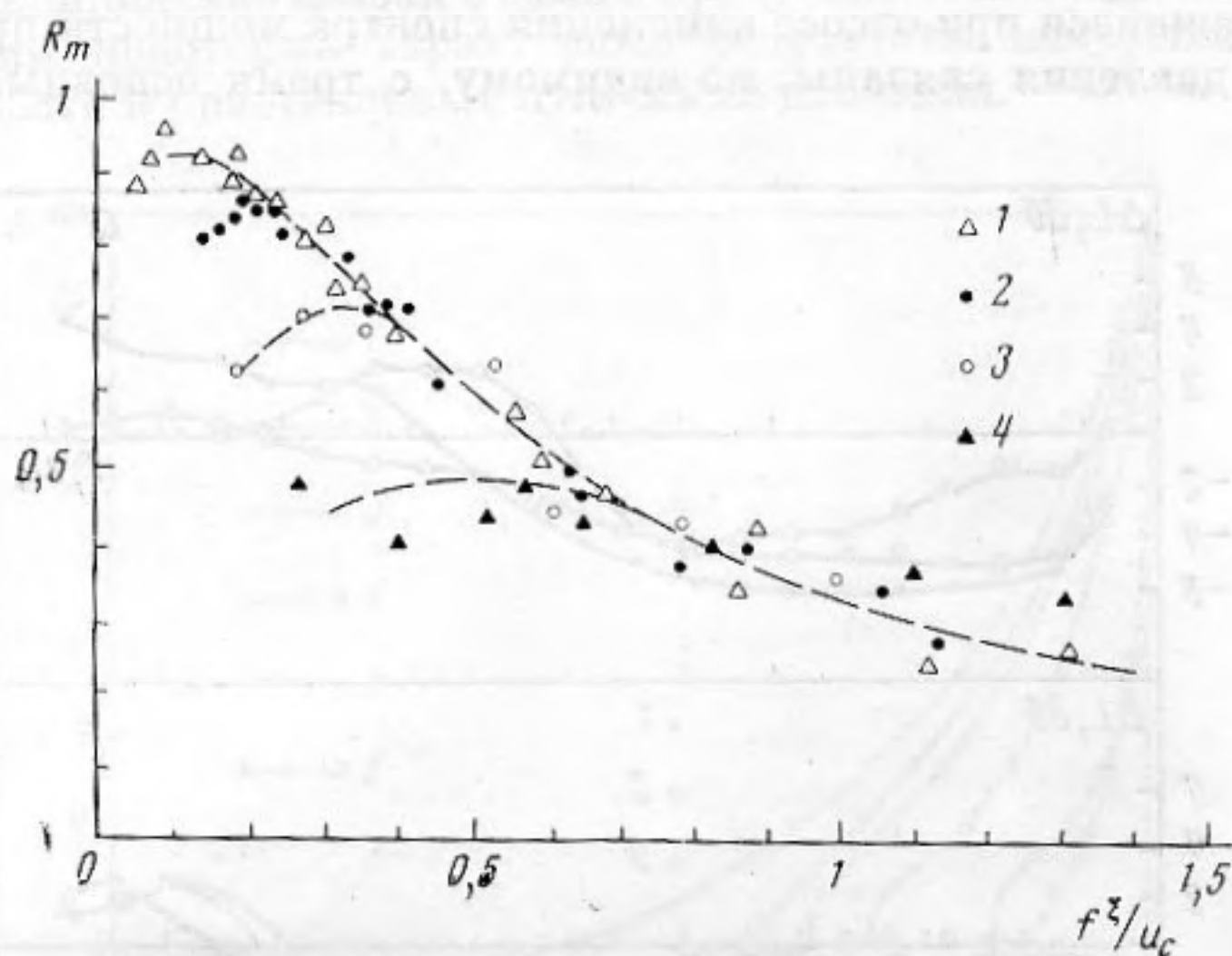
Подчеркнем, что увеличение спектральной интенсивности пульсаций давления в высокочастотной области, обусловленное, в частности, шумом всасывания, имеет принципиальное значение, поскольку это явление связано с методом управления пограничным слоем.

