

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В КОНФУЗОРНОМ КАНАЛЕ НА СОТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты экспериментального исследования турбулентного пограничного слоя, протекающего на сотовой поверхности при наличии отрицательного продольного градиента давления во внешнем потоке. Выявлено значительное влияние сотовой поверхности на закономерности течения в пограничном слое, которое может отразиться на процессах тепло- и массообмена между сотовой стенкой и обтекающим ее потоком.

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование необходимых гидродинамических, тепловых и массообменных процессов на поверхности узлов энергетических конструкций обеспечивается разнообразными средствами, как активными, так и пассивными. К первым, например, относится вдув в пограничный слой. В качестве другого метода может использоваться шероховатость поверхности обтекаемого тела, размещение на поверхности преград, рельефов, каверн. Так, размещение на поверхности лунок приводит к формированию крупномасштабных вихревых структур, способных изменить тепло- и массообменные процессы, а также в определенных случаях снизить сопротивление трения [1]. Сходный вид поверхности имеют конструкции из сотового материала. Однако в этом случае "проницаемость", т. е. отношение открытой поверхности сот, к общей наружной поверхности сотового материала, может быть значительно больше, чем для материала с лунками. Конструкции из сотового материала широко используются в качестве уплотнения в газовых турбинах [2]. Структура потока, формирующегося на ней, изучена недостаточно. Экспериментальные исследования ламинарного и турбулентного пограничных слоев на сотовой поверхности для безградиентного режима течения [3,4] позволили выявить некоторые особенности таких течений. Одна из них выражается в наличии продольной скорости на поверхности сот, поток скользит по ней. Другая особенность проявляется в заметном снижении влияния поверхности на поток, протекающий по ней. Результатом последнего фактора является трансформация профиля скорости в S-образную форму при ламинарном течении и в уменьшении заполненности профиля скорости при турбулентном течении. При развитии турбулентного пограничного слоя с продольным положительным градиентом давления во внешнем потоке профиль скорости вниз по потоку принимает S-образный вид, характерный для случая отрыва

пограничного слоя от стенки. Обнаружено скольжение потока по сотовой поверхности [5]. Следовательно, отрыва пограничного слоя от стенки не происходило. Таким образом, сотовая поверхность способствует затягиванию процесса отрыва пограничного слоя от стенки.

Данная работа является продолжением исследований, представленных в работах [3-5].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на газодинамической установке [5], оснащенной интерферометром ИТ-14 с лазерным источником света и комплексом контрольно-измерительной аппаратуры. Основными элементами установки являлись камера Эйфеля (барокамера), сопловая часть с профилированным соплом, рабочий участок со сменными моделями, воздушный тракт, вакуумная станция.

Сотовая пластина 185 x 40 мм устанавливалась на пластине из оргстекла и монтировалась в нижнюю стенку канала 40 x 40 мм. Боковые стенки канала были выполнены из оптического стекла. Верхняя подвижная стенка опускалась, чтобы создать конфузорный канал с ускорением потока вдоль сотового участка. В канал втекал турбулентный поток. Погрешность определения скорости не превышала 2 %. Эксперименты проводились в изотермических условиях.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Параметр продольного градиента давления λ , формирующегося в канале, определялся по соотношению

$$\lambda = \left(\frac{\delta^2}{\nu} \right) \frac{du_e}{dx} = \left(\frac{\delta^2}{\mu u_e} \right) \frac{dp_o}{dx} . \quad (1)$$

Таблица 1. Значения λ в различных сечениях канала

x/L	0.34	0.49	0.65	0.81	0.92
λ	131.5	104.6	104.6	104.6	104.6

Параметр градиента давления λ сохранялся неизменным при $x/L > 0.34$.

На рис. 1 приведено распределение относительной u_w/u_e скорости скольжения на сотовой поверхности. Абсолютная и относительная скорость скольжения возрастают вниз по потоку. Скольжение пограничного слоя по сотовой поверхности сопровож-

дается снижением ее влияния на пограничный слой. Сотовая поверхность оказывает влияние на распределение осредненной скорости в пограничном слое. Заполненность профилей скорости во внешней части пограничного слоя оказывается ниже, чем в турбулентном пограничном слое на обычной поверхности при безградиентном режиме течения (рис. 2), распределение скорости для которого приведено сплошной линией.

