

УДК 534.231:532.542.4

ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В УСЛОВИЯХ ПОДАЧИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ЧЕРЕЗ ПРОНИЦАЕМУЮ ГРАНИЦУ*Лямшев Л. М., Челмоков Б. И., Шустиков А. Г.*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований эффектов снижения пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое при подаче сплошной среды сквозь пронцаемый участок обтекаемой поверхности по нормали к ней для двух конструктивных вариантов пронцаемого участка.

Подача жидкости сквозь пронцаемый участок стенки, обтекаемой потоком, по нормали к ней, приводит к уменьшению поверхностного трения и изменению процессов теплообмена между потоком и стенкой. Одновременно могут измениться пульсационные нагрузки на стенку, которые нередко вызывают усталостное и эрозионное разрушение конструкций, вибрации и шумы. Кроме того, подача жидкости является одним из способов управления турбулентным пограничным слоем, которое предпринимается с целью изменения в желательном направлении как гидродинамических, так и акустических характеристик турбулентного течения [1, 2].

Увеличение толщины пограничного слоя и интенсивности пульсаций скорости в ядре турбулентного течения, оттеснение турбулентности от стенки и возникновение в пристеночной области слоя с низким уровнем пульсаций, уменьшение градиента средней скорости течения, стремление силы поверхностного трения к нулю — таковы основные изменения в структуре однофазного турбулентного пограничного слоя, вызываемые интенсивной распределенной подачей жидкости по нормали к обтекаемой поверхности. Обусловленное интенсивной подачей оттеснение от стенки турбулентности уменьшает спектральную плотность пристеночных пульсаций давления примерно по экспоненциальному закону, причем показатель экспоненты прямо пропорционален частоте пульсаций и толщине слоя оттеснения и обратно пропорционален скорости сноса турбулентных возмущений. Возникновение на стенке слоя оттеснения с низким уровнем пульсаций скорости, по-видимому, приведет также к снижению пульсаций трения на границе потока, что должно уменьшить интенсивность поверхностных источников, дающих существенный вклад в спектр пульсаций давления в области малых волновых чисел [3].

Экспериментальные исследования спектральных и корреляционных характеристик пристеночных пульсаций давления в однородном турбулентном пограничном слое при подаче жидкости были выполнены на плоской стенке гидродинамической трубы. Приведем размеры пронцаемого участка: протяженности по потоку — 110, в поперечном направлении — 200 мм. Пристеночные пульсации давления измерялись за пронцаемым участком ниже по течению на гладкой непронцаемой стенке. Расстояние от конца пронцаемого участка до первого приемника пульсаций давления равнялось 25 мм. Толщина турбулентного пограничного слоя в районе измерений при естественном обтекании была порядка 15 мм. Наряду с пульсациями давления производились измерения профиля средней скорости течения в управляемом пограничном слое. Эксперименты производились с пронцаемым участком двух видов — пористым и перфорированным. Более подробное описание постановки экспериментов и конструкции пронцаемых участков дано в работе [4]. подача воды осуществлялась за счет перепада давлений между рабочим участком гид-

родинамической трубы и городским водопроводом. Какие-либо дополнительные насосы в системе подачи не использовались.

Во время эксперимента одновременно измерялись следующие величины: пристеночные пульсации давления (или профиль средней скорости течения в пограничном слое), скорость набегающего потока U_∞ , среднее давление в рабочем участке гидротрубы, суммарный расход подаваемой через проницаемый участок воды. Скорость набегающего потока изменялась от 3 до 20 м/с. Этому диапазону скоростей соответствовали числа Рейнольдса: $2,5 \cdot 10^6 < Re_x < 1,5 \cdot 10^7$. Избыточное давление в рабочем участке гидротрубы поддерживалось примерно постоянным и равным ~ 1 атм. Относительная интенсивность распределенной подачи воды, характеризуемая отношением осредненной по площади проницаемого участка скорости подачи v_n к скорости набегающего потока v_n/U_∞ , изменялась в пределах от $9 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-2}$, диапазон изменения параметра $b = (v_n/U_\infty) (2/C_{f0})$ составил: $0,8 < b < 23$, где C_{f0} — коэффициент местного трения при естественном обтекании ($v_n = 0$). Расход подаваемой через проницаемый участок воды составил по сравнению с расходом воды через поперечное сечение гидродинамической трубы менее 1,5%.

