

УДК 532.525.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ ВДУВЕ

**ЕРМАКОВ А. Л., ЕРОШЕНКО В. М., ЗАЙЧИК Л. И.,
КЛИМОВ А. А., ЯНОВСКИЙ Л. С.**

Среди известных способов тепловой защиты рабочих поверхностей энергетических установок наиболее эффективными являются пористое и перфорированное охлаждение. Подвод охладителя через перфорации обладает рядом преимуществ по сравнению с пористым охлаждением, например не требует высокой степени очистки охладителя и позволяет организовывать его прокачку при значительно меньших перепадах давления.

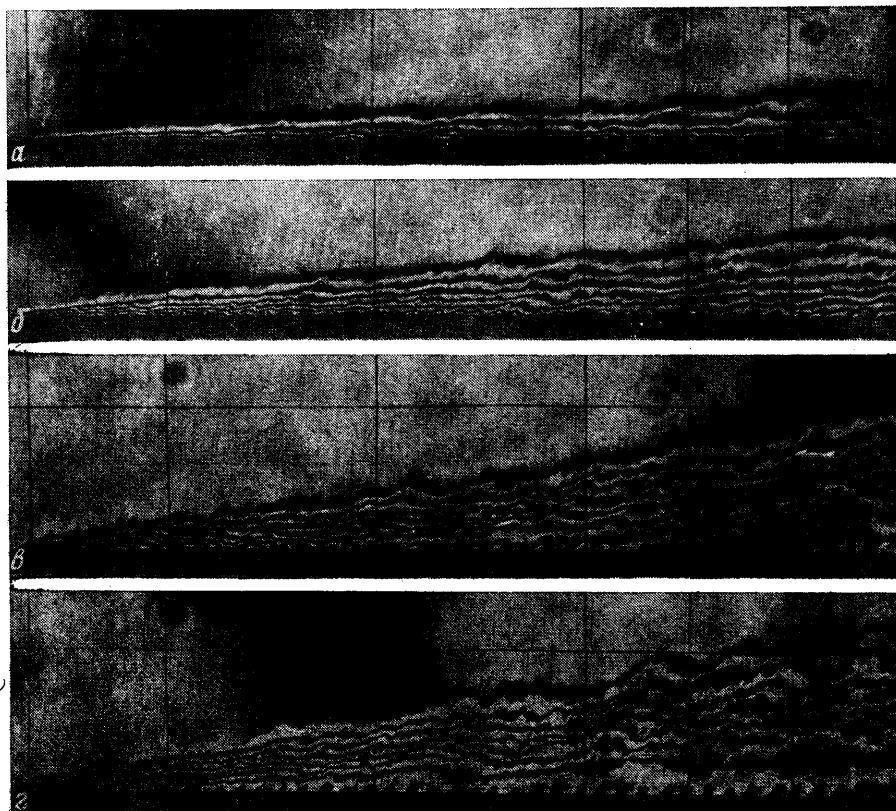
Вопросы гидродинамики и тепломассопереноса при вдуве через перфорированные поверхности были изучены в ряде работ, например [1–3]. Однако при этом остались невыясненными такие практически важные вопросы, как поведение вязкого подслоя и структура осредненного и пульсационного движения при сильных (сверхкритических) вдувах.

В настоящей работе приводятся результаты исследования осредненных и пульсационных полей скорости и концентрации турбулентного пограничного слоя на перфорированных поверхностях и дан анализ влияния граничных условий на проникающей стенке на параметры пограничного слоя.

