

УДК 534.2:532.526.3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОМ ОТСАСЫВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

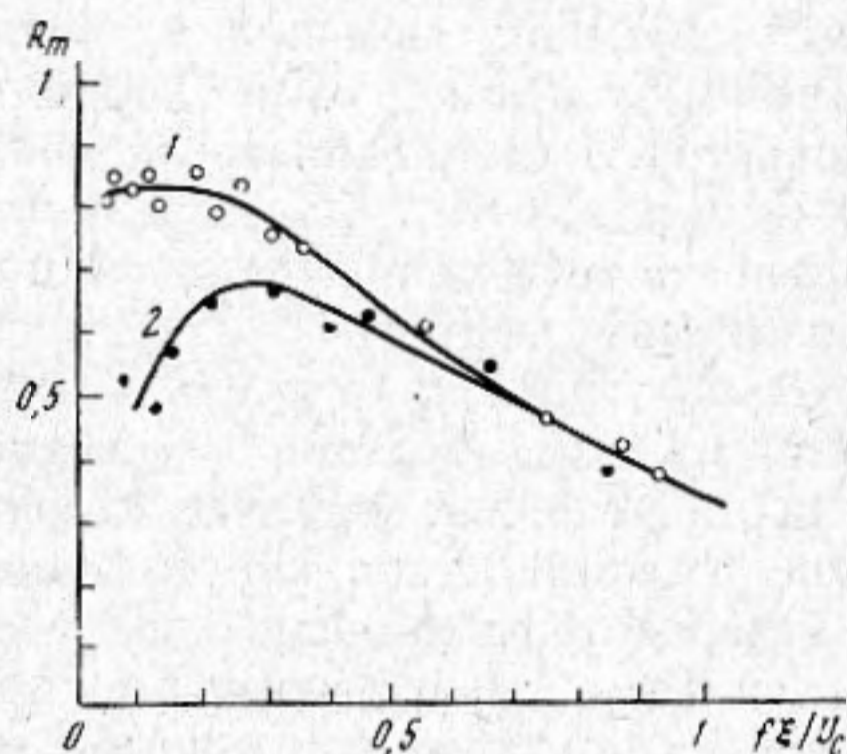
Л. М. Лямшев, М. Г. Пузино, С. А. Салосина

Приведены результаты экспериментального исследования влияния отсасывания жидкости из турбулентного пограничного слоя на спектральные и корреляционные характеристики пристеночных пульсаций давления.

Отсос пограничного слоя известен в аэродинамике как один из способов управления пограничным слоем, применяемый для решения задачи улучшения качества летательных аппаратов: снижения аэродинамического сопротивления и увеличения подъемной силы несущих элементов. При помощи отсоса можно сохранить ламинарный режим течения в пограничном слое на большей части поверхности движущегося тела. В этом случае сопротивление трения на границе тела существенно снижается. При отсасывании жидкости из развитого турбулентного пограничного слоя касательное напряжение трения на стенке возрастает, однако уровень турбулентности уменьшается, причем максимум распределения турбулентных напряжений отодвигается от стенки во внутреннюю область пограничного слоя.

Отсос пограничного слоя может быть использован для снижения интенсивности шума пограничного слоя [1-3]. К настоящему времени имеются сравнительно подробные данные о том, как изменяются осредненные гидродинамические параметры обтекания и в случае искусственной ламинаризации пограничного слоя, и при отсасывании жидкости из развитого турбулентного пограничного слоя [4, 5]. Сведения о влиянии отсоса на корреляционные и спектральные характеристики пристеночных пульсаций давления весьма ограничены [6]. Между тем пристеночные пульсации давления образуют ближнее поле шума пограничного слоя. Знание характеристик пристеночных пульсаций давления важно для оценки интенсивности шума пограничного слоя вдали от движущегося тела.

Ниже излагаются результаты лабораторных исследований влияния распределенного отсасывания жидкости из турбулентного пограничного слоя на спектры и корреляцию пристеночных пульсаций давления на модели крыла. Измерения проведены в гидродинамической трубе замкнутого типа НИИ механики МГУ.