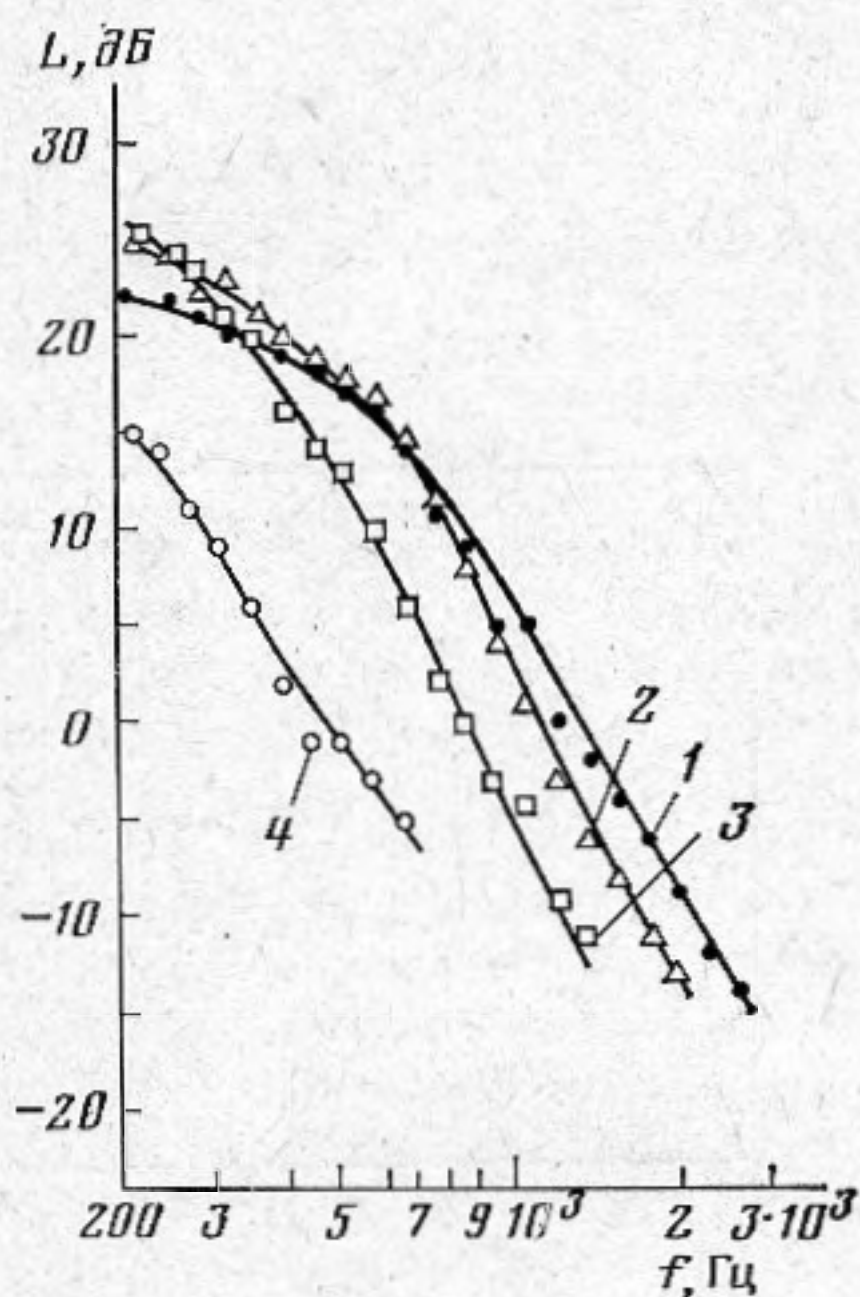
Корреляционный анализ выполнялся в третьоктавной полосе в диапазоне частот 200 Гц — 4 кГц. Спектральный анализ производился с помощью ЭВМ БЭСМ-6 в диапазоне частот 200 Гц — 10 кГц. Расчет спектральной мощности осуществлялся посредством осреднения периодограмм, полученных методом быстрого преобразования Фурье [5]. Анализировался временной интервал записи сигналов с приемников пульсаций давления длительностью 0,2 с. Выборки делались с шагом $5 \cdot 10^{-5}$ с. С целью уменьшения дисперсии оценки спектральной плотности производилось осреднение по четырем временным интервалам и по 11 соседним частотам с равными весами. Осредненное значение приписывалось центральной частоте. Разрешающая способность анализа по частоте была порядка 50 Гц. На приводимых ниже фигурах значения спектральной плотности нанесены лишь на тех частотах, где уровень вибрационной помехи не менее чем на 10 дБ ниже уровня полезного сигнала.

Влияние подачи воды через проницаемый участок по нормали к обтекаемой поверхности на спектр пристеночных пульсаций давления в однофазном турбулентном пограничном слое иллюстрируют зависимости, приведенные на фиг. 1. По вертикальной оси отложена величина спектрального уровня L в дБ (относительно уровня $0,1 \text{ Па}/\sqrt{\text{Гц}}$), по горизонтальной оси — частота в Гц. Данные относятся к случаю подачи воды через пористый участок. При малых и средних значениях относительной интенсивности подачи v_n/U_∞ в области низких частот имеет место подъем спектрального уровня пристеночных пульсаций давления. Начиная с некоторой интенсивности подачи, в области высоких частот наблюдаются эффекты снижения. В случае очень больших интенсивностей подачи происходит общее снижение пульсаций давления на всех исследованных частотах.

Конструктивные особенности проницаемых участков (мелкие поры или перфорация) прежде всего сказываются в том, что при одинаковой интенсивности подачи (v_n/U_∞) большее снижение наблюдается в случае пористого участка. Так, при $v_n/U_\infty = 0,027$ на частотах $f \geq 500$ Гц при подаче воды через пористый участок величина эффекта снижения составляла 19, а в случае перфорированного участка — 8 дБ.

