

фикации по высоте вертикального слоя вносят существенные особенности в структуру тепловых гравитационных течений, вызывая турбулентный режим течения при относительно малых значениях Ra_v ; при этом происходит развитие турбулентного пограничного слоя у стенки в условиях интенсивной турбулентности вне пограничного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kutateladze S. S., Kirdyashkin A. G., Ivakin V. P. Turbulent natural convection on a vertical plate and in a vertical layer // Intern. J. Heat Mass Transfer.— 1972.— V. 15, N 1.
2. Кутателадзе С. С., Ивакин В. П., Кирдяшкин А. Г., Кекалов А. И. Турбулентная естественная конвекция в вертикальном слое // ТВТ.— 1977.— Т. 15, № 3.
3. Кирдяшкин А. Г., Семенов В. И., Бердников В. С., Гапонов В. А. Структура температурного поля в вертикальном слое при тепловой гравитационной конвекции // ТВТ.— 1982.— Т. 20, № 5.
4. Кирдяшкин А. Г., Семенов В. И. Спектры пульсации температуры в вертикальном слое при тепловой гравитационной конвекции // ТВТ.— 1983.— Т. 21, № 4.
5. Полежаев В. И., Бунз А. В., Врезуб И. А. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье—Стокса.— М.: Наука, 1987.
6. Кутателадзе С. С., Кирдяшкин А. Г., Ивакин В. П. Турбулентная естественная конвекция у вертикальной изотермической пластины // ДАН СССР.— 1974.— Т. 217, № 6.

г. Новосибирск

Поступила 20/1 1993 г.,
в окончательном варианте — 26/IV 1993 г.

УДК 532.526 — 536.24

В. П. Лебедев, В. В. Леманов, С. Я. Мисюра,
В. И. Терехов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАВЕСЫ В ВЫСОКОТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПРИ БОЛЬШИХ ПАРАМЕТРАХ ВДУВА ЗАЩИТНОЙ СТРУИ

Щелевая газовая завеса широко используется в технике для защиты стенки от воздействия высокотемпературных и химически агрессивных потоков. Эффективность газовой завесы характеризуется распределением относительной безразмерной температуры адиабатической стенки от места подачи охладителя вниз по течению. Существенное влияние на защитные свойства завесы оказывает отношение скоростей струи и потока $m = u_s/u_0$ и степень турбулентности потока $Tu_0 = \sqrt{\langle u'^2 \rangle}/u_0$. Щелевая завеса в широком диапазоне m хорошо изучена только для низкотурбулентного внешнего течения [1—4]. Для высокотурбулентного потока экспериментальное исследование и теоретическое обобщение выполнены в основном для $m < 1$ [5, 6]. В этих работах было установлено, что с ростом турбулизации внешнего течения эффективность завесы существенно снижается. При параметрах вдува, превышающих единицу ($m > 1$), подобных исследований для высокотурбулентных потоков не проводилось.

Известно [1, 2], что в низкотурбулентном потоке наибольшая эффективность охлаждения достигается при условии равенства скорости пристенной струи и скорости основного потока ($m \approx 1$). В этом случае имеет место режим минимального перемешивания между потоками. С уменьшением параметра вдува ($m < 1$) снижается расход газа, увеличивается градиент скорости на границе струи, следовательно, значение эффективности падает.

С увеличением подачи охлаждающего газа ($m > 1$) все большую роль начинает играть интенсификация процессов смешения между пристенной

струей и основным потоком за счет роста градиентов скоростей, в результате чего эффективность также начинает падать.

Очевидно, что механизм воздействия высокотурбулентных пульсаций на процесс смешения потоков при больших параметрах вдува может существенно отличаться от течения при малых вдувах. Для $m < 1$ профиль скорости в пристенном слое достаточно быстро принимает степенной закон. При $m > 1$ в окрестности стенки развивается пристенная струя, а в профиле скорости имеется перегиб с максимумом вблизи стенки. Таким образом, при $m > 1$ есть две резко выраженные области — пристенная со степенным профилем скорости и струйная внешняя область. Такое отличие несомненно должно влиять и на характер проникновения внешних пульсаций к стенке и соответственно на процессы теплопереноса.

