

УДК 532.526:537.523.5

Способы повышения эффективности пленочного охлаждения с помощью вихревых пристенных струй*

В.И. Терехов, Н.Е. Шишкин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования влияния способов организации пристенных газовых завес на тепловую эффективность. Рассматриваются закрученные завесы при вдуве как по нормали к оси, так и при соосной подаче охлаждающего газа. Рассматривается влияние степени закрутки, соотношение плотностей обоих потоков, а также режимов течения на эффективность пристенных завес.

Ключевые слова: закрученная газовая завеса, тепловая эффективность, способы организации пристенных завес.

Введение

Развитие новой техники, энергетики и химической технологии связано, как правило, с повышением температуры рабочих процессов, в значительной степени превышающих пределы тепловой стойкости наиболее теплонапряженных узлов конструкций энергоустановок. Одним из распространенных методов защиты рабочих поверхностей от высокоэнthalпийных или химически агрессивных потоков является пристеночное пленочное охлаждение. Изучению теплозащитных свойств газовых завес посвящено большое число работ [1–4]. Подробно исследованы классические способы подачи охлаждающего газа — вдув через плоскую или кольцевую щель, подача охладителя через пористые пояски и многие другие. Конструктивные особенности рабочих агрегатов не всегда позволяют организовать защиту поверхностей по наиболее выгодной схеме течения. К таковым можно отнести струйные течения, вдуваемые под углом $\leq 90^\circ$ к основному потоку [2, 3], в том числе и струи, подаваемые нормально или навстречу горячему потоку газа [5–8]. Работы в этом направлении в последние годы получили интенсивное развитие.

Осуществление закрутки охлаждающей струи позволяет более активно управлять пограничным слоем, изменять аэродинамические характеристики проточной части. Закрутка периферийного потока широко используется в плазмотронах с вихревой стабилизацией дуги, тепловой защиты, в вихревых горелках, форсунках и камерах сгорания для устойчивого горения [9]. Широко применяются закрученные потоки для охлаждения лопаток газовых турбин двигательных установок. Однако многие аспекты этой сложной

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы ОЭМПУ РАН 2.10 «Экспериментальное, теоретическое и численное исследование фундаментальных процессов тепло- и массообмена в многофазных турбулентных потоках».

проблемы остались неизученными. К таковым относится способ подачи закрученной струи в канал и особенности влияния угла закрутки при различных режимах течения и фактора неизотермичности смешивающихся потоков на тепловую эффективность.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию программы исследований пристенных закрученных струй, начатых под руководством Э.П. Волчкова [2]. Основное внимание уделено поведению температуры адиабатической стенки (или концентрации вдуваемого газа вблизи поверхности) для нескольких характерных схем организации закрученных завес в ограниченных каналах.

Схемы организации закрученных газовых завес

Существует большое число способов подачи закрученной периферийной охлаждающей струи во внутрь осесимметричного канала. Некоторые наиболее распространенные из них представлены на рис. 1.

На рис. 1, *a* охладитель поступает через несколько щелей либо отверстий, расположенных тангенциально или под некоторым углом к внутренней поверхности канала. При этом газ вдувается по нормали к оси трубы, затем в процессе взаимодействия с основным потоком он разворачивается на 90° и движется вдоль охлаждаемой стенки. Отметим, что подобный случай вдува закрученной веерной струи практически не исследовался. В настоящей работе для сопоставления с безвихревым течением, охлаждающий газ поступал через пористый поясok шириной 6 мм.

Во втором случае (рис. 1, *b*) вдуваемый газ закручивается вставкой (1) таким же образом, как описано для рис. 1, *a*, но далее по коаксиальному соплу с криволинейными стенками (2) трансформируется к спутному течению с основным потоком в канале (3). Как было показано в работе [10], к моменту выхода периферийного потока в цилиндрический канал с кольцевой щелью высотой $s = 2$ мм на срезе щели формировалась волнообразная структура течения, подобная вихрям Гертлера–Тейлора, что приводило к сильной неравномерности параметров по образующей кольцевого сопла.