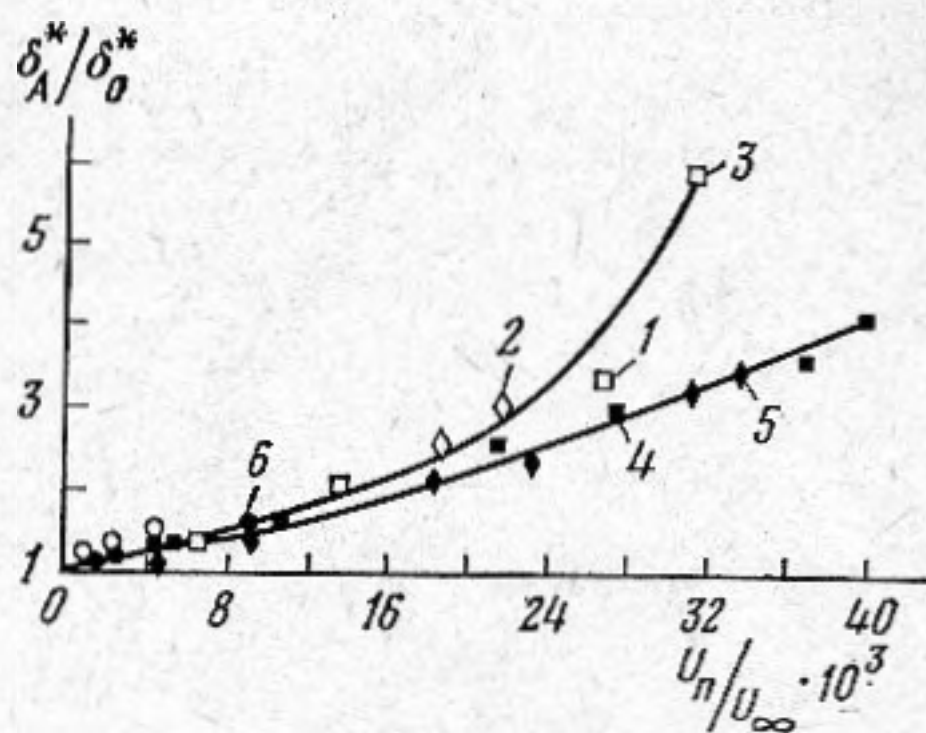
Сравним наблюдаемые эффекты снижения пристеночных пульсаций давления с изменением толщины вытеснения турбулентного пограничного слоя при подаче жидкости (фиг. 2). Для этого представим спектры пульсаций давления в безразмерных координатах, используя в качестве характерного линейного масштаба толщину вытеснения управляемого пограничного слоя δ_A^* . Результаты такой обработки показаны на фиг. 3. По вертикальной оси отложено нормированное значение спектральной плотности пульсаций давления в дБ: $\bar{E} = 10 \lg (E(f) / 2\pi r^2 U_\infty^3 \delta_A^*)$, по горизонтальной оси — безразмерная частота $\bar{\omega} = \omega \delta_A^* / U_\infty$. Используемая форма нормировки часто встречается в литературе, посвященной турбулентным пульсациям давления (см., например, [6]). Для анализа были взяты данные,

полученные при подаче воды через пористый и перфорированный участки при скоростях набегающего потока 3 и 5 м/с. Светлые значки относятся к случаю подачи жидкости через пористый участок, а зачерненные — к подаче через перфорированный участок. Сплошная линия соединяет точки, соответствующие неуправляемому пограничному слою. При этом нормированные спектры пристеночных пульсаций давления в управляемом пограничном слое группируются вокруг сплошной линии, располагаясь в среднем несколько выше ее. Кроме того, при подаче воды через пояс из пористого материала нормированные спектры пульсаций давления распо-



Фиг. 1

соответствующие неуправляемому пограничному слою. При этом нормированные спектры пристеночных пульсаций давления в управляемом пограничном слое группируются вокруг сплошной линии, располагаясь в среднем несколько выше ее. Кроме того, при подаче воды через пояс из пористого материала нормированные спектры пульсаций давления распо-