1. Экспериментальная установка и условия эксперимента. Опыты были проведены на газодинамической установке, оснащенной комплектом термоанемометрической аппаратуры DISA 55D и интерферометром Маха — Цендера [4]. В качестве моделей использовался набор перфорированных пластин размером 135×40 мм², смонтированных заподлицо в нижнюю стенку канала прямоугольного сечения 40×40 мм². Диаметр перфораций ($d=0,50; 0,75$ и $1,50$ мм для разных пластин) выбирался из условия $d \ll \delta$, где δ — толщина пограничного слоя. Отверстия располагались в шахматном порядке, а непроницаемые участки были приблизительно одинакового размера с проницаемыми, что обеспечивало подвод газа, близкий к равномерному. Проницаемость пластины k изменялась в пределах 6,5–19%, при 10–50 отв./см². Верхняя стенка канала была сделана гибкой, что позволяло устранять продольные отрицательные градиенты давления, возникающие при вдуве.

Эксперименты проводились в изотермических условиях при скорости набегающего потока, обеспечивающей развитый турбулентный пограничный слой по всей длине пластины (число Рейнольдса $Re_L=2 \cdot 10^5$). В набегающий воздушный поток вдувались газы N₂, CO₂, He, Fr-12, Kr и Xe.

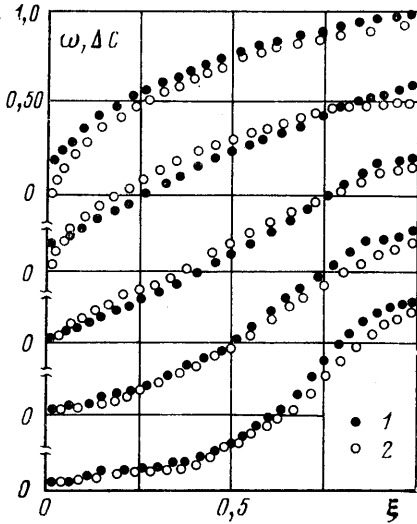
2. Качественная картина течения. На фиг. 1 представлена серия интерферограмм, иллюстрирующая влияние перфорированного вдува на диффузионный пограничный слой при вдуве CO₂. Исходная настройка интерферометра — в линиях равных концентраций. Визуализированный диффузионный пограничный слой дает непосредственное представление и о динамическом пограничном слое, поскольку они в первом приближении совпадают. Снимки *a–г* соответствуют диаметру $d=0,4$ мм и интенсивности вдува $F=(\rho v)_w/(\rho u)_e=0,0088; 0,0136; 0,0230$ и $0,0398$. Из анализа интерферограмм следует, что подвод охладителя через дискретные отверстия так же, как и при пористом вдуве, сильно трансформирует течение в пограничном слое. Независимо от диаметра перфораций нарастание пограничного слоя по длине пластины происходит по закону, близкому к линейному, а граница слоя не имеет каких-либо выбросов или «языков» и обозначена достаточно четко.



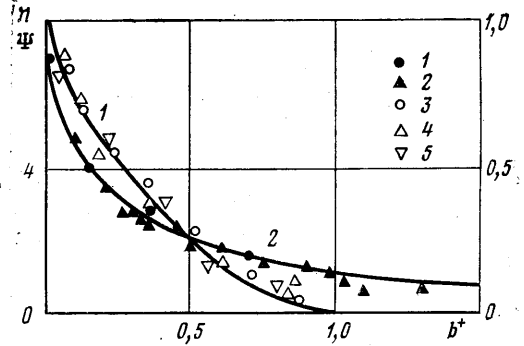
Фиг. 1

Хорошо видно, как с увеличением интенсивности вдува F толщина слоя в фиксированном сечении существенно растет. При слабых вдувах зона смещения вдуваемого и набегающего потоков присоединена к поверхности и внешне ничем не отличается от зоны смещения на пористой пластине [5]. Однако в отличие от пористой на перфорированной пластине не образуется вязкий подслой, вернее, он разрушается отдельными струйками газа [6]. Из интерферограмм видно, что с увеличением вдува зона смещения постепенно оттесняется от поверхности и весь пограничный слой можно разбить, так же как и при сильном пористом вдуве [5], на две характерные области — зону смещения с максимальными поперечными градиентами и зону оттеснения с малыми градиентами. Следует отметить, что оттеснение набегающего потока, как и при пористом вдуве, не сопровождается какой-либо перестройкой течения, а происходит постепенно.