Остановимся теперь на результатах корреляционных измерений псевдозвуковых пульсаций давления. На фиг. 4 представлены данные, характеризующие изменение максимума коэффициента продольной пространственно-временной корреляции  $R_m$  пристеночных пульсаций давления в неуправляемом пограничном слое на гладкой стенке в зависимости от безразмерной частоты\*. По вертикальной оси отложены значения коэф-

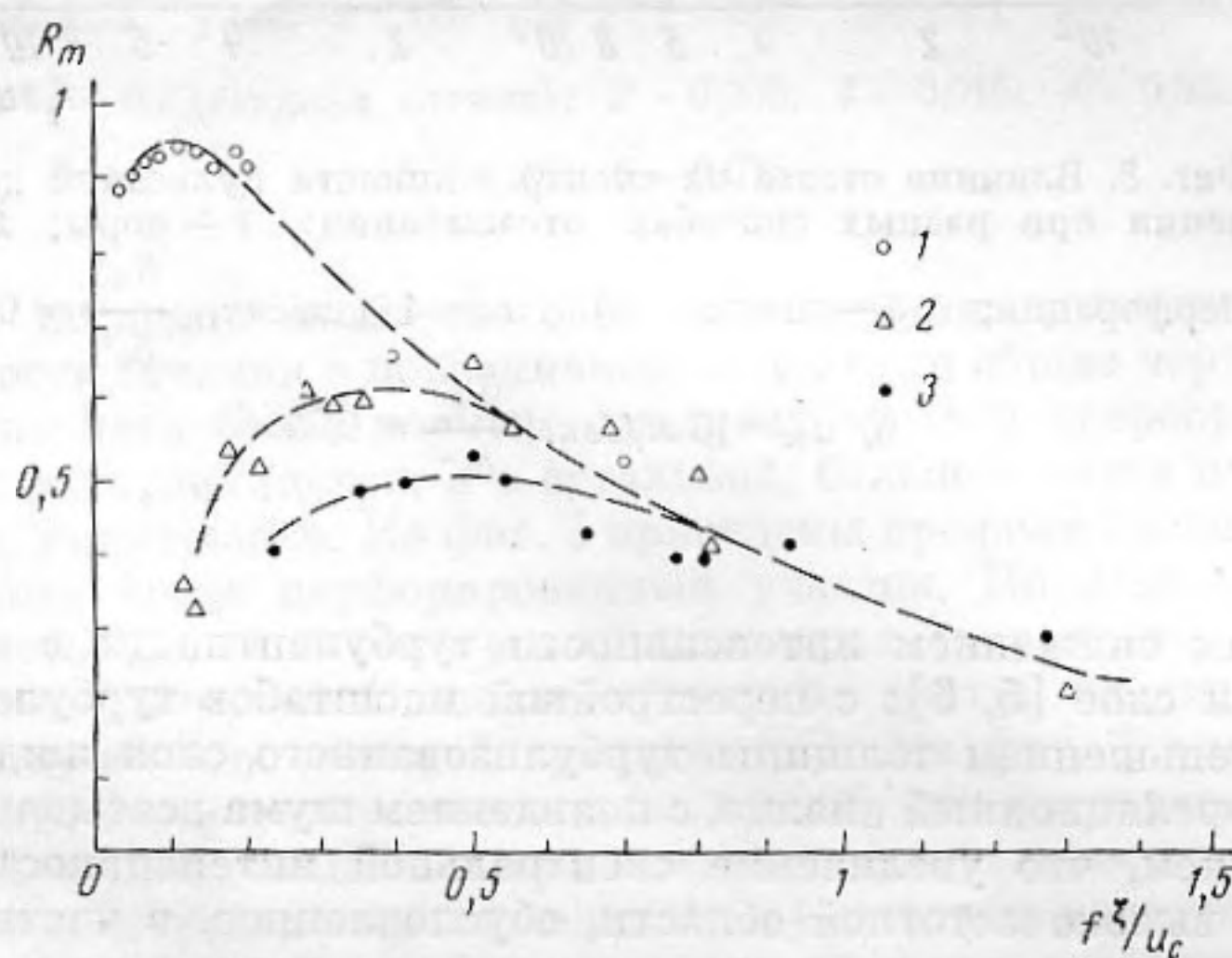
\* Напомним, что измерения проводились в третьоктавной полосе частот. Известно, что в случае достаточно узкой полосы частот анализа огибающая максимумов коэффициента пространственно-временной корреляции практически совпадает со спектром взаимной мощности процесса.