Фиг. 2

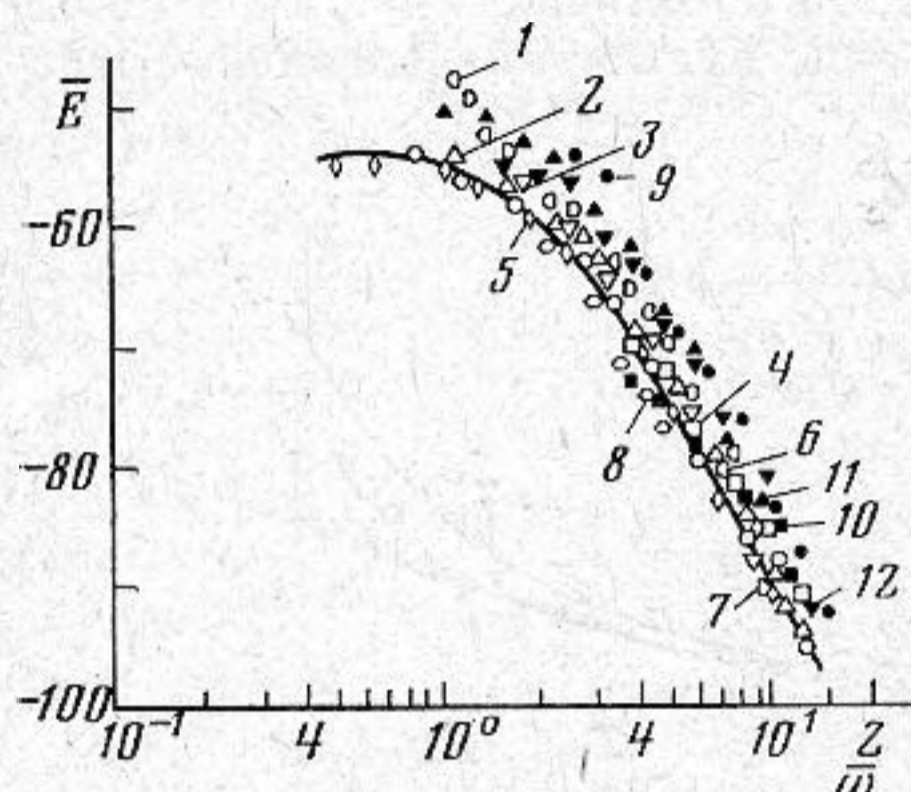
Фиг. 1. Влияние подачи жидкости через пояс из пористого материала на спектр пристеночных пульсаций давления ($U_\infty=3$ м/с; 1 — $v_n/U_\infty=0$, 2 — 0,0055, 3 — 0,0108, 4 — 0,027)

Фиг. 2. Влияние подачи жидкости через проницаемый пояс на толщину вытеснения однофазного турбулентного пограничного слоя (пояс из пористого материала: 1 — $U_\infty=3$ м/с; 2 — 4, 3 — 16; пояс из перфорированного материала: 4 — 3 м/с, 5 — 4, 6 — 16)

лагаются весьма близко к нормированному спектру, соответствующему естественному обтеканию непроницаемой пластины. Нормированные спектры, полученные при средних интенсивностях подачи через перфорированный участок, легли примерно на 10 дБ выше. Интенсивная подача жидкости через перфорированный участок ($v_n/U_\infty \cong 0,04$) привела к таким же изменениям спектра пульсаций давления и толщины вытеснения пограничного слоя, которые наблюдались в случае менее интенсивной подачи жидкости через пористый участок ($v_n/U_\infty=0,027$).

