

УДК 532.526.4

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ПЛАСТИНЕ ПРИ ОТСОСЕ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ УГЛАМИ К СТЕНКЕ

ДУНАЕВА Е. В., ЕРОШЕНКО В. М., КЛИМОВ А. А.,
КОНДРАТЬЕВ В. И.

Одним из эффективных способов управления пограничным слоем является отсос жидкости через пронцаемую поверхность. Поперечный массовый поток, направленный к стенке, способствует затягиванию или даже полному устранению перехода ламинарного режима течения в турбулентный [1]. В диффузорах отсос препятствует отрыву турбулентного пограничного слоя, улучшает их аэродинамические качества, а в ряде технических устройств применение отсоса позволяет снизить уровень шумов и одновременно сместить максимум спектра частот из низкочастотной области в высокочастотную [2].

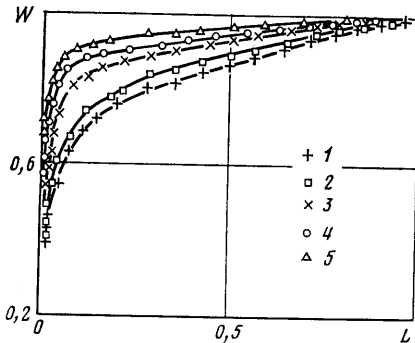
Количество работ, посвященных экспериментальному исследованию турбулентного пограничного слоя с отсосом, ограничено, причем в большинстве работ рассматриваются безградиентные течения с небольшими интенсивностями отсоса $F = V_w / U_e \approx 0,01$ (V_w — нормальная компонента скорости отсоса на стенке, U_e — скорость во внешнем течении). Данное исследование проведено в широком диапазоне интенсивностей отсоса $F = -0,002 - -0,047$, для которых отсутствуют экспериментальные данные. Эксперименты проводились на газодинамической установке [3] в изотермических условиях, при скорости потока, обеспечивающей развитый турбулентный пограничный слой на пронцаемой пластине $Re_x = 2 \cdot 10^5$ ($Re_x = X \cdot U_e / \nu$). Гибкая верхняя стенка позволяла проводить эксперименты как при отсутствии, так и при наличии градиента давления (положительного и отрицательного). Параметр градиента давления $K = (\nu / \rho \times U_e^3) \times (dP/dX)$ (ν — кинематическая вязкость, ρ — плотность, P — давление, X — продольная координата) изменялся в пределах $(-2,2 - 4,8) \cdot 10^{-6}$, а скорость при градиентных течениях уменьшалась или увеличивалась по линейному закону. В качестве моделей использовались пористые и перфорированные пластины размером 132×40 мм², которые устанавливались в нижнюю стенку канала квадратного сечения 40×40 мм². Диаметр отверстий перфорированных пластин равен $d = 0,4$ мм, шаг отверстий $S = 0,4 - 1$ мм. Для определения влияния угла отсоса, а также влияния способа отсоса эксперименты проводились на пористых пластинах с углами отсоса $\alpha = 15, 45, 90, 165^\circ$ и перфорированных — с углами $\alpha = 20, 45, 75, 90, 135, 160^\circ$ (α — угол, образованный осями каналов перфорированных или пористых пластин со стенкой).

Сопоставление профилей осредненных скоростей в турбулентном пограничном слое на пористой и перфорированных пластинах при различных интенсивностях отсоса при $\alpha = 90^\circ$ указывает на одинаковое влияние отсоса в обоих случаях. На фиг. 1 приведены профили осредненных скоростей на перфорированной пластине ($\alpha = 90^\circ$, $Re_x = 2 \cdot 10^5$) для различных интенсивностей отсоса ($W = U/U_e$, $L = y/\delta$, $1 - F = 0,0$; $2 - -0,002$; $3 - -0,007$; $4 - -0,011$; $5 - -0,026$). Увеличение интенсивности отсоса приводит к большей заполненности профилей скорости по всей толщине пограничного слоя за счет поперечной конвекции, направленной к стенке. При возрастании интенсивности отсоса темп заполнения профилей скорости падает, что является результатом тормозящего действия поперечной скорости, которое возрастает с увеличением отсоса. Однако при одних и тех же интенсивностях отсоса заполненность профилей на перфорированной пластине выше, чем на пористой.