Фиг. 1. Коэффициент продольной корреляции пульсаций давления в функции безразмерной частоты при $\xi/\delta^* = 2$ (кривая 1) и при $\xi/\delta^* = 3,5$ (кривая 2)

Модель симметричного крылового профиля НАСА-0012 имела проницаемую боковую поверхность, выполненную из пористого материала и непроницаемую носовую часть, хвостовик, верхнюю и нижнюю крышки. Длина хорды модели равнялась 500 мм, а размах модели — 120 мм. Протяженность проницаемой боковой поверхности равна 407 мм; толщина пористого материала — 2,6 мм. Наружные размеры пор ~ 150 мк, шероховатость пористого материала ~ 40 мк. Камерой отсоса служила вся внутренняя полость модели. Отсасывание жидкости из пограничного слоя осуществлялось через проницаемую боковую поверхность за счет перепада давлений между рабочим участком гидротрубы и атмосферой. Плавная регулировка расхода достигалась изменением гидравлического сопротивления сливного трубопровода. Выбранный вариант системы для отбора жидкости из пограничного слоя позволил обеспечить при измерениях достаточно низкий уровень акустических и вибрационных помех. Было также выяснено, что незначительная неравномерность поля давления внутри камеры отсоса не оказывала сколько-нибудь заметного влияния на результаты измерений.

Модель устанавливалась в прямоугольной рабочей части трубы под нулевым углом атаки. Постановка модели была типичной для изучения плоского обтекания крыльев. Для обеспечения турбулентного режима течения вдоль всей поверхности модели на носу был установлен турбулизатор.

Заподлицо с боковой поверхностью модели на разных расстояниях от носовой оконечности были заделаны идентичные приемники пульсаций давления с диаметром чувствительной поверхности 1,5 мм.

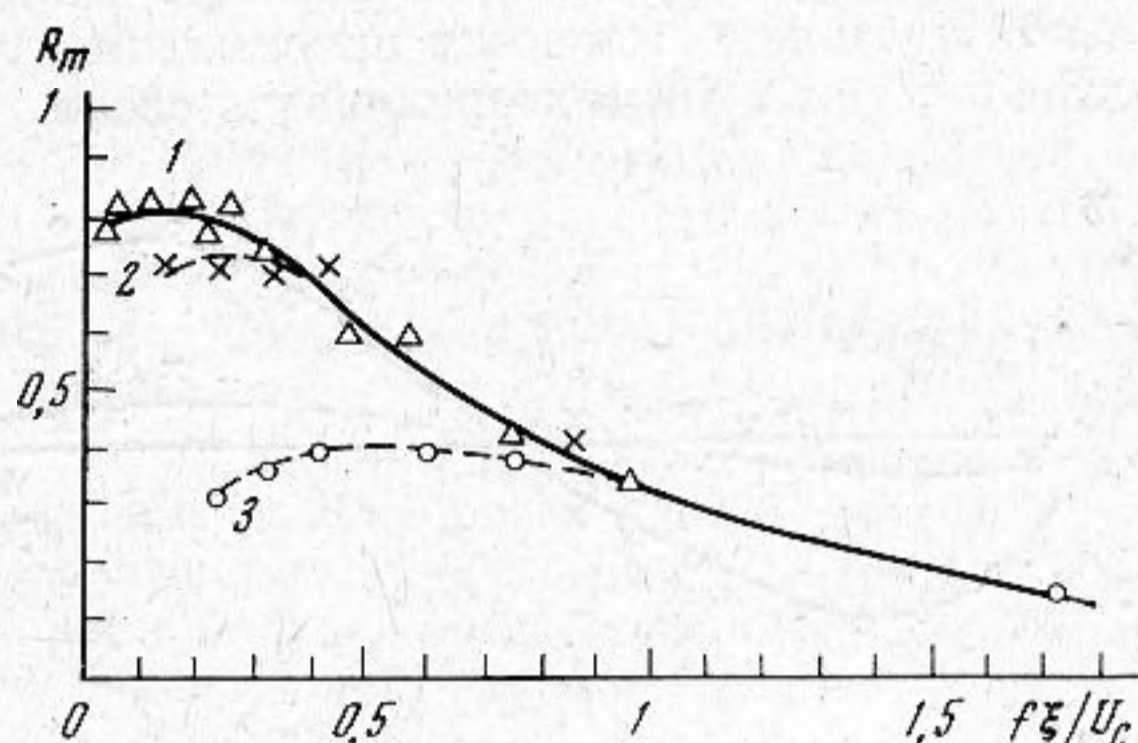
В процессе экспериментов производилась одновременная регистрация гидродинамических параметров обтекания (скорости набегающего потока, статического давления в гидротрубе, суммарного расхода отсасываемой жидкости) и характеристик пристеночных пульсаций давления на поверхности модели крыла. Сигналы с приемников пульсаций давления после предварительного усиления записывались на многоканальный магнитофон. Измерение спектральных и корреляционных характеристик пристеночных пульсаций давления проводилось в диапазоне частот 100 гц — 10 кгц. Скорость набегающего потока u_∞ изменялась от 3 до 18 м/сек; соответствующий диапазон изменения числа Рейнольдса составил $10^6 < Re < 10^7$ ($Re = u_\infty b / \nu$, где b — длина хорды крыла, ν — коэффициент кинематической вязкости). Интенсивность распределенного отсоса изменялась в пределах $10^{-4} \leq v_0 / u_\infty \leq 2 \cdot 10^{-2}$ (v_0 — средняя скорость отсасывания жидкости на поверхности тела). Спектральный и корреляционный анализ полученных данных проведен в третьоктавной полосе частот.