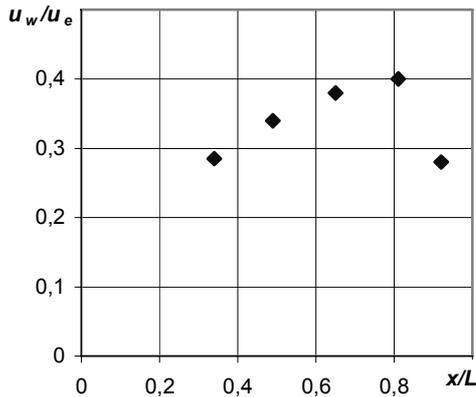


Рис.1. Относительная скорость скольжения вдоль сотовой поверхности

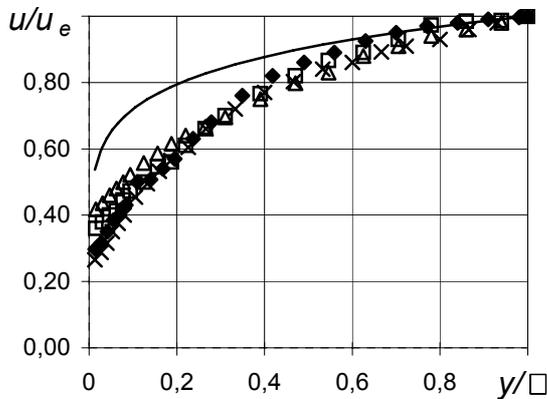


Рис. 2. Профили осредненных скоростей в пограничном слое на сотовой поверхности:
 ◆ $x/L=0.34$; □ $x/L=0.49$; △ $x/L=0.81$;
 × $x/L=0.92$; — закон $1/7$

На начальном участке сотовой пластины происходит уменьшение заполненности профиля осредненной скорости по всей толщине пограничного слоя. Ниже по потоку пограничный слой разделяется по толщине на две области, в каждой из которых скольжение оказывает на распределение скорости противоположный эффект.

Вблизи поверхности происходит ускорение потока. В области, расположенной выше, происходит торможение потока. Такое изменение профиля ос-

редненной скорости в пограничном слое обусловлено сохранением расхода воздуха в нем.

На профиле скорости в пограничном слое на расстоянии $y/\delta \approx 0.27$ относительная скорость u/u_e для всех сечений оказывается одинаковой и равной примерно 0.69, кроме сечения $x = 0.92$. Ниже по потоку для $y/\delta < 0.27$ заполненность профиля скорости возрастает, а для $y/\delta > 0.27$, наоборот, уменьшается. Данная тенденция не наблюдается в сечении $y/\delta = 0.92$. Здесь заполненность профиля скорости снижается по всей толщине пограничного слоя. Причиной уменьшения заполненности профиля скорости по толщине пограничного слоя в этом сечении является снижение скорости скольжения. Уменьшение скорости скольжения в данном сечении обусловлено влиянием участка без сот за пластиной. Так как скорость u_w на этом участке равна нулю, то процесс перестройки скорости скольжения к этому значению отражается на конце сотового участка, что и приводит к падению скорости скольжения в сечении $x/L = 0.92$. Уменьшение заполненности в этом сечении привело к увеличению толщины пограничного слоя δ в данном месте.

По всей длине сотовой поверхности для области $y/\delta < 0.1$ распределение осредненной скорости происходит по линейному закону.

На рис. 3 приведено распределение интенсивности турбулентных пульсаций скорости ε в различных сечениях пограничного слоя. Вблизи сотовой поверхности формируется пик турбулентности ε .

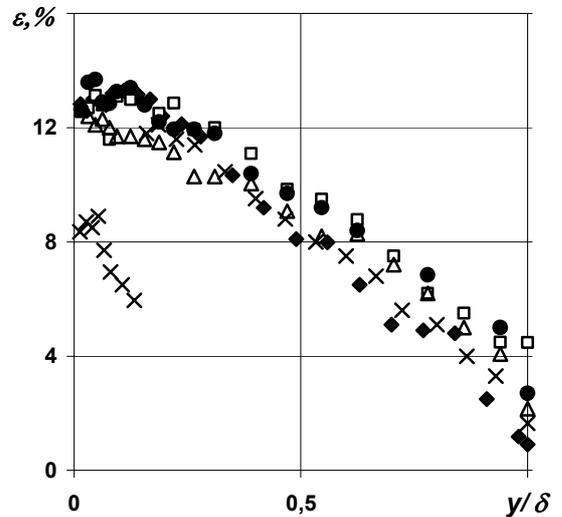


Рис.3. Распределение интенсивности пульсаций скорости в пограничном слое

◆ $x/L=0.34$; □ $x/L=0.49$; ● $x/L=0.65$; △ $x/L=0.81$; × $x/L=0.92$

Причиной порождения турбулентности является возмущающее воздействие ребер сотовой поверхности. Распределение турбулентных пульсаций скорости ε вблизи сотовой поверхности в сечении $x/L=0.92$ резко отличается от данных по распределению ε в сечениях выше по потоку. В отличие от сечений вверх по потоку в данном месте величина