В отличие от зоны оттеснения на пористой поверхности, где концентрация вдуваемого газа близка к 100%, а течение слоистое и слабо возмущено турбулентностью, в данном случае картина течения значительно усложняется. При сильном перфорированном вдуве вокруг каждой вытекающей струи образуются обратные токи, сливающиеся в циркуляционные области. В этих областях происходит перенос воздуха с внутренней границы зоны смещения к стенке, что интенсифицирует массообмен в зоне оттеснения. Поэтому естественно ожидать, что при перфорированном вдуве в зоне оттеснения имеет место более высокий уровень турбулентности, чем при



Фиг. 2



Фиг. 3

пористом вдуве, а значение концентрации вдуваемого газа отличается от 100%. Качественно картина течения одинакова для всех диаметров перфораций, использованных в опытах.

Таким образом, основные качественные различия, возникающие при переходе от пористого охлаждения к перфорированному, проявляются вблизи стенки в области, непосредственно подверженной воздействию вытекающих струек газа. Что же касается зоны смещения, то она качественно идентична для обоих видов вдува. Аналогичный вывод был сделан в [7] на основании измерений полей скорости.

3. Распределение скоростей, концентраций и турбулентной энергии. Независимость процессов турбулентного смешения вдуваемого и набегающего потоков по отношению к способу подвода охладителя получает дальнейшее убедительное подтверждение в результате исследования распределения осредненных характеристик течения.

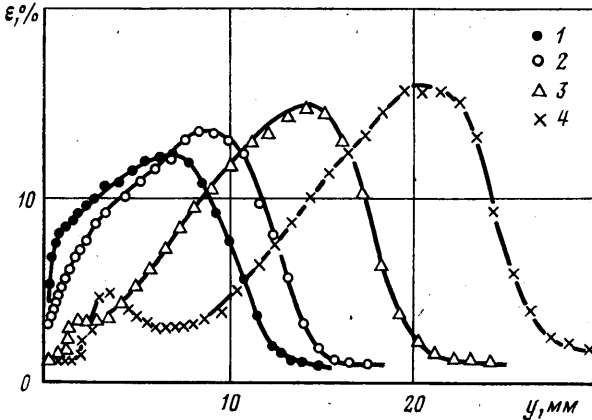
На фиг. 2 построены профили скоростей (точки 1) и массовых концентраций (точки 2) при вдуве CO_2 через перфорированную пластину с диаметром $d=0,4$ мм. Интенсивность вдува $F=0,0058; 0,0088; 0,0153; 0,0191; 0,0339$ соответственно. Из приведенных распределений видно, что последовательность деформации профилей скорости и концентрации при перфорированном вдуве аналогична таковой при пористом вдуве [5]. Слабым вдувам соответствуют заполненные профили с большими градиентами вблизи стенки. Сильным вдувам (оттесненный или «подвешенный» пограничный слой) соответствуют S-образные, струйного типа профили с малыми поперечными градиентами в зоне оттеснения и большими — в зоне смещения.

При перфорированном вдуве по аналогии с пористым целесообразно ввести понятие критического вдува, разделяющего профили типа пограничного слоя и струйного типа. Профили, соответствующие критическим вдувам, близки к линейным. В случае критического вдува потоки импульса и массы через стенку становятся исчезающе малыми, что согласуется с теорией предельных законов Кутателадзе — Леонтьева [7].