Цель данной работы — изучение влияния повышенной турбулентности на поведение газовой завесы в широком диапазоне изменения параметра вдува газа; представленные здесь экспериментальные данные являются продолжением результатов [5]. Там же дано подробное описание экспериментальной установки.

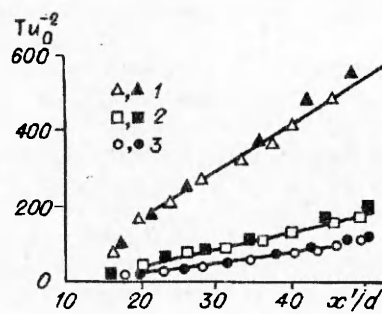
Эксперименты проведены в цилиндрическом канале с адиабатическими стенками. На входе в рабочий участок имеется кольцевая тангенциальная щель высотой $s = 2$ мм, через которую подается вторичный поток газа. Внутренний диаметр цилиндрического канала $D_0 = 80$ мм. Опыты проведены при числе Рейнольдса основного потока $Re_0 = u_0 D_0 / \nu = 8 \cdot 10^4$, параметр вдува вторичного потока воздуха $m_1 = \rho_s u_s / \rho_0 u_0 \approx 0,2 \div 2,5$, температура основного и вдуваемого газа соответственно $T_0 = 292$ К, $T_s = 360$ К, интенсивность турбулентности набегающего потока на входе в рабочий участок $Tu_0 = 0,2 \div 15$ %. Повышенная турбулентность основного потока создавалась генераторами турбулентности в виде дисков с отверстиями. Разная начальная степень турбулентности достигалась варьированием числа отверстий в турбулизаторе. Несмотря на высокий уровень турбулентности, создаваемый такими турбулизаторами, профили пульсаций на входе в рабочий участок были равномерны за счет поджатия потока в конфузоре, который располагался между турбулизатором и рабочим цилиндрическим каналом. Степень поджатия потока в конфузоре равна 7,2. Интегральный масштаб турбулентности на входе в рабочий канал $L = 6 \div 10$ мм. Минимальная интенсивность турбулентности ($Tu_0 = 0,2$ %) в опытах достигалась заменой турбулизатора мелкоячеистой сеткой.

Динамические характеристики потока воздуха измерялись термоанемометром постоянной температуры DISA-55M. Сбор и обработка экспериментальных данных по температуре, средней скорости, степени турбулентности и другим характеристикам осуществлялись с помощью автоматизированной системы [7]. Проведенный ранее анализ опытных данных [5] показал, что на входе в рабочий участок имеются равномерные профили скорости и степени турбулентности. Максимальная неравномерность скорости при $Tu_0 \approx 0,2$ % не превышала 2 %, а при $Tu_0 \approx 15$ % составляла $10 \div 12$ %. Профиль скорости в пограничном слое основного потока в сечении среза щели хорошо описывался ($Tu_0 \approx 0,2$ %) степенной зависимостью с показателем $1/n = 1/7$, толщина вытеснения при этом 0,37 мм.

Часто для описания вырождения турбулентности за решеткой используют зависимость [8]

$$(1) \quad 1/Tu^2 = C (x'/d - x_s/d)^N,$$

где C , N — константы; d — размер ячейки решетки; x_s — координата эффективного начала отсчета. Однако зависимость (1) обычно используется для решетки с большим количеством ячеек. За таким турбулизатором устанавливается однородное квазиизотропное поле турбулентных пульсаций. Анизотропия турбулентных пульсаций $|\langle u'^2 \rangle - \langle v'^2 \rangle| / \langle u'^2 \rangle \cdot 100$ % (u' , v' — продольная и поперечная пульсации скорости) составляет несколько процентов. Дисковый же турбулизатор имеет неоднородность расположения отверстий и два характерных масштаба — диаметр отверстия и расстояние