Прежде чем приступить к изучению влияния распределенного отсасывания на характеристики пульсаций давления, была проведена серия измерений в условиях неуправляемого пограничного слоя. Были получены спектры мощности и корреляционные зависимости пристеночных пульсаций давления, типичные для развитого турбулентного пограничного слоя.

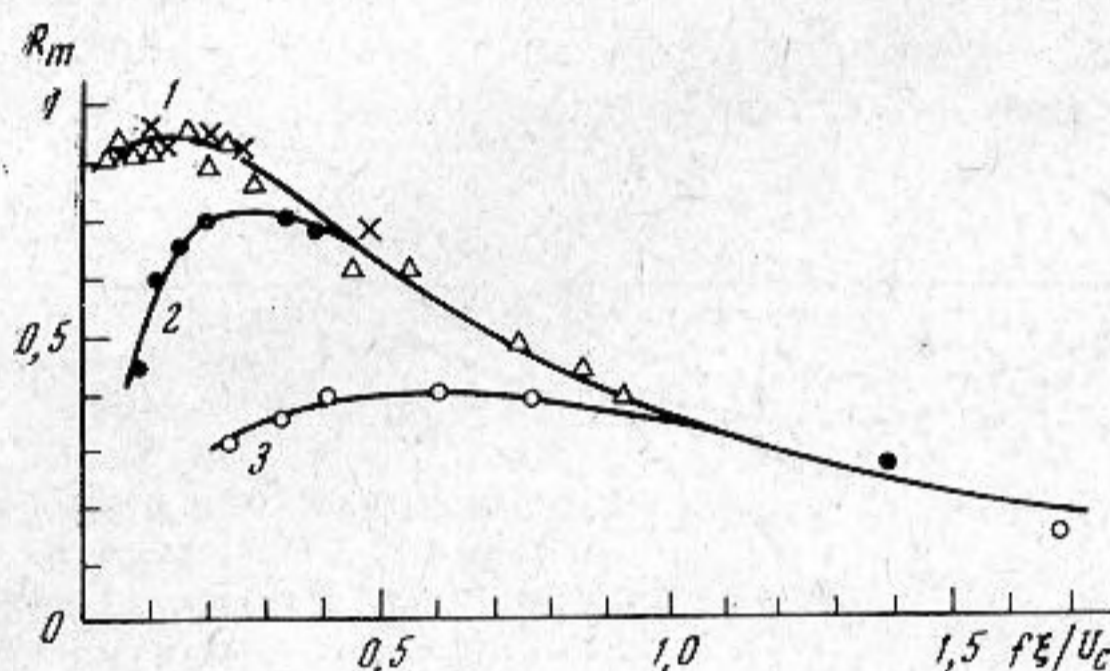
На фиг. 1 представлены графики коэффициента продольной пространственно-временной корреляции пульсаций давления в неуправляемом пограничном слое на поверхности модели крыла в зависимости от безразмерной частоты $f\xi/u_c$, где f — частота колебаний, ξ — расстояние между приемниками, u_c — скорость переноса, определяемая из корреляционных измерений. Корреляционные измерения проводились в третьоктавной полосе частот. Можно видеть расслоение кривых в низкочастотной области в зависимости от безразмерного параметра ξ/δ^* (толщина вытеснения δ^* была определена теоретически). Представленные результаты подтверждают тот факт, что в области низких частот корреляция пристеночных пульсаций давления определяется толщиной вытеснения пограничного слоя, а не длиной гидродинамической волны $\lambda_r = u_c/f$, как на высоких частотах, где практически не наблюдается различия в значениях коэффициента корреляции [7, 8].