При докритических вдувах профили скоростей и концентраций могут быть описаны степенными зависимостями вида $\omega=\xi^{1/n}$, $\Delta c=\xi^{1/m}$, где $\xi=$

$=y/\delta$, $\omega=u/u_e$, $\Delta c=(c-c_w)/(c_e-c_w)$, индексы относятся: w — к условиям на стенке, e — на внешней границе пограничного слоя. Здесь величины n и m уменьшаются с ростом интенсивности F и при одинаковых вдувах практически совпадают. На фиг. 3 приведены значения n при вдуве воздуха (1) и углекислого газа (2) в зависимости от параметра вдува $b^+=b/b_*$, где $b=2F/c_{f0}$, b_* — критический параметр вдува [7], c_{f0} — коэффициент трения при отсутствии вдува. Кривая 2 на этой фигуре построена по эмпирическому уравнению [1].

Сравнение распределений скорости и концентрации, полученных на различных перфорированных и пористых поверхностях, показывает, что



Фиг. 4

эти распределения имеют не только аналогичные стадии деформации при увеличении F , но и совершенно идентичный вид на каждой стадии, так что по виду профилей (за исключением пристенной области) не представляется возможным определить его принадлежность к типу обтекаемой поверхности.

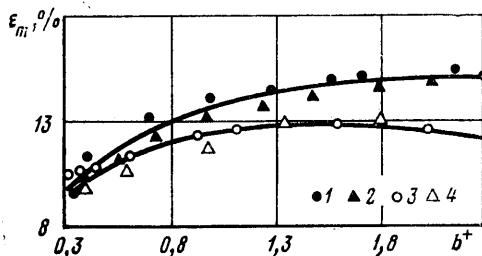
Из фиг. 2 также следует, что при перфорированном вдуве аналогия Рейнольдса между переносом импульса и массы выполняется лучше, чем при пористом вдуве [5]. По-видимому, это связано с лучшим перемешиванием вдуваемого газа с основным потоком за счет подвода дискретных струй.

Кроме измерений при вдуве азота и углекислого газа с целью определить критические параметры вдува была проведена серия опытов с подводом других газов (He, Ar, Kr, Fr-12, Xe). В результате экспериментов установлено, что значения критических параметров вдува для использованных диаметров перфорации на 10–15% выше соответствующих значений при пористом вдуве для всех газов [8].

Вдув газа через перфорированную поверхность так же, как и через пористую [9], сильно видоизменяет структуру пульсационного движения. На фиг. 4 показано влияние интенсивности вдува CO_2 на распределение турбулентных пульсаций скорости $\epsilon=10^2 \cdot (\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle)^{1/2} / u_e$ поперек пограничного слоя. Здесь u' и v' — компоненты пульсационной скорости. Кривые 1–4 соответствуют значениям интенсивности $F=0,0088$; $0,0153$; $0,0264$; $0,0334$ и диаметру $d=0,4$ мм.

Как и при пористом вдуве, максимум пульсаций скорости, находящийся у стенки при слабых вдувах, с ростом интенсивности F сдвигается

приблизительно в середину зоны смешения и далее вместе с этой зоной отгесняется от поверхности. При увеличении F наблюдается некоторый рост максимума пульсаций, причем, поскольку газ подводится в виде дискретных струек, этот рост более интенсивен, чем при пористом вдуве. Влияние вдува N_2 и CO_2 на максимум пульсаций ε_m показано на фиг. 5. Точки 1 и 2 соответствуют перфорированному вдуву CO_2 и N_2 (диаметр



Фиг. 5

диаметр $d=0,4$ мм), а точки 3 и 4 — пористому вдуву CO_2 и N_2 . Видно, что влияние неоднородности вдува на зависимость $\varepsilon_m(b^+)$ практически отсутствует. Изменение размера перфораций более чем в 3 раза также не оказало влияния на характер зависимости $\varepsilon_m(b^+)$.

Из рассмотрения фиг. 5 можно сделать вывод, что дополнительная турбулизация течения за счет перехода от пор к перфорациям во всем исследованном диапазоне интенсивностей вдува F не превышает 30%. Кроме того, при сильном пористом и перфорированном вдуве наблюдается некоторое замедление роста максимальных значений пульсаций скорости.