Чтобы избежать возникновения вторичных течений и иметь возможность устанавливать любую степень закрутки к началу взаимодействия двух потоков (а образующиеся вихри разрушают интенсивность вращения), в третьем варианте (рис. 1, *c, d*) закрутка

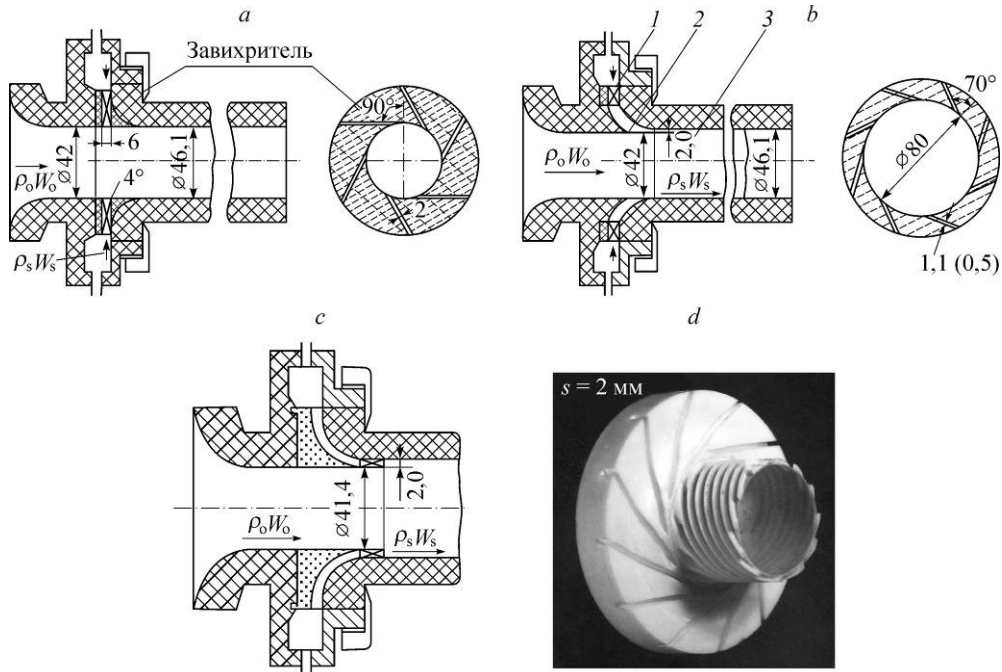


Рис. 1. Схемы подвода периферийного потока для защиты рабочей поверхности (размеры даны в мм).

струи осуществлялась с помощью винтообразной многозаходной нарезки с той же высотой щели $s = 2$ мм (рис. 1, *d*). Подобные завихрители имели различные углы на выходе, что позволяло проводить эксперименты с различной интенсивностью закрутки периферийного потока.

Эффективность тепловой защиты адиабатической поверхности принято характеризовать безразмерной температурой стенки [1–3]

$$\theta = (T_{ст}^* - T_{ст}) / (T_{ст}^* - T_{ст})_1, \quad (1)$$

где $T_{ст}^*$ — равновесная температура стенки в текущем сечении без тепловой завесы, т. е. при изотермическом подводе обоих потоков. $T_{ст}$ — температура адиабатической поверхности при наличии завесы. Индекс 1 означает, что параметры берутся в сечении среза щели.

В общем случае при течении сжимаемого газа с химическими реакциями, смешении газов, отличающихся по своим физическим свойствам, эффективность газовой завесы выражается через энтальпии

$$\theta = (i_{ст}^* - i_{ст}) / (i_{ст}^* - i_{ст})_1. \quad (2)$$

Степень закрутки периферийного потока в начальном сечении характеризовалась следующими величинами:

- а) углом наклона лопаток (ребер) закручивающих устройств,
- б) интегральным параметром закрутки [11], широко используемым при анализе полностью вращающихся течений в каналах и определяемым по формулам

$$\Phi = \frac{M}{KR_k} \quad \text{либо} \quad \Phi_* = \frac{M}{K_*R_k}, \quad (3)$$

где R_k — радиус канала, $M = 2\pi \int_0^{R_k} \rho V_x V_\varphi r^2 dr$ — осевая составляющая потока момента количества движения, $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$, V_x — продольная или осевая компонента скорости, V_φ — окружная, вращательная компонента скорости, $K = 2\pi \int_0^{R_k} (p + \rho V_x^2) r dr$ — осевая составляющая полного потока количества движения, а $K_* = 2\pi \int_0^{R_k} \rho V_x^2 r dr$ — осевая составляющая потока количества движения.