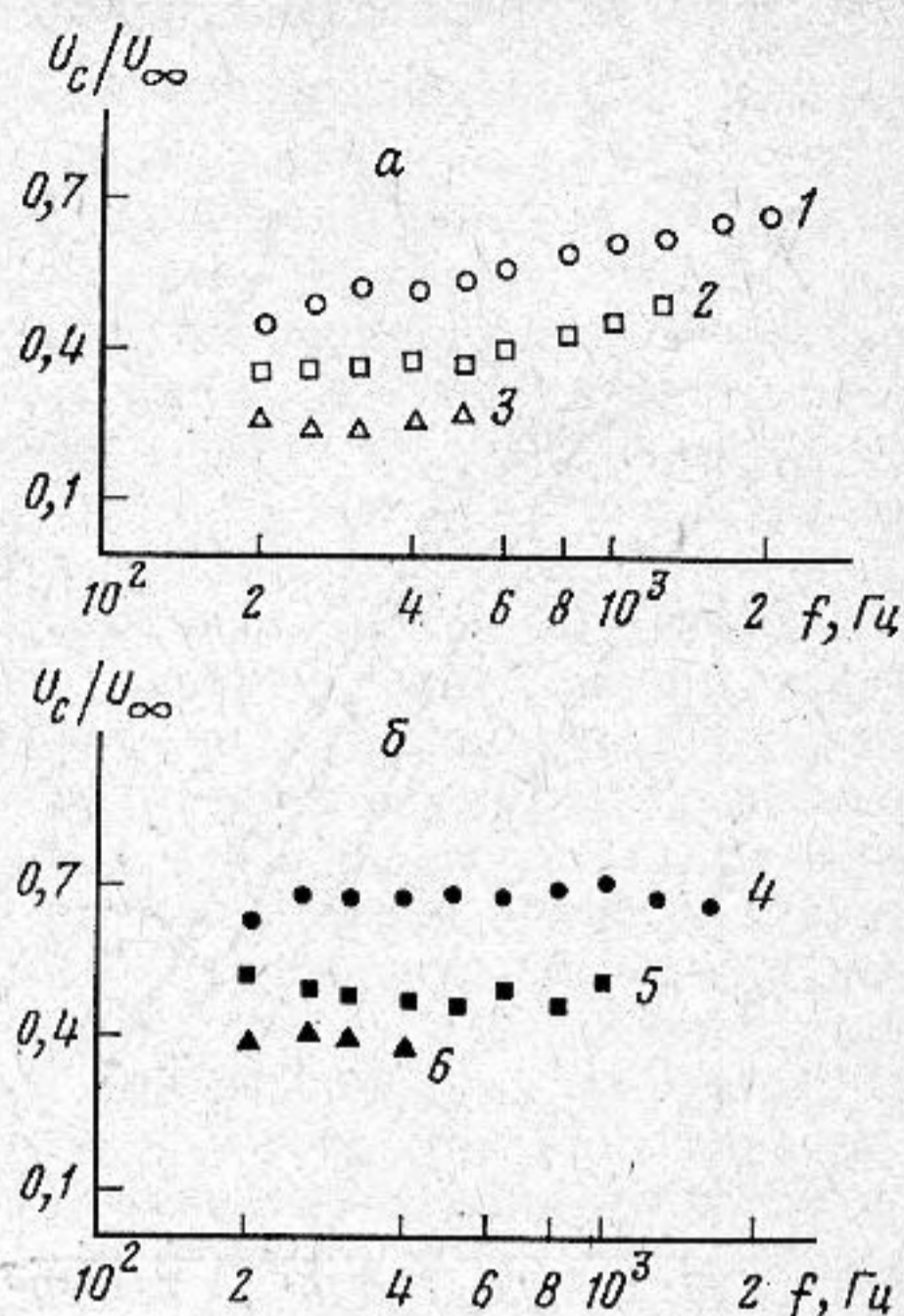
Примечательно, что влияние подачи жидкости на спектр пристеночных пульсаций давления можно оценить, располагая информацией лишь о толщине вытеснения управляемого турбулентного пограничного слоя. Некоторое отличие в изменении спектров пульсаций давления в случае подачи жидкости через перфорированный участок вызвано, по-видимому, следующим обстоятельством. При подаче жидкости через перфорированный участок рост пульсаций скорости в турбулентном ядре потока, возможно, был более значительным, чем при подаче жидкости через пористый участок. Кроме того, большие неоднородности на проницаемой границе, отличающие перфорированную поверхность от пористой, наверно, мешали возникновению слоя оттеснения с малыми значениями пульсаций. Только при очень сильной подаче жидкости ($v_n/U_\infty=0,04$) фактор оттеснения турбулентности от стенки, наконец, компенсировал рост пульсаций скорости — и наблюдаемые изменения пульсаций давления и толщины вытеснения пограничного слоя оказались примерно такими же, как и при подаче жидкости через пояс из пористого материала.

Рассмотрим результаты корреляционных измерений псевдозвуковых пульсаций давления. Корреляционный анализ выполнялся для режимов со скоростью набегающего потока $U_\infty = 5$ м/с. Производились измерения максимума коэффициента пространственно-временной корреляции R_m и характерной скорости сноса турбулентных возмущений U_c в третьоктавных полосах частот. Влияние подачи жидкости на характерную скорость сноса возмущений иллюстрирует фиг. 4, на



Фиг. 3

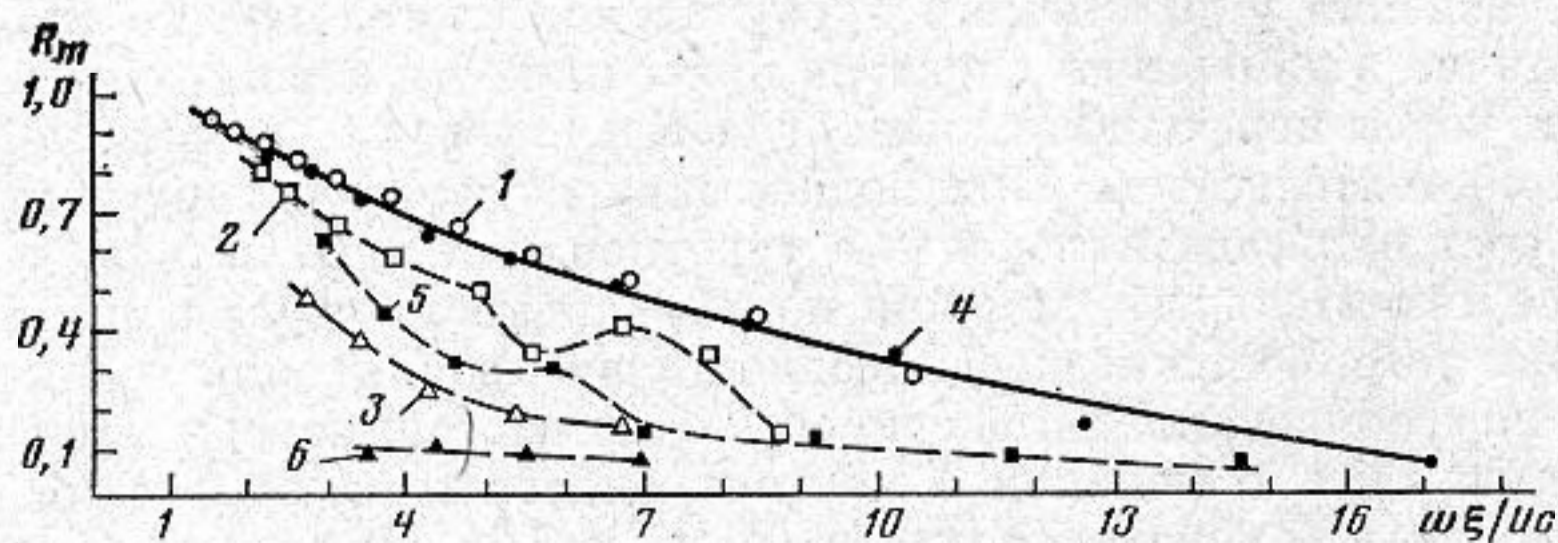
Фиг. 3. Нормированные спектры пристеночных пульсаций давления в условиях подачи жидкости через пористый пояс (подача жидкости через пористый участок: при $U_\infty = 3$ м/с; 1 — $v_n/U_\infty = 0$, 2 — 0,0055, 3 — 0,011, 4 — 0,027; при $U_\infty = 5,5$ м/с; 5 — 0, 6 — 0,014, 7 — 0,0275, 8 — 0,0225; подача жидкости через перфорированный участок: при $U_\infty = 3$ м/с; 9 — 0,025, 10 — 0,042; при $U_\infty = 5$ м/с; 11 — 0,0175; 12 — 0,028; $d/\delta_0^* = 0,8$, где d — диаметр датчика давления, δ_0^* — толщина вытеснения неуправляемого пограничного слоя)