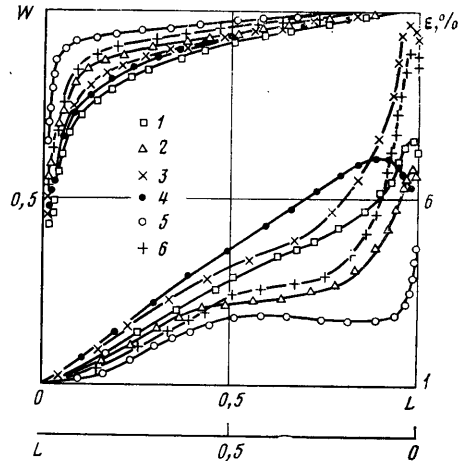
Сравнение профилей пульсационных скоростей для перфорированного и пористого отсоса для $\alpha = 90^\circ$ также свидетельствует об одинаковой качественной картине их изменения при увеличении отсоса. По мере увеличения отсоса происходит падение турбулентных пульсаций по всей

толщине пограничного слоя, причем наиболее интенсивное — в пристенной области. Это приводит к более равномерному распределению турбулентной энергии по всей толщине пограничного слоя. При интенсивности отсоса $F = -0,007$ на профилях пульсационных скоростей образуется плато в области $y/\delta = 0,1-0,5$, которое с увеличением отсоса смещается к стенке. Образование плато объясняется установлением в этой области равновесия между переносом турбулентности средним течением, поперечной диффузией турбулентности от стенки и затуханием турбулентности вследствие отсоса.

Следует отметить, что падение турбулентных пульсаций скорости при одних и тех же интенсивностях отсоса через перфорированную поверх-



Фиг. 1



Фиг. 2

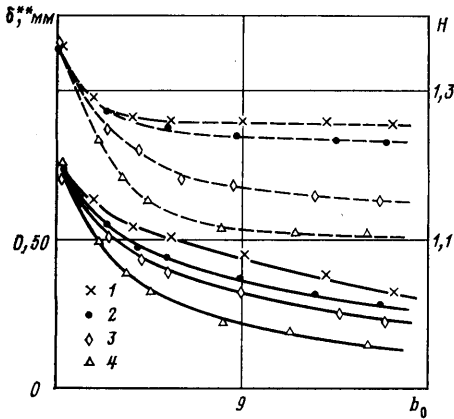
ность больше, чем через пористую. Таким образом, можно сделать вывод, что при прочих равных условиях, для $\alpha = 90^\circ$ отсос через перфорированную поверхность более эффективно воздействует на турбулентный пограничный слой, чем при отсосе через пористую поверхность.

Наиболее сильное влияние угла было обнаружено при отсосе против потока под углом $\alpha = 20^\circ$. В этом случае соотношение нормальной и продольной компонент скорости отсоса таково, что ускоряющее действие за счет поперечной конвекции, обусловленной нормальной компонентой скорости отсоса, наименьшее для всех рассмотренных углов отсоса, а тормозящее воздействие — наибольшее. Поэтому с увеличением интенсивности отсоса заполнение профилей скорости непосредственно у стенки происходит медленнее, чем при других углах. По мере удаления от стенки влияние отрицательной продольной компоненты скорости отсоса уменьшается и скорость заполнения профилей с увеличением интенсивности возрастает.

