

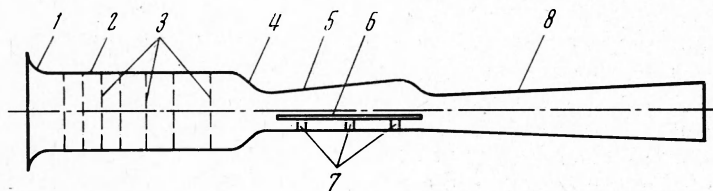
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ
В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПРОНИЦАЕМОЙ
ПЛАСТИНЕ**

А. И. Алимиев, В. Н. Мажонов, Б. П. Миронов

(Новосибирск)

Приводятся результаты измерений пульсационных характеристик турбулентного пограничного слоя на плоской проницаемой пластине в диапазоне изменения параметра вдува от 0 до 20. Показано, что при сверхкритических вдувах вблизи поверхности существует зона, в которой энергетические спектры пульсаций скорости не меняются с увеличением расстояния от поверхности и отличаются от спектров в ядре пограничного слоя.

В работах [1-4] экспериментально показано, что при сильных вдувах, превышающих критические, на проницаемой поверхности возникает характерный «слой оттеснения». В этом слое практически равны нулю градиенты продольной скорости, температуры, концентрации по нормали к поверхности. Пульсации скорости в этом слое существенно меньше, чем



Фиг. 1

в остальной части пограничного слоя. Представляет интерес проследить в этих условиях за изменением по нормали к поверхности других характеристик пограничного слоя, в частности энергетического спектра пульсаций скорости.

Эксперименты проводились на дозвуковой аэродинамической трубе разомкнутого типа, работающей на всасывание (фиг. 1). Диапазон скорости в рабочей камере составлял $2 \div 70$ м/сек с интенсивностью турбулентности потока $\varepsilon \approx 0.1\%$. Сравнительно низкая степень интенсивности турбулентности потока достигалась благодаря наличию профилированного входного сопла 1, форкамеры 2 с успокоительными сетками 3 (размер ячейки 2×2 мм²), десятикратному поджатию потока в конфузоре 4. Длина форкамеры 1500 мм, сечение 680×680 мм². Рабочая камера имела длину 1400 мм, ширину 200 мм, высота ее могла изменяться от 100 до 300 мм благодаря гибкой верхней стенке 5. Рабочий участок 6, на котором исследовался пограничный слой, представлял собой плоскую полую пластину из оргстекла длиной 1010 мм, шириной 154 мм и толщиной 22 мм. Передняя и задняя кромки имели обтекаемую форму. Пластина крепилась к нижней стенке рабочей камеры шестью опорами 7, имеющими хорошо обтекаемую форму поперечного сечения. Высота опор 53 мм. На верхней плоскости рабочего участка были расположены три пористые пластины

размером $278 \times 120 \times 8$ мм³. Под каждой пластиной имелась изолированная полость. Вдуваемый воздух поступал в каждую полость по отдельному воздушному тракту. Пористые пластины спекались из порошка полиметилметакрилата Л-1 с диаметром частиц 0.1 мм. Технология спекания была следующей: порошок засыпался в медную форму, прогревался до температуры $160 \div 180^\circ \text{C}$, выдерживался в течение двух часов при этой температуре, после чего производилось прессование его с помощью крышки формы до получения нужной степени пористости. Равномерность проницаемости пластин контролировалась по методике, описанной в работе [5].

После рабочей камеры поток проходил диффузор 8 длиной 2700 мм с малым углом раскрытия и попадал в ресивер объемом 140 м³. Из ресивера воздух отсасывался центробежным вентилятором, приводимым в движение электродвигателем постоянного тока. Ресивер отделен от диффузора глушителем для того, чтобы предотвратить проникновение акустического шума, возбуждаемого вентилятором и двигателем, в рабочую камеру.

Все измерения проводились на расстоянии 730 мм от передней кромки рабочего участка. Измерения профилей средней скорости, интенсивности турбулентности и энергетических спектров пульсаций скорости проводились с помощью термоанемометра постоянного сопротивления в полосе частот $10 \div 3000$ гц. Датчиком термоанемометра служила золоченая вольфрамовая нить диаметром 0.008 мм, длиной 2 мм, расположенная параллельно проницаемой стенке и перпендикулярно основному потоку. Расстояние нити датчика от проницаемой поверхности измерялось с помощью катетометра КМ-6 с точностью 0.005 мм. Средняя скорость потока регистрировалась вольтметром постоянного тока, пульсационная составляющая вектора скорости — среднеквадратичным вольтметром, параллельно которому подключался анализатор спектра.