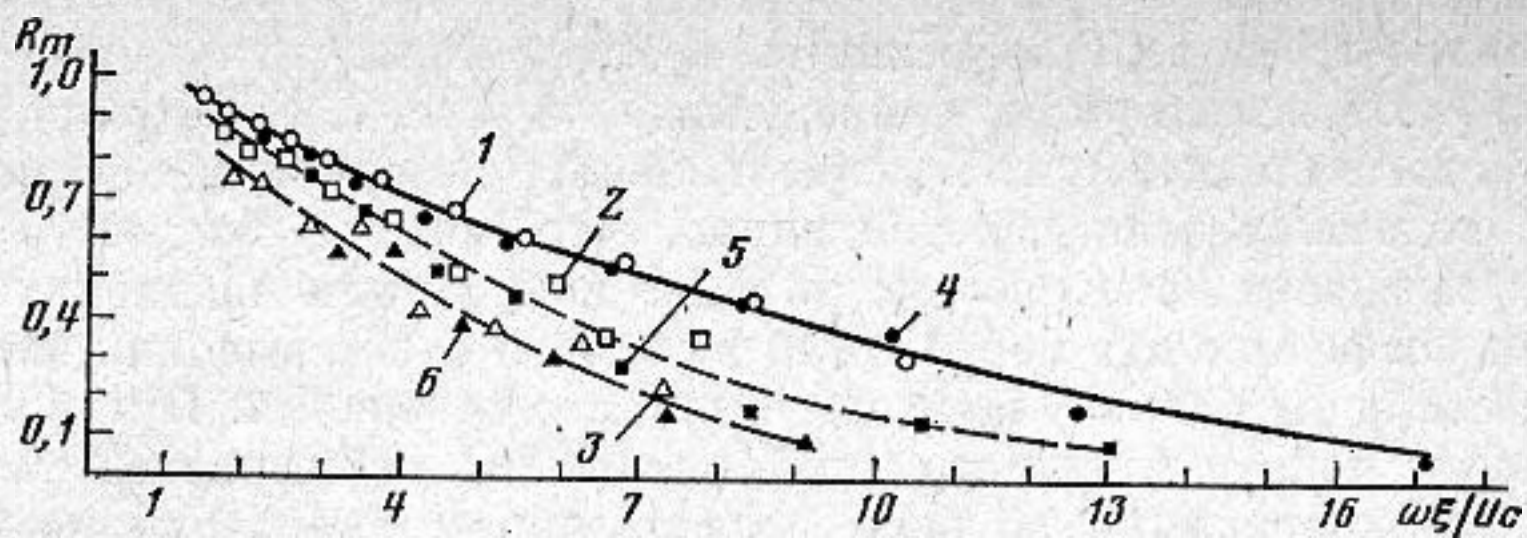
Фиг. 4

Фиг. 4. Влияние подачи жидкости через пояс из пористого материала на скорости сноса пристеночных турбулентных возмущений ($U_\infty = 5,5$ м/с; а — $\xi = 3$ мм; 1 — $v_n/U_\infty = 0$, 2 — 0,014, 3 — 0,0225; б — $\xi = 6$ мм; 4 — 0, 5 — 0,014, 6 — 0,0225)