коэффициента корреляции, а по горизонтальной оси — безразмерной частоты  $\frac{f\xi}{u_c}$ , где  $f$  — частота настройки фильтра,  $\xi$  — расстояние между приемниками и  $u_c$  — так называемая скорость переноса, которая определяется из результатов корреляционного анализа. Можно видеть, что при расстоянии между приемниками  $\xi \approx \delta^*$  коэффициент корреляции в области низких



Фиг. 4. Продольная корреляция пульсаций давления на гладкой непроницаемой стенке в узкой полосе частот при разных значениях  $\frac{\xi}{\delta^*_0}$  : 1 — 1,5; 2 — 3; 3 — 7,5; 4 — 15,5

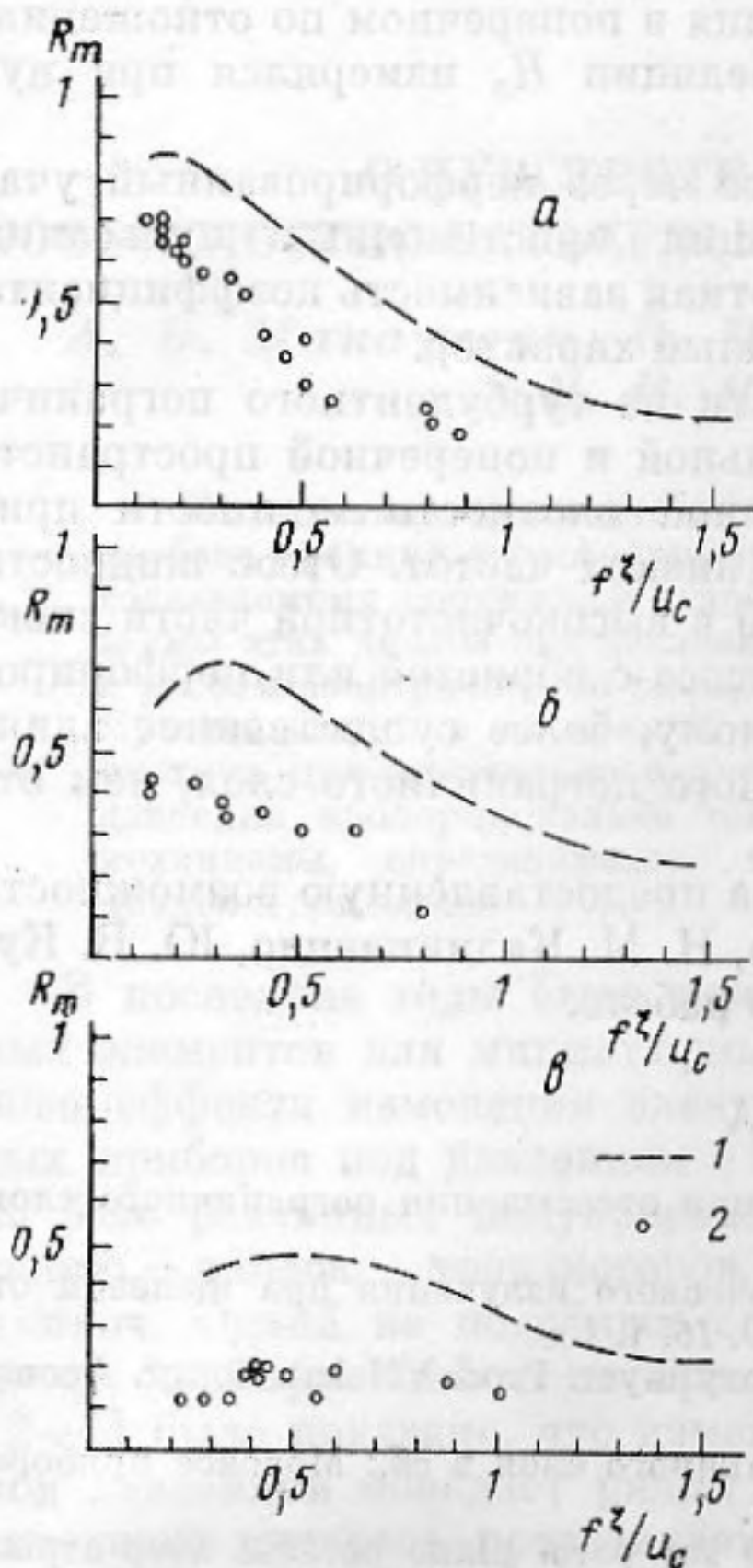


Фиг. 5. Влияние щелевого отсоса на продольную корреляцию пульсаций давления в узкой полосе частот при разных значениях  $\frac{\xi}{\delta A^*}$  : 1 — 1,5; 2 — 9,5; 3 — 15,5

частот достигает значения 0,9—0,95, а при  $\xi \gg \delta^*$  он уменьшается до 0,45÷0,5. Эти результаты подтверждают тот факт, что в области низких частот радиус корреляции пристеночных пульсаций давления определяется толщиной пограничного слоя, а не длиной так называемой гидродинамической волны  $\lambda_r = u_c/f$ , как в высокочастотной части спектра, где практически не наблюдается зависимости коэффициента корреляции от  $\xi/\delta^*$  [11—13].



Данные измерений, демонстрирующие изменения максимума коэффициента продольной пространственно-временной корреляции  $R_m$  пристеночных пульсаций давления при щелевом отсасывании пограничного слоя, представлены на фиг. 5. Точками изображены значения  $R_m$ , относящиеся к различным режимам отсасывания, характеризуемым параметром  $\xi/\delta_A^*$ ; пунктирными кривыми показаны изменения коэффициента корреляции в



Фиг. 6