пика турбулентных пульсаций скорости оказывается значительно ниже. При $y/\delta > 0.15$ уровень турбулентных пульсаций скорости ε резко возрастает и при $y/\delta > 0.2$ достигает уровня значений ε для сечений вверх по потоку. Величина u_w/u_e в сечении $x/L=0.34$ и 0.92 примерно одинакова. Однако максимальное значение ε вблизи стенки выше в сечении $x/L=0.34$. По-видимому, интенсивность турбулентных пульсаций скорости зависит от величины скорости скольжения u_w . Так, в сечениях $x/L=0.34$ и 0.92 u_w/u_e оказывается почти одинаковым, однако в сечении $x/L=0.92$ максимальное значение ε оказывается значительно ниже. Резкое изменение ε в области $y/\delta < 0.1$ не оказывает заметного влияния на закономерность распределения осредненной скорости в этой области, во всех сечениях распределение осредненной скорости имеет линейный вид.

Коэффициент трения на сотовой поверхности рассчитывался по зависимости

$$C_f = \frac{\tau_w}{0.5\rho u_e^2}, \quad (2)$$

где касательное напряжение трения τ_w определялось на основе замеров распределения скорости вблизи поверхности:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0}. \quad (3)$$

На рис. 4 и 5 приведено распределение C_f и C_f/C_{f0} вдоль сотовой поверхности, где C_{f0} – коэффициент трения на обычной поверхности при безградиентном режиме течения.

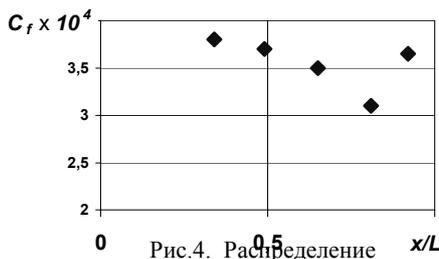


Рис. 4. Распределение поверхностного трения вдоль сотовой поверхности

Значение C_f мало и уменьшается вниз по потоку, за исключением сечения $x/L = 0.92$, где проявляется влияние гладкой поверхности за сотовой пластиной. Уменьшение коэффициента трения C_f вниз по потоку вызвано тем, что изменение динамического давления вдоль сотовой пластины происходит более медленно, чем изменение касательного напряжения на стенке.

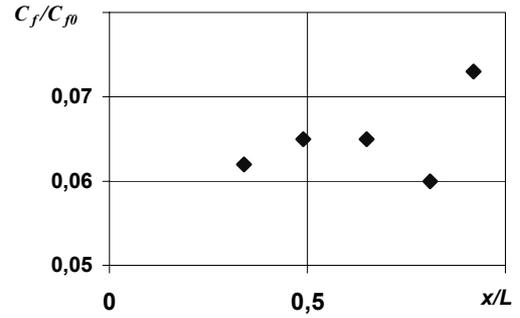


Рис. 5. Относительное трение вдоль сотовой поверхности

Видно (рис. 5), что трение на сотовой поверхности при отрицательном продольном градиенте давления во внешнем потоке оказывается значительно ниже, чем на поверхности без сот даже для случая безградиентного режима течения.

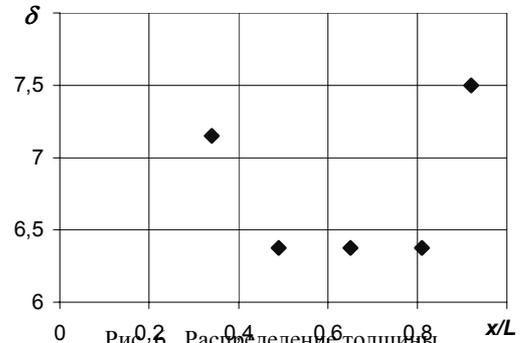


Рис. 6. Распределение толщины пограничного слоя вдоль сотовой поверхности

На рис. 6 - 8 приведены интегральные характеристики пограничного слоя на сотовой поверхности.