Вдв завесы по нормали к основному потоку

Вдв охладителя через нормальную кольцевую щель (рис. 1, *a*) за счет подвода дополнительной массы вынуждает основной поток ускоряться. Тогда как при обтекании плоской поверхности полагается, что параметры в основном потоке не меняются. Критерием осесимметричности течения и ограниченности струйного взаимодействия может служить величина s/D_k (D_k — диаметр канала), которая для плоской рабочей поверхности стремится к нулю.

Ранее влияние величины s/D_k на эффективность незакрученной завесы не рассматривалось, поэтому были сопоставлены результаты экспериментов, проведенные при одинаковом параметре вдува $m = \rho_s W_s / \rho_0 W_0 = 0,33$, на плоской поверхности [3], в трубе [5] при $s/D_k = 0,056$, и в настоящих опытах, когда $s/D_k = 0,13$. Широко используемый в работах по пленочному охлаждению параметр m представляет собой произведение средних значений плотности и скорости в щели к этим величинам в основном потоке. Из рис. 2 следует, что в условиях стесненности движения перемешивание обоих потоков увеличивается в $\sim 1,5$ раза сразу за местом вдува. Однако далее вниз по течению, когда

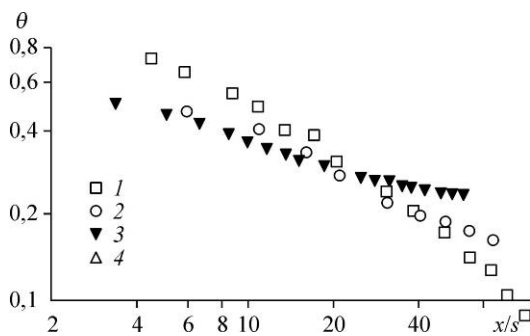


Рис. 2. Газовая завеса на пластине и в трубе при нормальной незакрученной подаче.

$m = 0,33$ (1), 0,36 (2), 0,33 (3), 0,18 (4); s/D — обтекание пластины (1), 0,056 (2), 0,13 (3); $\theta_{cm} = 0$ [3] (1), 0,074 [5] (2), 0,156 (3), 0,093 (4).

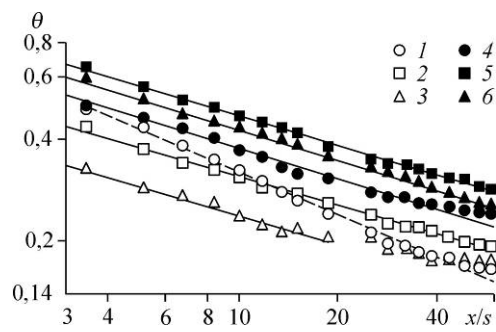


Рис. 3. Влияние интенсивности расхода и степени закрутки струи при нормальном вдуве.

$m = 0,183$ (1–3), 0,33 (4–6); $\Phi = 0$ (1), 0,064 (2), 0,171 (3), 0 (4), 0,708 (5), 0,553 (6); $M = 0$ (1), 5,62 (2), 15 (3), 0 (4), 18,7 (5), 48,6 (6) $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$.

область струйного пограничного слоя распространяется на все сечение канала, процессы смешения замедляются. Изменения безразмерной температуры стенки θ в стесненных условиях становятся меньше и, как видно из рис. 2, в конце исследованного рабочего участка опытные точки располагаются даже выше, чем при полуограниченном течении. Последнее объясняется тем, что при полном перемешивании коаксиальных потоков безразмерная температура стенки не может быть ниже предельного значения θ_{cm} , равного отношению $G_s / (G_s + G_0)$, здесь G_s — расход в щели, а G_0 — расход основного потока.

Влияние закрутки охладителя при нормальном вдуве рассматривается на рис. 3 для двух значений m . Оно сказывается неоднозначно в зависимости от расхода ддуваемого газа. При $m = 0,183$ с увеличением момента вращения периферийной струи возрастает приток массы из основного потока в пристенную область и значение θ здесь резко падает. Однако далее движение воздуха стабилизируется, снижение θ замедляется, и в конце рабочего участка опытные точки располагаются несколько выше относительно незакрученного течения.

При большем параметре вдува ($m = 0,33$) закрутка вторичного потока способствует возрастанию эффективности завесы на всех расстояниях от места вдува. Обращает на себя внимание сохранение наклона прямых, проведенных по опытным точкам, независимо от степени закрутки периферийного потока (в указанном диапазоне).