Р и с. 1

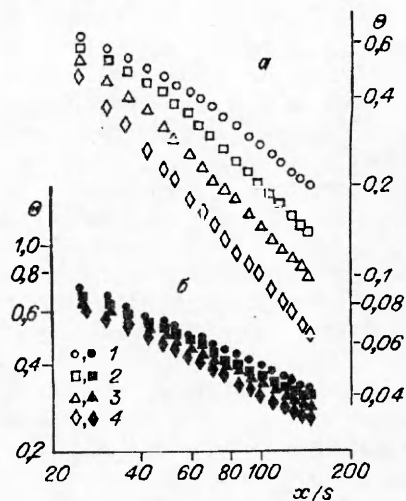
между отверстиями. Несмотря на это, видно (рис. 1), что изменение Tu_0 за дисками с отверстиями также хорошо описывается соотношением (1), если за характерный масштаб d принять диаметр отверстия турбулизатора. Продольная координата x' начинается в месте расположения турбулизатора и обезразмеривается по диаметру отверстия диска $d = 10$ мм. Координате среза щели соответствует значение $x'/d = 26,4$. Опытные данные взяты для различных значений начальной Tu_0 : точки 1 — 7 % (25 отверстий в турбулизаторе), 2 — 12 % (13 отверстий), 3 — 15 % (7 отверстий). Светлые точки характеризуют изменение степени турбулентности без вдува вторичного потока, темные — со вдувом при $m \approx 2$. Видно, что вдув газа слабо влияет на вырождение турбулентности.

Представление данных рис. 1 по вырождению турбулентности в виде зависимости интенсивности турбулентности Tu_0 по длине канала, как это сделано в [5], показывает значительное уменьшение степени турбулентности вблизи турбулизатора и достаточно слабое на больших расстояниях вниз по потоку. Поэтому при анализе опытных результатов по эффективности завесы величина Tu_0 принималась постоянной по длине рабочего канала при высоких и низких начальных уровнях турбулентности.

На рис. 2 показано изменение эффективности завесы $\Theta = (T_w - T_0) / (T_s - T_0)$ (T_w — температура стенки рабочего канала) в зависимости от безразмерной продольной координаты x/s . Координата x отсчитывается от среза щели вдоль оси канала. Данные представлены для различного начального уровня турбулентности Tu_0 : точки 1 — 0,2 %, 2 — 7 %, 3 — 12 %, 4 — 15 %. Светлые точки соответствуют $m_1 = 0,57$, темные — $m_1 = 2,0$. При $m_1 \approx 0,57$ (рис. 2, а) влияние турбулентности на эффективность значительно; так, с ростом Tu_0 от 0,2 до 15 % Θ уменьшается в 3 раза. При больших параметрах вдува (рис. 2, б) воздействие турбулентности на защитные свойства завесы значительно уменьшается. Следовательно, большие параметры вдува газа делают завесное охлаждение более устойчивым к воздействию турбулентных пульсаций внешнего течения, и при $m_1 \approx 2$ расслоение экспериментальных данных для различного уровня Tu_0 незначительно.

Поскольку отмечено разное влияние на Θ повышенной турбулентности при больших и малых параметрах вдува, проанализируем более подробно изменение Θ от m_1 . Зависимость $\Theta = f(m)$ при различном начальном уровне турбулентности представлена на рис. 3 при фиксированном параметре $\bar{K}_1 = 14$ ($K_1 = Re_{\Delta x} / Re_s^{1,25}$, $Re_{\Delta x} = \rho_0 u_0 \Delta x / \mu_0$, $Re_s = \rho_s u_s s / \mu_s$, $\Delta x = x - x_0$, x_0 — длина начального участка, где $\Theta \approx 1$), обозначение точек соответствует рис. 2.