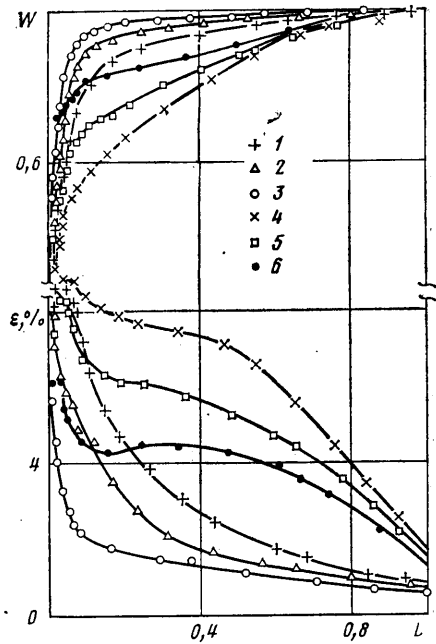
В случае отсоса под углом $\alpha = 160^\circ$ (отсос по потоку) продольная компонента скорости отсоса в отличие от случая $\alpha = 20^\circ$, наоборот, ускоряет жидкость у стенки, а влияние поперечной компоненты скорости остается таким же, как и при $\alpha = 20^\circ$. В результате при $\alpha = 160^\circ$ профили осредненных скоростей оказываются более заполненными, чем при $\alpha = 20^\circ$, причем чем больше интенсивность отсоса, тем больше различие профилей непосредственно у стенки для $\alpha = 20$ и 160° при одинаковых интенсивностях отсоса.

Сравнение профилей скорости при $\alpha = 160$ и 90° показывает, что при одинаковых интенсивностях наибольшую заполненность имеют профили при $\alpha = 90^\circ$. Это позволяет сделать вывод, что ускоряющее воздействие, происходящее при $\alpha = 90^\circ$ целиком за счет поперечной конвекции, оказывается сильнее, чем в случае $\alpha = 160^\circ$, когда ускорение обусловлено попе-

речной компонентой скорости отсоса и в несколько раз большей продольной компонентой скорости. На фиг. 2 приведены профили пульсационных и осредненных скоростей в турбулентном пограничном слое на перфорированной пластине для разных углов отсоса (y — поперечная координата, δ — толщина пограничного слоя, $\varepsilon\% = (\sqrt{\langle U \rangle'^2 + \langle V \rangle'^2} / U_e) \cdot 100$ — пульсация скорости, U' , V' — продольная и поперечная компоненты пульсации скорости, $W = U/U_e$, $L =$



Фиг. 3



Фиг. 4

$= y/\delta$, $1 - \alpha = 20^\circ$, $F = -0,007$; 2 — 90° , $F = -0,007$; 3 — 160° , $F = -0,007$; 4 — 20° , $F = -0,026$; 5 — 90° , $F = -0,026$; 6 — 160° , $F = -0,026$). С увеличением угла отсоса от 20° до 90° и уменьшением от 160° до 90° влияние продольной компоненты скорости отсоса уменьшается и в формировании профилей скорости при возрастании интенсивности отсоса преобладающим становится ускорение слоев жидкости у стенки за счет поперечной конвекции. Это подтверждается экспериментами для углов отсоса $\alpha = 45^\circ$ и 135° . Для этих углов профили скорости отличаются между собой значительно меньше, чем при $\alpha = 20^\circ$ и 160° при их сопоставлении для одинаковых интенсивностей отсоса. Вместе с тем, например, при $\alpha = 45^\circ$ профили скорости более заполнены, чем при $\alpha = 20^\circ$, и менее заполнены, чем при $\alpha = 90^\circ$, при одной и той же интенсивности отсоса.