Фиг. 6. Влияние пористого отсоса на продольную корреляцию пульсаций давления в узкой полосе частот

а)  $1 - \frac{\xi}{\delta_0^*} = 3;$       2 -  $\frac{\xi}{\delta_A^*} = 3,5;$

б)  $1 - \frac{\xi}{\delta_0^*} = 7,5;$       2 -  $\frac{\xi}{\delta_A^*} = 1,5;$

в)  $1 - \frac{\xi}{\delta_0^*} = 15,5;$       2 -  $\frac{\xi}{\delta_A^*} = 16$

Фиг. 7. Влияние пористого отсоса на поперечную корреляцию пульсаций давления в узкой полосе частот (1 — неуправляемый

пограничный слой  $\frac{\eta}{\delta_0^*} = 1,5;$  2 — отсасываемый пограничный слой  $\frac{\delta_A^*}{\delta_0^*} = 0,65$ )



Фиг. 7

случае неуправляемого пограничного слоя для тех же значений  $\xi/\delta^*$ . Видно, что щелевое отсасывание уменьшает продольную корреляцию пристеночных пульсаций давления в области низких частот, причем наблюдаемые изменения также зависят от параметра  $\xi/\delta^*$ , как в случае неуправляемого пограничного слоя. По-видимому, основное действие щелевого отсоса заключается в уменьшении толщины турбулентного пограничного слоя, что приводит лишь к изменениям характерных масштабов турбулентности, не нарушая принципа подобия\*.

Корреляционные характеристики пристеночных пульсаций давления при отсасывании жидкости через пояс из пористого материала приведены на фиг. 6. По осям отложены те же величины, что и на фиг. 4, 5. Пунктиром показано изменение максимума коэффициента продольной пространственно-временной корреляции для близких значений параметра  $\xi/\delta^*$  в случае неуправляемого пограничного слоя. Можно видеть, что отсос через пористый участок вызывает более существенное уменьшение корреляции

\* Термин «подобие» понимается в том смысле, как это разъяснено в монографии [14] стр. 170.