Результаты, изображенные на фиг. 2, иллюстрируют влияние распределенного отсасывания жидкости из турбулентного пограничного слоя на ко-

ээффициент продольной пространственно-временной корреляции пристеночных пульсаций давления. Параметром является интенсивность отсасывания v_0/u_∞ . Данные получены при скорости набегающего потока $u_\infty = 4$ м/сек. Сплошной линией обозначены результаты для неуправляемого пограничного слоя, пунктирной линией — результаты при распределенном отсасыва-



Фиг. 2. Коэффициент продольной корреляции пульсаций давления в функции безразмерной частоты при фиксированной скорости набегающего потока для различных значений v_0/v_∞ :
 1 — 0, 2 — $3,5 \cdot 10^{-3}$, 3 — $1,3 \cdot 10^{-2}$



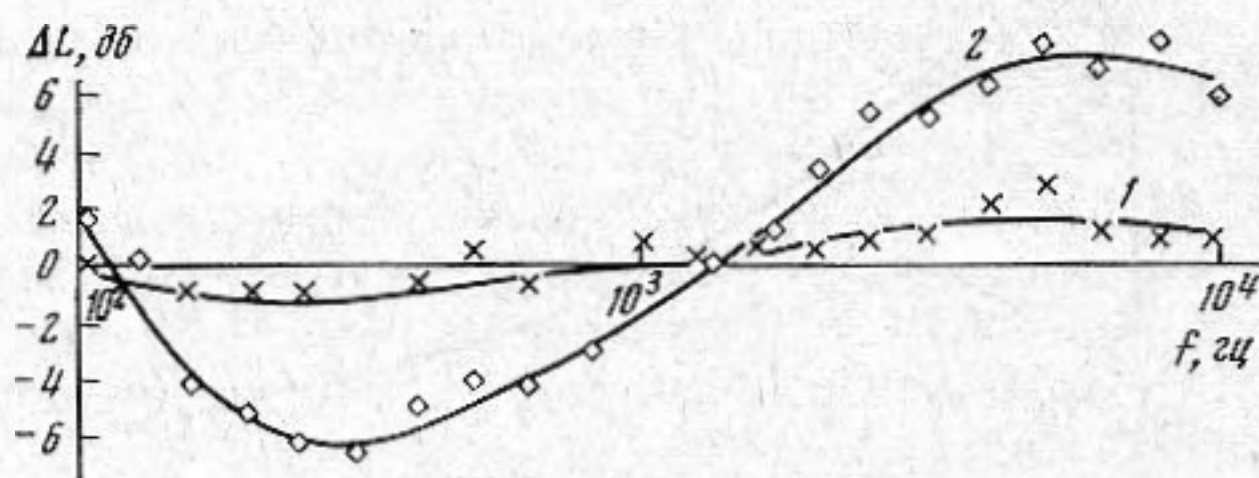
Фиг. 3. Коэффициент продольной корреляции пульсаций давления в функции безразмерной частоты при фиксированном количестве отсасываемой жидкости $Q = Q_{max}$ для различных значений скорости набегающего потока: 1 — 16, 2 — 8, 3 — 4 м/сек; треугольниками обозначены экспериментальные результаты для неуправляемого пограничного слоя

нии жидкости. Можно видеть, что увеличение интенсивности отсасывания приводит к уменьшению коэффициента продольной корреляции пристеночных пульсаций давления в области низких частот. По-видимому, уменьшение корреляции обусловлено тем, что с ростом интенсивности отсоса жидкости из пограничного слоя уменьшается толщина пограничного слоя и толщина вытеснения.