Спутная закрученная завеса

В этом случае вторичный поток подавался через сужающее коаксиальное сопло (рис. 1, *b*). Как было показано в работе [10], к моменту выхода периферийного потока в цилиндрический канал на срезе щели формировалась волнообразная структура течения типа вихрей Гертлера–Тейлора. Чтобы устранились от вторичных течений и иметь возможность устанавливать любую степень закрутки к началу взаимодействия двух потоков в третьем варианте закрутка осуществлялась на выходе вторичного потока в канал (рис. 1, *c*).

В настоящих исследованиях проводились эксперименты при небольшой разнице температур потоков $T_0 - T_s \approx 60^\circ$. Сопоставление результатов опытов с закруткой холодного и горячего воздуха показало, что эффективность завесы при указанном отличии потоков по температуре практически одинакова (рис. 4). На рисунке приведены характерные данные об эффективности завесы для $\varphi_s = 0,74^\circ$ и параметров вдува $m = 0,5$ и 5. Эффективность тепловой завесы при небольшом параметре вдува $m = 0,5$ и углах ее закрутки $\varphi_s = 58 \div 74^\circ$ уменьшалась на близких расстояниях от щели. При удалении от щели вниз по потоку опытные данные по эффективности закрученной и незакрученной

Рис. 4. Эффективность завесы (III вариант — рис. 1, с) при охлаждении и нагревании поверхности канала.

0° (1–4); 74° (5–8); $m = 0,5$ (1, 2, 5, 6), 5 (3, 4, 7, 8); $\rho_s/\rho_0 = 0,84$ (1, 3, 5, 7), 1,2 (2, 4, 6, 8).

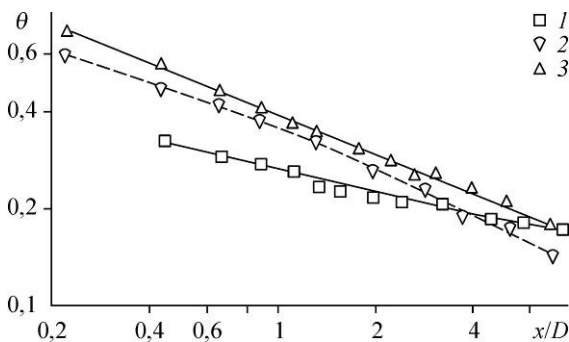
завес сближаются. При больших расходах вторичного потока, в опытах это было $m > 2$, закрутка периферийного газа способствовала увеличению эффективности тепловой защиты на всех расстояниях от входа (рис. 4).

Сопоставление эффективности завесы при всех трех способах подвода закрученного потока в рабочий участок сделано следующим способом. Для рис. 5 были отобраны данные опытов с одинаковым соотношением расходов $G_s/G_0 \approx 0,1$ и интегральной интенсивностью закрутки потока на выходе Φ_* , либо с близким углом φ_s . Эффективность охлаждения рассматривалась в зависимости от продольной координаты $x/D_{кр}$, что имеет более наглядный характер в проводимом сопоставлении, чем в зависимости от x/s .

Как видно из приведенного графика (рис. 5), наилучшие качества защиты проявляет вторичный поток, поступающий через тангенциальную кольцевую щель, если закрутку завесы осуществлять на выходе из сопла. Несколько ниже, на $5 \div 10\%$, эффективность завесы в случае, когда завихритель вынесен вовнутрь подводящей системы, однако темп снижения θ в обоих случаях практически одинаков. Что касается вдува в цилиндрический канал через касательные к боковой поверхности отверстия, эффективность такой завесы вблизи начального сечения была на $\sim 40\%$ ниже относительно θ при тангенциальном вдуве. Однако ниже по течению изменение температуры стенки замедляется, значение θ при всех способах выравнивается. По-видимому, за местом вдува движение в канале быстро стабилизируется, течение по характеру становится близким к установившемуся полностью закрученному потоку в трубе.

Закрученные завесы при ламинарном и турбулентном режимах течения

Как было показано в работе [1], закономерности развития газовых завес существенно отличаются для турбулентного и ламинарного режимов течения. Чтобы сопоставить эффективность охлаждения при обоих режимах, а также в переходной области, были проведены опыты, в которых параметр вдува $m = 0,5$ поддерживался постоянным, а расходы подаваемых потоков варьировались. Значение эффективности завесы в зависимости от числа Re_0 (а также от среднерасходной скорости основного потока W_0) показано на рис. 6, а как вблизи от начального сечения $x/s = 15$, так и на удаленном расстоянии



$x/s = 145$. Как видно из рисунка, уменьшение Re_0 от $\sim 2 \cdot 10^5$ до $\sim 5 \cdot 10^4$ ведет к снижению θ примерно на 20% . При последующем уменьшении

Рис. 5. Охлаждение закрученным вихрем при различных способах его организации.