во всем исследованном диапазоне частот, чем это имело место при щелевом отсасывании. Отсюда можно сделать вывод, что отсасывание жидкости через проницаемый участок, имеющий достаточную протяженность, вызывает нарушение подобия коэффициента продольной пространственно-временной корреляции.

Влияние отсоса через пористый участок на поперечную корреляцию пристеночных пульсаций давления показано на фиг. 7. Здесь  $\eta$  — расстояние между приемниками пульсаций давления в поперечном по отношению к потоку направлении. Коэффициент корреляции  $R_p$  измерялся при нулевом значении времени задержки.

Эксперименты показали, что при отсосе через перфорированный участок пространственно-временная корреляция пристеночных пульсаций давления также уменьшается, однако частотная зависимость коэффициента корреляции имеет в этом случае более сложный характер.

Итак, дискретное отсасывание жидкости из турбулентного пограничного слоя приводит к уменьшению продольной и поперечной пространственно-временной корреляции и спектральной плотности мощности пристеночных пульсаций давления в области низких частот. Отсос жидкости вызывает возрастание мощности пульсаций в высокочастотной части спектра. Отсасывание жидкости через пояса отсоса с пористой или перфорированной поверхностью оказывает, по-видимому, более существенное влияние на внутреннюю структуру турбулентного пограничного слоя, чем отсос через щель.

Авторы благодарят В. Ф. Шушпанова за предоставленную возможность проведения экспериментов, В. С. Илышева, Н. М. Калиниченко, Ю. В. Курилкина и Л. В. Тихомирову — за помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Лямшев. К расчету излучения звука при отсасывании пограничного слоя. Акуст. ж., 1968, 14, 3, 416—422.
2. Л. М. Лямшев. К вопросу об оценке акустического излучения при щелевом отсасывании пограничного слоя. Акуст. ж., 1970, 16, 1, 158.
3. L. M. Lumshew. Acoustics of controlled boundary layer. Proc. VII Int. Congr. Acoust, Budapest, 1971, 4, 377—380.
4. Л. М. Лямшев. О шуме управляемого пограничного слоя в сб.: Морское приборостроение. Серия «Акустика», 1972, 1, 126—137.
5. A. Favre, R. Dumas, E. Verolett. Couch limite sur paroi plane poreuse avec aspiration. Publication scientifique et techniques du ministere de l'air, 1961. No. 377.
6. A. Favre, R. Dumas, E. Verolett, M. Coantic. Couch limite turbulent sur paroi poreuse avec aspiration. J. de Mecanique, 5, 1, 1966.
7. Н. К. Андреев. Характеристики пульсаций турбулентного давления при распределенном отсосе. В сб.: Тепло- и массоперенос, т. 1, ч. 1. 29—32, Минск. 1972.
8. И. Ф. Кадыков, Л. М. Лямшев. О влиянии полимерных добавок на флуктуации давления в пограничном слое. Акуст. ж., 1970, 16, 1, 75.
9. А. Н. Петунин. Приемники для измерения давления и скорости в газовых потоках. В сб.: Промышленная аэродинамика, вып. 19, 1960.
10. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.
11. Л. М. Лямшев, С. А. Салосина. О влиянии размеров приемника на результаты измерений спектра пристеночных пульсаций давления в пограничном слое. Акуст. ж., 1966, 12, 2, 261.
12. M. K. Bull. Wall-pressure fluctuation associated with subsonic turbulent boundary layer flow. J. Fluid. Mech., 1967, 28, 4.
13. И. Ф. Кадыков. Экспериментальное изучение функции продольной пространственно-временной корреляции турбулентных пульсаций давления. Акуст. ж., 1971, 17, 1, 50—54.
14. И. О. Хинце. Турбулентность. М., Физматгиз, 1963.