Предварительные измерения скорости основного потока в горизонтальных сечениях на различных высотах от пористой пластины показали наличие зоны шириной $50 \div 60$ мм, где течение является двумерным даже при таких больших вдувах, когда $b \approx 20$. Здесь b — параметр вдува

$$b = \rho_w w_w^2 / \rho_0 w_0 c_{f0}$$

где ρ_0 и ρ_w — плотность вещества соответственно основного и вдуваемого потоков, w_0 и w_w — скорость потока соответственно на границе пограничного слоя и на выходе из пористой пластины, c_{f0} — коэффициент трения в стандартных условиях (на плоской непроницаемой поверхности в изотермических условиях).

Измерения профилей средней скорости на непроницаемой пластине подтвердили наличие в рассматриваемом сечении развитого турбулентного пограничного слоя. Профили скоростей, измеренные на проницаемой пластине при докритических вдувах, удовлетворительно совпадают с расчетом, проведенным в соответствии с работой [7] по формуле, которая неоднократно подтверждена опытными данными

$$\omega = 1 - \sqrt{\Psi + b(1 - \omega_0)} + \frac{1}{4} b(1 - \omega_0)^2 \quad (1)$$

$$\Psi = (1 - b/b_*)^2 \quad (2)$$

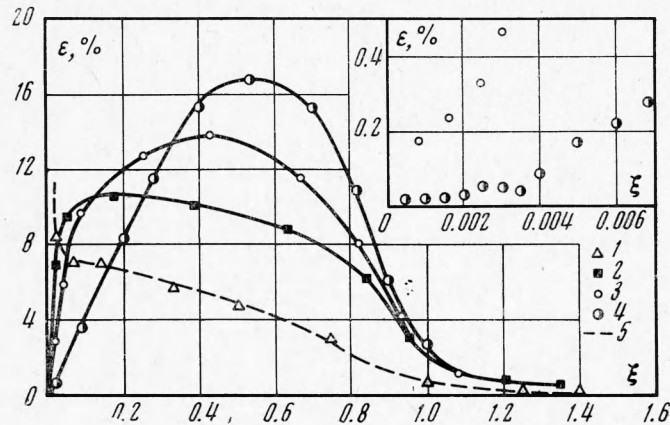
$$b_* = 4 [1 + 0.83/(\text{Re}^{**})^{0.14}] \quad (3)$$

$$\omega_0 = \xi^{1/n} \quad (4)$$

где $\Psi = (c_f/c_{f0})_{\text{Re}^{**}}$ — относительное изменение коэффициента трения при $\text{Re}^{**} = \text{idem}$, $\omega = w/w_0$ — безразмерная скорость в пограничном слое

на проницаемой пластине, Re^{**} — число Рейнольдса, определяемое по толщине потери импульса, ω_0 — профиль скорости на непроницаемой поверхности, $\xi = y/\delta$ — безразмерная ордината, отнесенная к толщине пограничного слоя δ , b_* — критический параметр вдува. При $b = b_*$ согласно (2) $\Psi = 0$. При $b > b_*$ на обтекаемой поверхности возникает слой оттеснения [1, 2, 4, 7]. Для условий проведенных опытов $n = 6$, что согласуется с оценками, представленными в работе [8].

Энергетические спектры пульсаций скорости измерялись в режиме последовательного анализа с помощью анализатора гармоник С5-3. При измерениях близко у стенки и на внешней границе пограничного слоя



Фиг. 2

сильно возрастает вклад шумов электронной схемы термоанемометра. Поэтому при обработке результатов величина шумов вычиталась из измеренного сигнала. Интенсивность указанных шумов и их энергетический спектр измерялись при расположении датчика термоанемометра в покоящейся среде.

Интенсивность турбулентности определялась согласно [6] по следующей формуле:

$$\epsilon = \frac{4u_\epsilon u}{u^2 - u_0^2} \omega \cdot 100\%$$

где u_ϵ — напряжение, измеренное среднеквадратичным вольтметром, u — напряжение, измеренное вольтметром постоянного тока, соответствующее средней скорости в точке измерения, u_0 — напряжение, соответствующее покоящейся среде.