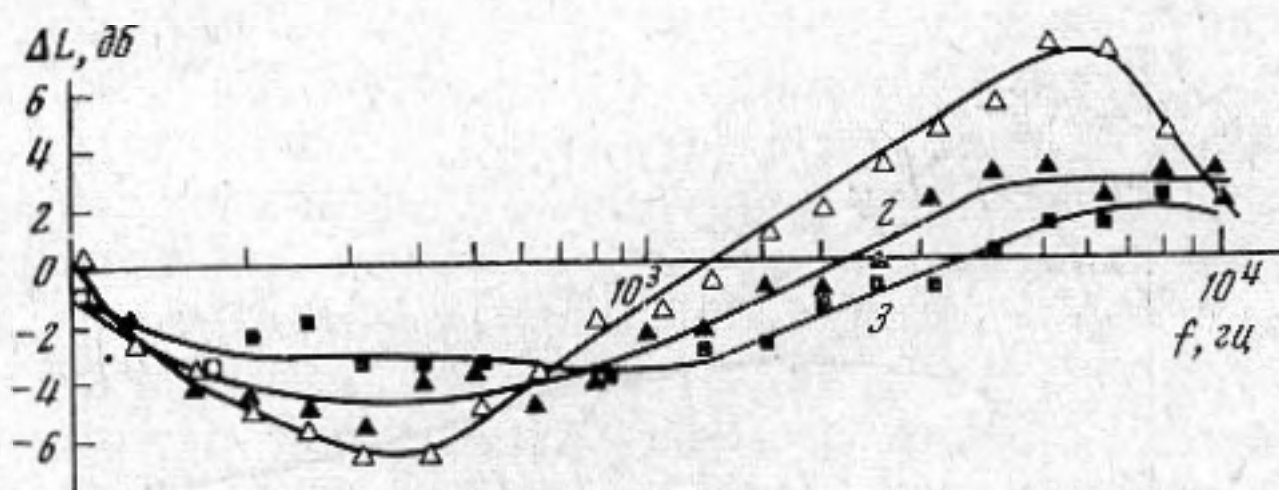
Данные, представленные на фиг. 3, получены в экспериментах при одном фиксированном количестве (Q_{max}) отсасываемой жидкости из пограничного слоя, но при разных значениях скорости набегающего потока. Как и на фиг. 2, имеет место уменьшение коэффициента продольной корреляции пристеночных пульсаций давления в области низких частот, причем наименьшие изменения по сравнению с неуправляемым пограничным слоем наблюдаются при скорости обтекания 16 м/сек, когда в исследуемом диапазоне интенсивностей отсасывания не удалось существенно изменить толщину вытеснения пограничного слоя.

Наглядное представление об эффекте воздействия отсоса на спектральную плотность мощности пристеночных пульсаций давления дает фигура 4.

На графике по оси ординат отложена разница в децибелах (ΔL , дб) между уровнем спектра при отсосе и уровнем спектра для неуправляемого пограничного слоя; по оси абсцисс — частота колебаний (f , гц). Установлено, что отсасывание жидкости из турбулентного пограничного слоя приводит к трансформации спектра: в области низких частот наблюдается снижение спектрального уровня ($\Delta L < 0$), а в области высоких частот — повышение ($\Delta L > 0$) спектральной плотности мощности пристеночных пульсаций давления по сравнению с неуправляемым пограничным слоем.



Фиг. 4. Разность уровней пристеночных пульсаций давления при отсосе и без отсоса в функции частоты при фиксированной скорости набегающего потока для различных значений v_0/v_∞ : 1 — $1,5 \cdot 10^{-3}$, 2 — $9 \cdot 10^{-3}$



Фиг. 5. Разность уровней пристеночных пульсаций давления при отсосе и без отсоса в функции частоты при максимальном количестве отсасываемой жидкости для различных значений скорости набегающего потока: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 16 м/сек

При увеличении интенсивности отсасывания эффект снижения мощности пульсаций давления возрастает в диапазоне частот $150 \text{ гц} \leq f \leq 2 \text{ кгц}$. Это явление можно объяснить следующим образом. Известно, что амплитуда пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое прямо пропорциональна произведению градиента средней скорости на величину нормальной компоненты флуктуаций скорости [9, 10]. При отсасывании жидкости из пограничного слоя градиент средней скорости в основной части пограничного слоя и нормальная составляющая флуктуационной скорости уменьшаются. Это и приводит к уменьшению спектральной плотности мощности пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое на низких частотах.