Указанный характер изменения профилей скорости при изменении угла отсоса подтверждается представленными на фиг. 3 зависимостями $\delta^{**} = f(b_0)$ и $H = f(b_0)$ (δ^{**} — толщина потери импульса, δ^* — толщина вытеснения, $H = \delta^*/\delta^{**}$ — форм-параметр, $b_0 = 2F/Cf_0$ — параметр интенсивности отсоса, Cf_0 — коэффициент поверхностного трения в идентичных условиях без отсоса; 1 — $\alpha = 20^\circ$; 2 — 160° ; 3 — 135° ; 4 — 90° ; штриховыми линиями показано изменение форм-параметра H , ось координат справа). В области, прилегающей к стенке, где происходит наибольшая потеря импульса, при $\alpha = 20^\circ$ изменение заполненности профилей наименьшее в сравнении с другими рассмотренными углами; соответственно уменьшение δ^{**} при увеличении b_0 — наименьшее; наоборот, для $\alpha = 90^\circ$ профили скорости при увеличении b_0 заполняются наиболее интенсивно, соответственно толщина потери импульса уменьшается быстрее, чем при других исследованных углах. Следует отметить, что для всех рассмотренных углов при умеренных интенсивностях отсоса ($b_0 < 1$) δ^{**} уменьшается практически одинаково без расслоения в зависимости от угла отсоса.

При $b_0 > 1$ имеется четкое расслоение и почти линейное уменьшение δ^{**} в зависимости от b_0 для $\alpha = 20, 45, 75, 135, 160^\circ$. Для $\alpha = 90^\circ$ δ^{**} уменьшается более резко. Своеобразным является поведение форм-параметра H при возрастании b_0 . При $\alpha = 20^\circ$ для всех $b_0 < 4$ происходит резкое уменьшение H , а для $b_0 > 4$ H остается практически постоянным, т. е. и δ^{**} и δ^* уменьшаются с увеличением b_0 так, что H не изменяется. Для других углов падение δ^* происходит быстрее, чем δ^{**} с увеличением b_0 , что и приводит к общему падению H .

Характер течения в пограничном слое при отсосе под углом $\alpha = 20^\circ$ проявляется и в распределении пульсационных скоростей. Наличие отрицательной компоненты скорости отсоса является основной причиной отличия профилей пульсаций скорости при $\alpha = 20^\circ$ от профилей при других рассмотренных углах отсоса. Во-первых, с увеличением отсоса максимум пульсаций снижается медленнее, причем тем медленнее, чем больше интенсивность отсоса; следует отметить, что при $\alpha = 160^\circ$ максимум пульсаций с увеличением интенсивности отсоса снижается также медленно, как и при $\alpha = 20^\circ$, однако соответствующие значения максимумов пульсаций скорости выше на 20–30%, чем при $\alpha = 20^\circ$. Во-вторых, уменьшение пульсаций при $\alpha = 20^\circ$ остается почти одинаковым по всему сечению пограничного слоя, а максимум пульсаций с увеличением интенсивности отсоса перемещается не к стенке, а от нее, при этом ширина максимума пульсаций возрастает.

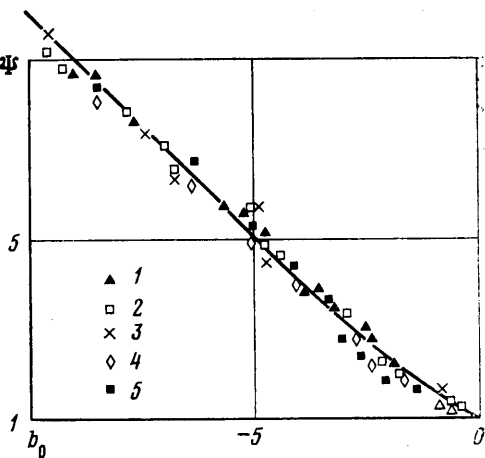
Расширение области максимальных пульсаций при $\alpha = 20^\circ$ объясняется дополнительной генерацией турбулентности за счет тормозящего действия отрицательной продольной компоненты скорости отсоса, направленной против потока. Чем больше интенсивность отсоса, тем на большее расстояние от стенки распространяется влияние продольной компоненты и тем шире область генерации. И наоборот, при $\alpha = 160^\circ$, несмотря на то, что максимум пульсаций выше, чем при $\alpha = 20^\circ$, уровень пульсаций падает в 2–2,5 раза в очень узкой области и становится заметно ниже, чем при $\alpha = 20^\circ$ при одинаковых интенсивностях отсоса. Для исследованных углов отсоса $20^\circ < \alpha < 90^\circ$ и $90^\circ < \alpha < 160^\circ$ влияние отрицательной компоненты скорости оказывается менее заметным. Процессы формирования профилей пульсаций скорости для этих углов качественно носят одинаковый характер, аналогичный формированию профилей пульсаций скорости при $\alpha = 90^\circ$; различие же наблюдается лишь в количественном отношении.