Для низкой Tu_0 эффективность возрастает с ростом параметра вдува вторичного потока до $m \approx 1$, где Θ имеет максимальное значение. При дальнейшем увеличении m эффективность завесы уменьшается, асимптотически приближаясь к значению эффективности при $m = 0,6$. Повышенная внешняя турбулентность значительно ухудшает защитные свойства



Р и с. 2

газовой завесы в широком диапазоне m (по сравнению с данными для $Tu_0 \approx 0,2 \%$). Кроме того, поведение высокотурбулентной завесы качественно отличается от низкотурбулентной: Θ монотонно возрастает с увеличением m во всем измеряемом диапазоне параметра вдува вторичного потока воздуха. Даже при $m > 1$ в отличие от низкотурбулентного потока эффективность завесы продолжает расти, асимптотически приближаясь к значению Θ при низкой Tu_0 .

Начиная с $m \approx 2 \div 2,5$, эффективность завесы для турбулизированного внешнего потока практически перестает зависеть от скорости вдуваемого газа. Поэтому дальнейшее увеличение расхода газа, подаваемого на охлаждение, не приведет к заметному улучшению защитных свойств завесы и такие режимы энергетически будут не экономичными.

При обобщении опытных данных по эффективности завесы обычно требуется знать длину начального участка x_0 — расстояние от среза щели вниз по потоку, где $\Theta \approx 1$. Проанализируем изменение x_0 в рассматриваемых условиях течения. Тепловой начальный участок x_0 определяется из графика зависимости $\Theta = f(x/s)$ (см. рис. 2) путем пересечения координаты $\Theta = 1$ с прямой, проходящей через экспериментальные точки, которые хорошо аппроксимируются линейной зависимостью в логарифмических координатах [9].

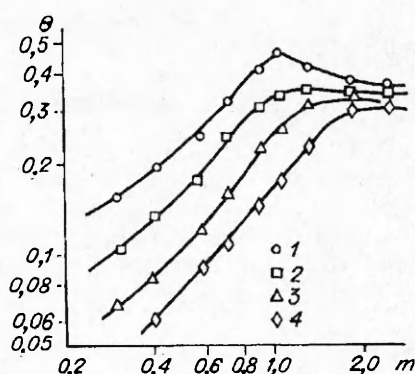
Влияние вдува на длину начального участка показано на рис. 4 для разных уровней турбулентности Tu_0 : точки 1 — 0,2 %, 2 — 15 %. Из графика видно, что с ростом степени турбулентности длина начального участка уменьшается практически во всем измеренном интервале m . Влияние параметра вдува газа на x_0 неоднозначно. Длина начального участка принимает максимальное значение при $m = 0,8 \div 1,0$, при больших и меньших значениях m величина x_0 уменьшается. При этом x_0 изменяется более сильно при $m < 1,0$.

Для сравнения с экспериментальными данными на рис. 4 приведена кривая 3 для $m < 1$ из [10]:

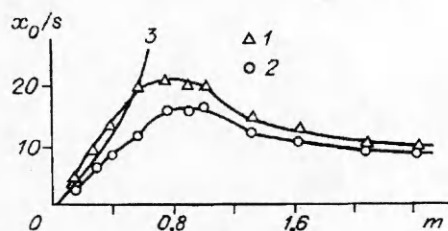
$$x_0/s = (0,112 + 0,036/m)^{-1} (m + 1)/(m - 1).$$

Видно, что результаты расчета по этой зависимости удовлетворительно описывают опытные данные в области $m < 0,6$ при низкой внешней турбулентности.

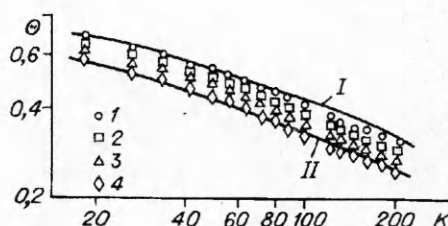
На рис. 5 экспериментальные результаты по эффективности завесы при больших параметрах вдува ($m = 2$) в зависимости от обобщающего параметра K представлены для различных интенсивностей турбулентности Tu_0 : точки 1 — 0,2 %, 2 — 7 %, 3 — 12 %, 4 — 15 %. Увеличение начальной турбулентности приводит к снижению эффективности, однако влияние это не столь существенно по сравнению с газовыми завесами при малых параметрах вдува ($m < 1$) [5].