Следует обратить внимание на распределение пульсаций в зоне отгеснения (фиг. 4). При перфорированном вдуве в этой зоне имеет место дополнительный пик пульсаций, совпадающий с местом смешения вытекающих дискретных струек. Таким образом, результаты исследования пульсационной структуры также свидетельствуют о консервативности процессов турбулентного смешения к способу вдува и о влиянии этого способа лишь на область, непосредственно прилегающую к стенке.

4. Сопротивление трения на перфорированной стенке. В большинстве работ, посвященных изучению течений на проницаемых поверхностях со вдувом, предполагается, что тангенциальная составляющая скорости на стенке равна нулю. Однако в последнее время появились работы [10–12], в которых доказывается необходимость учета скорости скольжения на пористой стенке. Особенно существенным представляется этот учет при обтекании перфорированных поверхностей [3], так как диаметр перфораций значительно превышает характерный размер пор.

Для определения скорости скольжения на перфорированной стенке воспользуемся граничным условием [10, 11] для ламинарного течения на пористой поверхности

$$(4.1) \quad u_w = \alpha r \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_w$$

где $r=kd$ — эффективный размер перфораций, α — коэффициент порядка единицы, характеризующий взаимное расположение отверстий на поверхности.

Расчеты [11] для турбулентного течения на пористой стенке без вдува с учетом граничного условия (4.1) показали, что имеет место снижение поверхностного трения по сравнению с непроницаемой стенкой. Однако крупнопористые и перфорированные стенки эквивалентны шероховатым поверхностям, и поэтому, как отмечается в дискуссии по работе [12], полученные результаты противоречат известному факту увеличения трения на шероховатых поверхностях.

Как показали эксперименты [6], вязкий подслоя на перфорированных поверхностях при вдуве разрушается. Поэтому в отличие от [12] примем, что рейнгольдсовы напряжения не равны нулю на проницаемой поверхности.

Для определения рейнгольдсовых напряжений воспользуемся моделью Прандтля в пристенной области

$$(4.2) \quad \tau = \rho l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2, \quad l = \kappa(r+y), \quad \kappa = 0.4$$

Граничное условие (4.1) с учетом соотношения (4.2) принимает вид

$$(4.3) \quad u_w = \alpha v_* / \kappa, \quad v_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$$

и совпадает по форме с выражением для скорости над элементами шероховатости непроницаемых поверхностей [13]. Таким образом, граничное условие (4.3) является общим для перфорированных, крупнопористых и шероховатых непроницаемых поверхностей.

Для расчета сопротивления трения на перфорированных поверхностях воспользуемся асимптотической теорией Кутателадзе — Леонтьева [7], справедливой в предположении об отсутствии вязкого подслоя.

Относительный закон трения с учетом скорости на стенке примет вид [7]

$$(4.4) \quad \left(\frac{c_{f0}}{2} \right)^{1/2} \int_0^1 \frac{\tau_0^+}{l^+} d\xi = \int_{\omega_w}^1 \frac{d\omega}{(\Psi \tau^+)^{1/2}}$$

$$l^+ = \frac{l}{\delta}, \quad \tau^+ = \frac{\tau}{\tau_w}, \quad \Psi = \frac{c_f}{c_{f0}}$$

Здесь c_f — коэффициент поверхностного трения, τ — рейнгольдсовы напряжения; индекс 0 относится к условиям без вдува.