Спектральная функция $\Phi(k)$ рассчитывалась по формуле

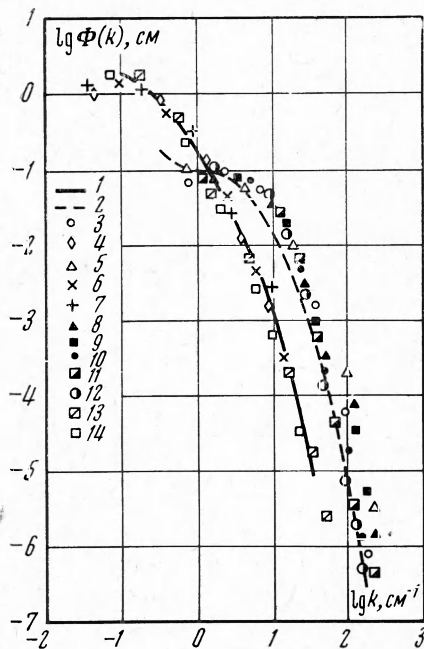
$$\Phi(k) = (w/2\pi\Delta f) (u_f^2/u_\epsilon^2)$$

где $k = 2\pi f/w$ — волновое число, u_f^2 — квадрат показания выходного прибора анализатора спектра, соответствующий энергии пульсации скорости на частоте f , u_ϵ^2 — энергия сигнала, поступающего на вход анализатора, во всем диапазоне частот, Δf — ширина полосы пропускания фильтра анализатора спектра, f — исследуемая частота.

На фиг. 2 приведены экспериментальные профили интенсивности турбулентных пульсаций модуля вектора скорости на непроницаемой и проницаемой поверхностях; 1 — $b = 0$, 2 — 4.65, 3 — 11.36, 4 — 18.16, 5 — $b = 0$ [9].

С увеличением параметра вдува максимум профиля интенсивности турбулентности растет и смещается к внешней границе пограничного слоя. Профиль интенсивности на непроницаемой поверхности удовлетворительно согласуется с аналогичными измерениями [9]. Профиль интенсивности пульсаций скорости на проницаемой поверхности качественно согласуется с данными работ [10,11].

В работе [12] измерялись раздельно продольные и поперечные пульсации скорости при малых вдувах. Было отмечено приближение к стенке



Фиг. 3

максимума интенсивности продольных пульсаций скорости при увеличении параметра вдува в диапазоне $b = 2.54 \div 3.0$. При $b = 3.8$ максимум начинал удаляться от стенки. Суммированием продольных и поперечных пульсаций скорости по этим данным было найдено распределение интенсивности пульсаций модуля вектора скорости по нормали к поверхности. Это распределение обнаруживает тенденцию к удалению максимума пульсаций от стенки с ростом вдува.

На фиг. 3 приведены экспериментальные энергетические спектры пульсаций на непроницаемой и проницаемой поверхностях. Кривые 1 и 2 — эксперименты [9], $b = 0$, $\xi = 0.58$ и 0.0011 соответственно, 3 и 4 — $b = 0$, $\xi = 0.004$ и 0.5 соответственно, 5 — $b = 5.33$, $\xi = 0.006$, 6 и 7 — $b = 3.72$, $\xi = 0.29$ и 0.69 соответственно, 8—14 — $b = 18.16$, $\xi = 0.0015$, 0.003 , 0.007 , 0.01 , 0.015 , 0.316 , 0.72 соответственно. Из этих графиков можно видеть, что на непроницаемой

поверхности энергетические спектры в широком диапазоне изменения ξ хорошо согласуются с известными результатами [9].

В непосредственной близости у стенки спектры располагаются в области больших волновых чисел и с удалением от стенки смещаются в область меньших волновых чисел. Для турбулентного ядра пограничного слоя эти спектры остаются практически неизменными. Такая же картина наблюдается и при наличии поперечного потока вещества в диапазоне изменения параметра вдува b от 0 до b_* . Более того, такое распределение спектров сохраняется по всему сечению пограничного слоя, за исключением области в непосредственной близости у стенки, даже при весьма больших вдувах ($b \approx 20$). В непосредственной близости у стенки энергетический спектр пульсаций скорости при сверхкритических вдувах остается неизменным для целой области.