которой приводятся данные, полученные в условиях подачи жидкости через пористый участок. Из анализа приведенных зависимостей видно, что по мере увеличения интенсивности подачи жидкости скорость сноса турбулентных возмущений уменьшается. При $v_n/U_\infty = 0,0225$ скорость сноса возмущений уменьшилась примерно в 2 раза. Характер изменения скорости сноса турбулентных возмущений в случае подачи жидкости через перфорированный участок был примерно таким же. Разница заключалась только в степени уменьшения скорости сноса возмущений. Если в опытах с пористым участком при $v_n/U_\infty = 0,0225$ скорость сноса возмущений упала до $\sim 0,3U_\infty$ ($\xi = 3$ мм, где ξ — расстояние между приемниками



Фиг. 5. Зависимость максимума коэффициента продольной корреляции пристеночных пульсаций давления от частоты в случае подачи жидкости через пояс из пористого материала ($U_\infty = 5,5$ м/с; $\xi = 3$ мм; 1 — $v_n/U_\infty = 0$, 2 — 0,014, 3 — 0,0225; $\xi = 6$ мм; 4 — 0, 5 — 0,014, 6 — 0,0225)



Фиг. 6. Зависимость максимума коэффициента продольной корреляции пристеночных пульсаций давления от частоты в случае подачи жидкости через пояс из перфорированного материала ($U_\infty=5$ м/с; $\xi=3$ мм; 1 - $v_n/U_\infty=0$, 2 - 0,014, 3 - 0,0225; $\xi=6$ мм; 4 - 0, 5 - 0,014, 6 - 0,0225)

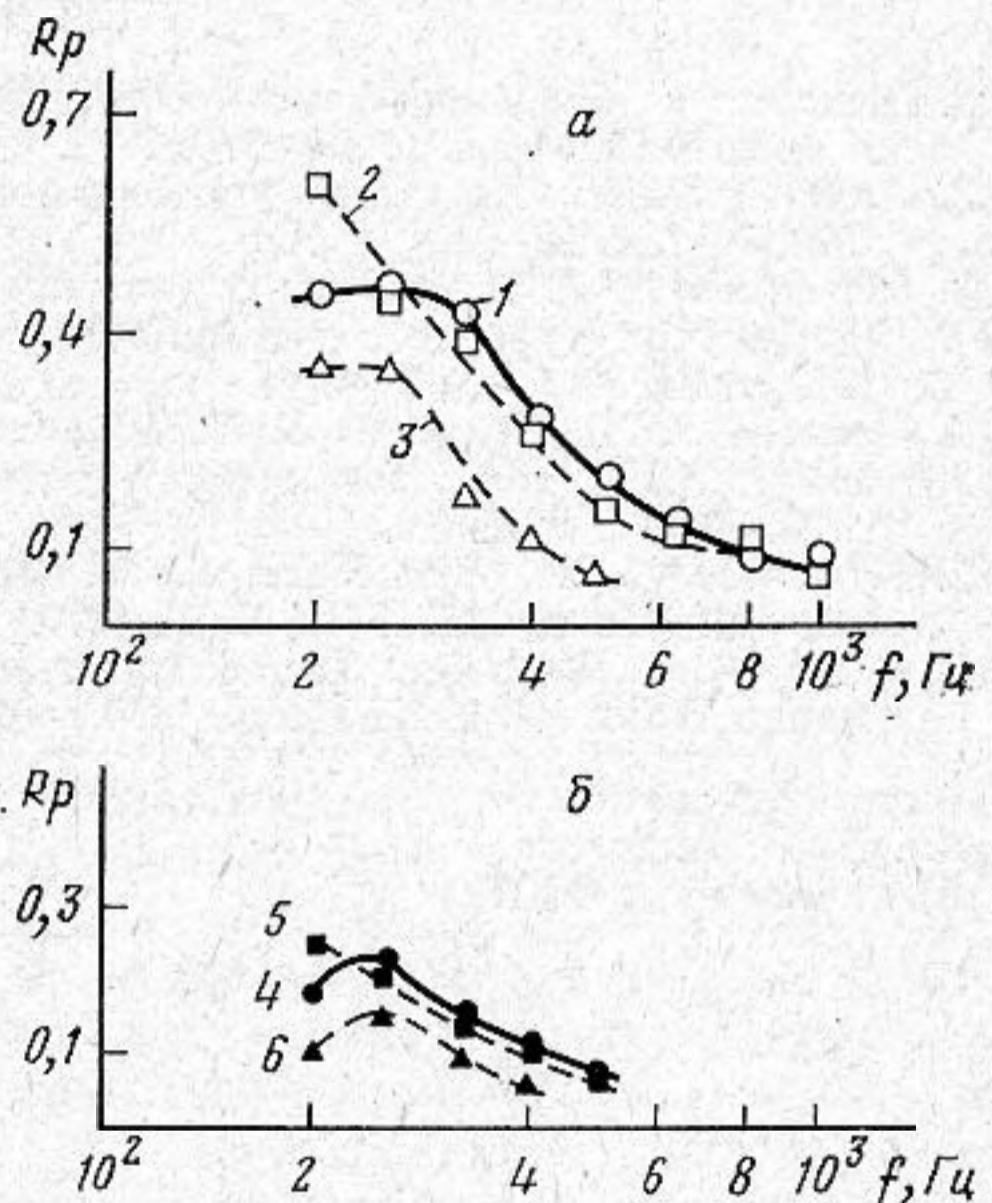
давления), то при подаче жидкости через перфорированный участок в аналогичных условиях $U_c=0,4U_\infty$.