При отсутствии вдува, принимая $\tau_0^+ = 1$, из уравнения (4.4) следует

$$(4.5) \quad \frac{1}{\kappa} \left(\frac{c_{f0}}{2} \right)^{1/2} \ln \frac{1+r^+}{r^+} = 1 - \omega_w, \quad r^+ = \frac{r}{\delta}$$

Распределение напряжений трения в пристенной области получается в результате интегрирования уравнения движения

$$(4.6) \quad \tau^+ = 1 + b(\omega - \omega_w) \Psi^{-1}$$

Из уравнений (4.1) — (4.6) следует выражение для относительного коэффициента трения Ψ как функции параметра вдува с учетом скольжения на стенке

$$(4.7) \quad \Psi = \left(1 - \frac{b}{b_*} \right)^2, \quad b_* = \frac{b_*^0}{(1-A)^2}, \quad A = \frac{\alpha \sqrt{0,5 c_{f0}}}{\kappa}$$

величина $b_*^0 = 4$ соответствует критическому вдуву через гладкую пористую стенку. Видно, что критические параметры вдува через перфорированную поверхность несколько выше по сравнению с пористой стенкой, что соответствует результатам экспериментов.

На фиг. 3 приведены данные по трению на стенке при вдуве азота. Точки 3—5 соответствуют диаметрам перфораций $d = 0,4; 0,75; 1,50$ мм; кривая 1 на фиг. 3 построена по формуле (4.7).

Для скорости скольжения на перфорированной стенке получаем выражение $\omega_w = A(1 - b^+)$, откуда следует, что максимальное значение скорости

скольжения и наибольшее влияние ее на относительный коэффициент трения имеют место при обтекании перфорированной пластины в условиях отсутствия вдува. С ростом интенсивности вдува скорость ω_w снижается. Уменьшение скорости на стенке с ростом интенсивности вдува косвенно подтверждается опытами [4] и результатами настоящих экспериментов.

При критическом вдуве ($b^+=1$) скольжение на стенке отсутствует, что объясняется оттеснением пограничного слоя от стенки ($\Psi=0$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазков В. В., Гусева М. Д., Жестков Б. А. О турбулентном течении над проницаемыми пластинами.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1972, № 4.
2. Глазков В. В., Гусева М. Д., Жестков Б. А. Тепломассоперенос в турбулентном слое над проницаемыми пластинами.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1973, № 4.
3. Глазков В. В., Гусева М. Д., Жестков Б. А. Комбинированное охлаждение перфорированных пластин, обтекаемых турбулентным потоком газа.— В кн.: Тепло-массообмен-5, т. 1, ч. 2. Минск, 1976.
4. Ерошенко В. М., Морозов М. Г., Мотулевич В. П., Петров Ю. Н., Пушкин В. С. Газодинамическая установка с интерферометром ИТ-14.— В кн.: Физическая газодинамика и теплообмен. М., Изд-во АН СССР, 1961.
5. Ерошенко В. М., Ермаков А. Л., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. П. Экспериментальное исследование влияния интенсивного вдува различных газов на турбулентный пограничный слой.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1971, № 1.
6. Ермаков А. Л., Ерошенко В. М., Терентьев Ю. Н., Яновский Л. С. Исследование ламинарного подслоя на проницаемых поверхностях при вдуве.— Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 5.
7. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972.
8. Ермаков А. Л., Ерошенко В. М., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. Н. Критические параметры оттеснения турбулентного пограничного слоя.— Инж.-физ. ж., 1972, т. 23, № 1.
9. Ермаков А. Л., Ерошенко В. М., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. Н. Исследование осредненных и пульсационных характеристик турбулентного пограничного слоя на проницаемой пластине.— В кн.: Тепломассоперенос, т. 1. Минск, 1972.
10. Beavers G. S., Joseph D. D. Boundary conditions at a naturally permeable wall.— J. Fluid Mech., 1967, v. 30, pt 1.
11. Taylor G. I. A model for the boundary conditions of a porous material.— J. Fluid Mech., 1971, v. 49, pt 2.
12. Спэрроу, Джонсон, Биверс, Оуэн. Турбулентное течение несжимаемой жидкости в канале с пористой стенкой.— Тр. Амер. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов, 1972, т. 94, № 2.
13. Шлайтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

Москва

Поступила в редакцию
15.II.1980