Подъем кривых в высокочастотной части спектра ($\Delta L > 0$), как было установлено с помощью корреляционного анализа, обусловлен появлением шума, вызываемого отсасыванием жидкости через пористую поверхность.

Заметим, что с ростом скорости набегающего потока эффект снижения мощности пульсаций давления уменьшается, а высокочастотная добавка постепенно исчезает (см. фиг. 5). Уменьшение эффекта воздействия отсоса объясняется тем, что при увеличении скорости набегающего потока становится меньше относительное изменение толщины вытеснения пограничного слоя δ_A^*/δ_0^* (где δ_A^* — толщина вытеснения пограничного слоя при отсосе,

δ_0^* — толщина пограничного слоя без отсоса). Что касается изменения величины $\Delta L > 0$ на высоких частотах, то, по-видимому, при небольших скоростях набегающего потока звук, излучаемый при отсасывании, преобладает над псевдозвуковыми пульсациями давления. При больших скоростях u_∞ интенсивность турбулентных пульсаций давления резко возрастает, и звук, излучаемый при отсосе, по уровню оказывается значительно ниже. Представленные на фиг. 4 и 5 результаты находятся в согласии с выводами, полученными с помощью корреляционного анализа: чем меньше скорость обтекания, тем сильнее трансформируется низкочастотная часть спектра и уменьшается корреляция между пульсациями давления при отсасывании жидкости из пограничного слоя.

Итак, на основе полученных результатов можно сделать следующий вывод: увеличение интенсивности распределенного отсасывания жидкости из развитого турбулентного пограничного слоя приводит к уменьшению продольной пространственной корреляции и уменьшению спектральной плотности мощности пристеночных пульсаций давления в области низких частот. С другой стороны, в высокочастотной части спектра имеется подъем, обусловленный звуковым излучением, возникающим при прохождении жидкости через проницаемую поверхность. Величина этого подъема зависит от интенсивности отсасывания и соотношения между звуковой и псевдозвуковой составляющей сигнала. На корреляционные характеристики пристеночных пульсаций давления в высокочастотной области спектра отсасывание жидкости из пограничного слоя не влияет.

В заключение авторы благодарят Ю. В. Курилкина и Л. В. Тихомирову за помощь в подготовке экспериментов и обработке результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Лямшев. К расчету излучения звука при отсасывании пограничного слоя. Акуст. ж., 1968, 14, 3, стр. 416–422.
2. L. M. Lamshew. Acoustics of controlled boundary layer. Proc. VII Int. Congr. Acoust. Budapest, 1971, 4, 377–380.
3. Л. М. Лямшев. О шуме управляемого пограничного слоя. В сб.: Морское приборостроение. Сер. Акустика. 1972, 1, 126–137.
4. А. М. Басин, А. И. Короткин, Л. Ф. Козлов. Управление пограничным слоем судна, Л., «Судостроение», 1968.
5. A. Favre, R. Dumas, E. Verolett, M. Coantic. Coch limite turbulent sur paroi porreuse avec aspiration. J. de Méc. 1966, 5, 1, 3–28.
6. Н. К. Андреев. Характеристики пульсаций турбулентного давления при распределенном отсосе. В сб.: Тепло- и массоперенос, 1, ч. 1. Минск, 1972, 29–33.
7. И. Ф. Кадыков, Л. М. Лямшев. О влиянии полимерных добавок на флуктуации давления в пограничном слое. Акуст. ж., 1970, 16, 1, 75–80.
8. А. В. Смольяков. О взаимном спектре псевдозвуковых турбулентных давлений в низкочастотной области. Акуст. ж., 1970, 16, 2, 291–295.
9. R. H. Kraichnan. Pressure fluctuations in turbulent flow over a flat plate. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 3, 378–384.
10. G. M. Corcos. The structure of the turbulent pressure field in boundary layer flows. J. fluid Mech., 1964, 18, 3, 353–373.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
30 мая 1973 г.