Из фиг. 3 можно видеть, что для $b = 18.16$ протяженность этой области по ординате $\xi = 0 \div 0.015$ ($y = 0 \div 1.5$ мм).

Замечена также интересная особенность, заключающаяся в следующем. Внесением во вдуваемый поток дополнительных возмущений можно изменить энергетический спектр пульсаций скорости вблизи стенки. При сверхкритических вдувах эта новая форма энергетического спектра вблизи стенки обнаруживает тенденцию оставаться неизменной.

Рассмотрим более подробно результаты измерений интенсивности турбулентности и энергетических спектров пульсаций скорости при сверхкритическом вдуве ($b = 18.16$). Из фиг. 2 видно, что до высоты $\xi \approx 0.002$ интенсивность турбулентности мала и слабо меняется. Кроме того, из анализа осциллограмм, полученных с помощью шлейфового осциллографа, следует, что колебания скорости в этой области существенно отличаются по форме от турбулентных пульсаций в пограничном слое. Эти колебания носят сглаженный низкочастотный характер, в то время как турбулентные пульсации во внешней части пограничного слоя имеют форму острых высокочастотных пиков. Для внешней области пограничного слоя турбулентные пульсации скорости существуют в диапазоне частот $0 \div 3000$ гц и выше. Около стенки верхняя граница частотного диапазона соответствует ~ 500 гц.

Полученные результаты согласуются с выводом работы [1] о том, что при больших вдувах на проницаемой поверхности существует «слой оттеснения». Привлечение к анализу турбулентного пограничного слоя при сверхкритических вдувах энергетических спектров пульсаций скорости позволяет более уверенно регистрировать изменение режимов течения в этих условиях. Такой подход оказался успешным при изучении течения двухфазных жидкостей [13].

Поступила 2 VIII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин С. А., Зеленгур А. А., Мамонов В. Н., Миронов Б. П. Оттеснение в турбулентном пограничном слое на проницаемой поверхности при сверхкритическом вдуве. ПМТФ, 1969, № 1.
2. Леонтьев А. И., Миронов Б. П., Луговской П. П. Экспериментальное определение критического параметра вдува на пористой пластине. Инж.-физ. ж., 1966, т. 10, № 4.
3. Ершенок В. М., Ермаков А. Л., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. Н. Экспериментальное исследование влияния интенсивного вдува различных газов на турбулентный пограничный слой. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 1.
4. Миронов Б. П., Зеленгур А. А., Луговской П. П., Гомеларри А. В., Васечкин В. Н. Исследование турбулентного переноса в условиях сильного вдува, продольного градиента давления и неизотермичности. Тепло-массоперенос, т. 1, ч. 2. Минск, 1972.
5. Зеленгур А. А., Мамонов В. Н. Метод контроля газопроницаемости пористых металлов. Порошковая металлургия, 1969, № 11.
6. K i a t t F. The X hot-wire probe in a plane flow field. DISA Inform., 1969, No. 8.
7. Kutateladze S. S., Leont'ev A. I., Mironov B. P. Turbulent boundary layer with mass injection and longitudinal pressure gradient in the finite Reynolds number region. Papers JSME Semi-Internat. Sympos. Tokyo, 1967, vol. 1. Tokyo, s. a., 225—231.
8. Репик Е. У. Приближенный расчет турбулентного пограничного слоя при наличии градиента давления. Техн. отчет ЦАГИ, 1960, вып. 167.
9. Klebanoff P. S. Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient. NASA, Rept 1247, 1955.
10. Вулдридж, Муцци. Измерение турбулентности в пограничном слое с подводом массы и горения. Ракетная техника и космонавтика, 1966, № 11.
11. Ершенок В. М., Ермаков А. А., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. Н. Исследование осредненных и пульсационных характеристик турбулентного пограничного слоя на проницаемой поверхности. Тепло-массоперенос, т. 1, ч. 1, Минск, 1972.
12. Миронов Б. П., Луговской П. П. Исследование течения в пристенной области турбулентного пограничного слоя со вдувом. Инж.—физ. ж., 1972, т. 22, № 3.
13. Хаббард М. Д., Даклер А. Э. Характеристики режимов течения горизонтального двухфазного потока. В сб. «Достижения в области теплообмена», М., «Мир», 1970.