На фиг. 5 представлены максимумы коэффициентов продольной пространственно-временной корреляции R_m , полученные в условиях подачи жидкости через пористый участок, в зависимости от безразмерной частоты $\omega^*=\omega\xi/U_c$ ($\omega=2\pi f$). В качестве U_c брались значения скорости сноса возмущений, измеренные на соответствующих режимах в управляемом пограничном слое. Сплошная линия осредняет экспериментальные точки, полученные в неуправляемом пограничном слое при разных ξ , пунктирные линии осредняют результаты измерений в условиях подачи жидкости. Подача жидкости приводит к снижению пристеночных пульсаций давления в продольном направлении. Чем интенсивность подачи жидкости больше, тем значительнее уменьшение корреляции. В экспериментах с пористым участком при $v_n/U_\infty=0,0225$ максимум коэффициента продольной пространственно-временной корреляции в случае расстояния между точками наблюдения $\xi=6$ мм упал до 0,1 во всем исследованном диапазоне частот.

Зависимость максимума коэффициента продольной пространственно-временной корреляции R_m от безразмерной комбинации $\omega\xi/U_c$ в случае подачи жидкости через перфорированный участок показана на фиг. 6. По мере увеличения интенсивности подачи жидкости коррелированность пристеночных пульсаций давления в продольном направлении уменьшается, однако

в меньшей степени, чем при подаче жидкости через пористый участок. Отличие заключается еще и в том, что в условиях подачи жидкости через перфорированный участок значения коэффициента корреляции при разных ξ , если их откладывать в зависимости от безразмерной комбинации $\omega\xi/U_c$, группируются, правда с некоторым разбросом, вокруг единой кривой (для заданного расхода), в то время как при подаче жидкости через пористый участок имеет место явное расслоение кривых, соответствующих и разным расходам, и разным расстояниям между точками наблюдения.

Влияние подачи жидкости на максимум коэффициента поперечной про-



Фиг. 7. Зависимость коэффициента поперечной корреляции пристеночных пульсаций давления от частоты в условиях подачи жидкости через пояс из пористого материала ($U_\infty=5$ м/с; а - $\xi=3$ мм; 1 - $v_n/U_\infty=0$, 2 - 0,014, 3 - 0,0225; б - $\xi=6$ мм; 4 - 0, 5 - 0,014, 6 - 0,0225)

странственно-временной корреляции пристеночных пульсаций давления иллюстрируют зависимости, приведенные на фиг. 7. Коэффициент корреляции достигает максимума R_p при нулевой временной задержке. Из анализа приведенных зависимостей видно, что подача жидкости ($v_n/U_\infty = -0,014$) вызывает некоторое увеличение корреляции на низких частотах, значения коэффициента корреляции в области более высоких частот практически совпадают со случаем естественного обтекания. При большой интенсивности подачи жидкости ($v_n/U_\infty = 0,0225$) наблюдается уменьшение поперечной корреляции во всем исследованном диапазоне частот.

Итак, интенсивная подача жидкости через проницаемый участок обтекаемой поверхности по нормали к ней вызывает существенное уменьшение спектральной плотности мощности и коррелированности пристеночных пульсаций давления. Уменьшение интенсивности и коррелированности пристеночных пульсаций давления в однородном турбулентном пограничном слое происходит, несмотря на увеличение при подаче жидкости толщины пограничного слоя и интенсивности пульсаций скорости в турбулентном ядре течения. Основными причинами наблюдаемых снижений, по-видимому, являются отеснение турбулентности от стенки и образование в пристеночной области слоя с низким уровнем пульсаций скорости, а также ослабление корреляционных связей в турбулентном потоке над проницаемой стенкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lymshew L. M.* Acoustics of controlled boundary layer.— Proc. VII Int. Congr. Acoust. Budapest, 4, p. 377–380, 1971.
2. *Лямшев Л. М.* Акустика управляемого пограничного слоя.— Вестн. АН СССР, 1973, № 7, с. 22–31.
3. *Шустиков А. Г.* К вопросу о динамических связях пульсаций давления и скорости внутри турбулентных потоков при малых числах Маха.— Акуст. журн., 1983, т. 29, № 5, с. 693–699.
4. *Лямшев Л. М., Челноков Б. И., Шустиков А. Г.* Пульсации давления в турбулентном пограничном слое водного потока при вдуве газа.— Акуст. журн., 1983, т. 29, № 6, с. 812–819.
5. *Курьянов Б. Ф., Медведева Л. Е.* Гармонический анализ стационарных случайных процессов. ОНТИ ВЦ МГУ, 1970.
6. *Blake W. K.* Turbulent Boundary Layer Wall-Pressure Fluctuations on Smooth and Rough Walls.— J. Fluid Mech., 1970, v. 44, № 4, p. 637–660.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
1.VII.1983