Проведенное исследование распределения осредненных скоростей в турбулентном пограничном слое на пористых пластинах не обнаружило сколько-нибудь значительного отличия отсоса под углами $\alpha = 15, 40, 165^\circ$ от нормального отсоса $\alpha = 90^\circ$. Независимость отсоса через пористую поверхность от угла объясняется малостью диаметра ориентированных под определенным углом пористых каналов, в результате чего отсасываемая через них жидкость входит в пористую пластину под углами, близкими к 90° , а не под углом, с которым жидкость покидает пористую пластину после прохождения последней. Для пульсационных скоростей зависимость отсоса на пористой поверхности от угла выражена более заметно, хотя имеющиеся отличия носят лишь количественный характер.

На фиг. 4 приведены профили осредненных и пульсационных скоростей при положительном и отрицательном градиентах давления при отсосе через пористую пластину с $\alpha = 90^\circ$ ($W = U/U_c$, $L = y/\delta$, 1, 2, 3 — $K = 4,0 \cdot 10^{-6}$, $F = 0,0$, $F = -0,007$, $F = -0,026$; 4, 5, 6 — $K = -1,9 \cdot 10^{-6}$, $F = 0,0$, $F = -0,007$, $F = -0,026$). Наиболее сильное влияние отсоса проявляется в непосредственной близости от стенки. Максимальные значения пульсаций скорости мало отличаются как для положительного, так и отрицательного градиентов давления при одних и тех же интенсивностях отсоса. Однако во внешней части пограничного слоя величина пульсаций скорости при отрицательном градиенте давления с увеличением интенсив-

ности отсоса падает значительно быстрее, чем при положительном градиенте. При больших интенсивностях отсоса в условиях положительного градиента давления во внешней части пограничного слоя возникает второй максимум пульсаций скорости, свидетельствующий о преобладании в области между максимумами процесса затухания турбулентности, обусловленного отсосом над продольной конвекцией турбулентности и диффузией турбулентности от стенки.

На фиг. 5 представлены данные по коэффициенту поверхностного трения на пористых пластинах для случаев положительного, отрицательного градиентов давления в пограничном слое и безградиентного режимов течения ($\bar{I} - \alpha = 90^\circ$, $K=0$; 2 - 90° , $K=4,0 \cdot 10^{-6}$; 3 - 90° , $K=-1,9 \cdot 10^{-6}$; 4 - 15° ; $K=0,0$; 5 - 165° , $K=0,0$). Несмотря на то что коэффициент трения сильно зависит от градиента давления, относительный коэффициент трения $\Psi = C_f/C_{f_0}$ зависит только от b_0 ; для $|b_0| > 4$ $\Psi = -b_0$, а при $|b_0| < 4$ $\Psi = (1 + 1/4 b_0)^2$ [4].



Фиг. 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Изд-во иностр. лит., 1956, 528 с.
2. Золотухин А. П. О снижении шума диффузора при отсосе пограничного слоя. - В кн.: IX Всес. акуст. конф. Москва, 1977, секция Ж. М., 1977, с. 55-58.
3. Ерошенко В. М., Ермаков А. Л., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. Н. Экспериментальное исследование профилей скорости и конвекции в бинарных зонах смешения. - В кн.: Термоаэродинамика. Минск, 1970, с. 58-75.
4. Кутагеладзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 341 с.

Москва

Поступила в редакцию
7.VIII.1981