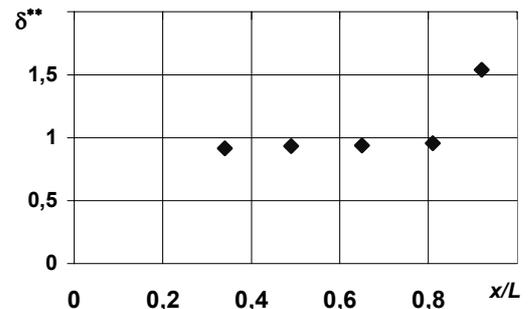


Рис. 7. Изменение толщины потери импульса вдоль сотовой поверхности

Между сечениями $x/L=0.49$ и 0.81 толщина пограничного слоя δ остается неизменной, однако в сечении $x/L=0.92$ происходит увеличение δ . Это связано с влиянием участка поверхности без сот за сотовой пластиной, как было отмечено ранее. Толщины вытеснения δ^* и потери импульса δ^{**} изменяются по линейному закону вдоль сотовой поверхности за исключением области около сечения $x/L=0.92$, где происходит резкое нарастание δ^* и δ^{**} .

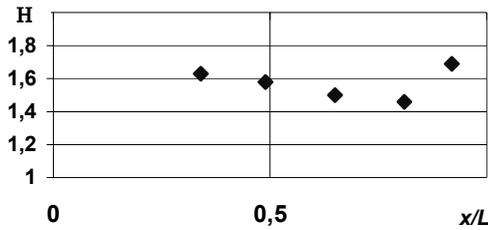


Рис. 8. Изменение формпараметра пограничного слоя вдоль сотовой поверхности

Формпараметр пограничного слоя $H = \delta^*/\delta^{**}$ уменьшается вниз по потоку и возрастает в области сечения $x/L = 0,92$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования турбулентного пограничного слоя на сотовой поверхности при наличии отрицательного продольного градиента давления во внешнем потоке позволили обнаружить его скольжение по сотовой поверхности с ускорением вниз по потоку.

Скольжение потока по сотовой поверхности приводит к изменению закономерностей течения в пограничном слое. В результате этих изменений в потоке формируются две зоны: зона ускорения и зона торможения.

Зона ускорения располагается вблизи сотовой поверхности. В этой зоне течение ускоряется вниз по потоку. Соответственно, заполненность профиля скорости увеличивается.

Зона торможения располагается между зоной ускорения и внешним потоком. Вниз по потоку течение в этой зоне затормаживается, что отражается в уменьшении заполненности профиля осредненной скорости в ней.

Граница между зонами остается почти неизменной вдоль сотовой поверхности и располагается на расстоянии $y/\delta \approx 0,27$.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ.

u_e – скорость набегающего (свободного) потока, м/с;

u_w – скорость скольжения, м/с;

x – расстояние от передней кромки пластины, мм;

y – расстояние от поверхности пластины, мм;

L – длина сотовой пластины, мм;

δ – толщина пограничного слоя, мм;

δ^* – толщина вытеснения, мм;

δ^{**} – толщина потери импульса, мм;

τ – касательное напряжение трения, Н/м²

H – формпараметр пограничного слоя;

C_f – коэффициент поверхностного трения;

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\overline{u}^2 + \overline{v}^2}}{u_e} \quad \text{– интенсивность турбулентности.}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Управление** тел с вихревыми ячейками / П. А. Баранов, С. В. Гувернюк, А. В. Ермашин. М., СПб, 2001. 360 с.
2. **Сотовые** уплотнения в турбомашинах / В. Т. Буглаев, А. А. Климов, В. Т. Перевезенцев и др. Брянск.: Изд. БГТУ, 2002. 148 с.
3. **Trdatyan S. A., Klimov A. A.** Friction and Heat Transfer on a Honeycomb Surface in Laminar and Turbulent Flows // Heat Transfer 2002 Proc. 12th Intern. Heat Transfer Conf. Grenoble, France. 2002. V. 2. P. 609 – 615.
4. **Трдатьян С. А., Климов А. А.** Пограничный слой на сотовой поверхности при натекании на нее ламинарного потока // Тр. 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. М.:Издательство МЭИ, 2002. С. 281 – 284.
5. **Климов А.А., Трдатьян С. А.** Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем //ТВТ.2003. Т. 41. №6. С. 901-906.