Р и с. 3



Р и с. 4



Р и с. 5

На рис. 5 приведена расчетная кривая I для низкотурбулентной завесы при $m = 2$ [2]:

$$\Theta = [(1 + 62,5/K)^{0,2} (1 + 62,5/K |1 - m|^{1,25})^{-0,086} - 1]^{0,8} / (1 + 0,016 K)^{0,16}.$$

Из рисунка следует, что для низкой Tu_0 экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетом, а для высокой турбулентности ($Tu_0 = 15\%$) лежат ниже кривой I во всем измеренном диапазоне K .

Для сравнения на рис. 5 кривой II представлена расчетная зависимость для эффективности завесы при $m \gg 1$:

$$(2) \quad \Theta = [1 + (62,5/((\Delta x/s) Re_s^{-0,25} + 0,143))^{0,114} - 1]^{0,8}.$$

Как видно, эта расчетная кривая ограничивает снизу экспериментальные точки. Тогда соотношение (2) можно в первом приближении использовать для оценки эффективности завесы в высокотурбулентном потоке при больших параметрах вдува. Однако для более корректного описания сложного изучаемого процесса необходим детальный учет всех особенностей взаимодействия высокотурбулентного потока со струйной пристенной газовой завесой.

Таким образом, показано, что повышенная турбулентность набегающего потока снижает эффективность щелевой завесы, при этом выявлены основные особенности зависимости Θ от параметра вдува. В отличие от низкотурбулентного потока, когда при $m > 1$ Θ снижается, в высокотурбулентном потоке эффективность завесы продолжает расти и при $m > 1$. При больших вдувах воздействие турбулентности на эффективность завесы уменьшается. Начиная с параметра вдува $m \geq 2$, величина Θ практически не меняется и слабо зависит от степени турбулентности набегающего потока.

Интенсивность турбулентности — далеко не единственная характеристика турбулентного течения. В настоящее время имеется недостаточное количество экспериментальных данных о воздействии различных характерных турбулентных масштабов. Требуется дополнительные сведения о том, каким образом внешняя турбулентность взаимодействует с турбулентностью слоя смешения и пристенной турбулентностью. Возможно, такие данные помогут разработать более эффективные способы защиты поверхности и повысить точность расчета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 93—02—14517).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Волчков Э. П. Пристенные газовые завесы. — Новосибирск: Наука, 1983.
3. Репухов В. М. Теория тепловой защиты стенки вдувом газа. — Киев: Наук. думка, 1980.
4. Эккерт Э. Р. Пленочное охлаждение в газовой среде // ИФЖ. — 1970. — Т. 19, № 3.
5. Лебедев В. П., Леманов В. В., Мисюра С. Я., Терехов В. И. Влияние интенсивности турбулентности на эффективность щелевой завесы // ПМТФ. — 1991. — № 3.
6. Carlson L. W., Talmor E. Gaseous film cooling at various degrees of hot-gas acceleration and turbulence levels // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 1968. — V. 11, N 11.
7. Леманов В. В., Мисюра С. Я. Измерения в двумерном потоке с помощью автоматизированного термоанемометра // Сиб. физ.-техн. журн. — 1991. — № 3.
8. Бэтчелор Дж. К. Теория однородной турбулентности. — М.: ИЛ., 1955.
9. Seban R. A. Heat transfer and effectiveness for a turbulent boundary layer with tangential fluid injection // Trans. ASME Ser. C. — 1960. — N 4.
10. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. — М.: Физматгиз, 1960.

г. Новосибирск

Поступила 19/III 1993 г.