$\Phi = 0,171$ (1, 3); $\varphi_s^0 = 90$ (1), 76 (2), 74 (3); номера вариантов закручивающих устройств: I — рис. 1, а, II — рис. 1, б, III — рис. 1, с.

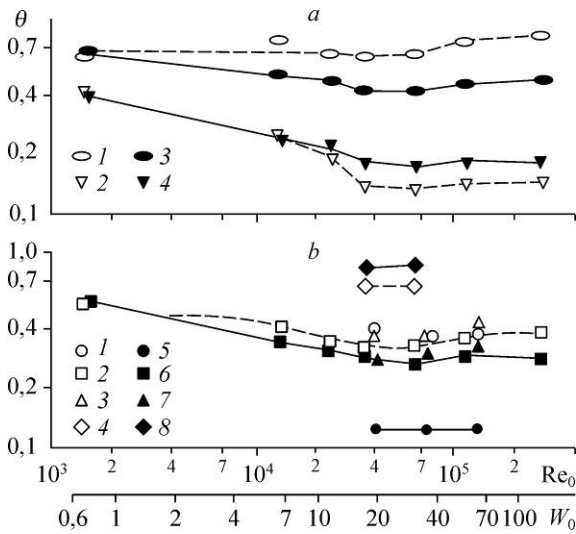


Рис. 6. Влияние числа Re_0 или скорости потока (W_0) на эффективность охлаждения.

a — $m = 0,5$; 0° (1, 2), 74° (3, 4); $x/s = 15$ (1, 3), 145 (2, 4); b — $x/s = 40$; 0° (1–4), 74° (5–8), $m = 0,18$ (1, 5), 0,5 (2, 6), 0,58 (3, 7), 5 (4, 8); $\rho_s/\rho_0 = 0,13$ (1, 5), 1,2 (2, 6), 1,36 (3, 7), 1,2 (4, 8).

скоростей газовых потоков эффективность охлаждения θ возрастает до ее значения при ламинарном течении.

Рисунок 6, b характеризует эффективность завесы в промежуточном сечении $x/s = 40$, он дополнен несколькими опытными данными при $m = 5$, а также результатами

измерения концентрации аргона и гелия на стенке. Здесь также наблюдается тенденция зависимости θ от Re_0 . Диапазон исследования вдува инородного газа является недостаточным, чтобы можно было оценить влияние Re_0 на эффективность также в переходном и ламинарном режимах, однако имеющиеся результаты измерений хорошо дополняют эксперименты с тепловой завесой. Опыты с завесой из аргона, которые были проведены при несколько большем параметре вдува, чем $m = 0,5$, показали хорошее совпадение с результатами для тепловой завесы. Измерения концентрации гелия на стенке канала при $m = 0,18$ показали, что в достаточно большом диапазоне изменения скорости ($W_0 = 15 \div 50$ м/с) величина θ практически остается постоянной. Из характера изменения θ можно заключить также, что на начальном участке трубы влияние закрутки периферийного потока на θ определяется величиной безразмерного параметра закрутки (3).

Результаты измерения θ в случае закрученной и незакрученной газовой завесы при малой скорости основного потока представлены на рис. 7, там же указаны исходные параметры, характеризующие оба потока перед началом смешения. Как видно из рисунка, параметр эффективности завесы при ламинарном режиме течения снижается более слабо, влияние закрутки вдуваемого газа на эффективность завесы практически отсутствует.

На ламинаризацию и процессы струйного смешения большое влияние оказывает соотношение плотностей коаксиальных потоков ρ_s/ρ_0 . Результаты измерений концентрации инородных газов при $W_s/W_0 < 1$ показаны на рис. 8. Сравниваются эксперименты при близких значениях относительной скорости вдува, совокупно с ними нанесены также опытные данные об эффективности тепловой завесы. Как видно из графика, закрутка вторичного потока уменьшает эффективность завесы при вдуве как более легкого ($\rho_s/\rho_0 = 0,13$), так и более тяжелого ($\rho_s/\rho_0 = 1,2$ и $1,36$) газа. При большом отношении плотностей $\rho_s/\rho_0 = 7,5$ влияние закрутки исчезает, смешение коаксиальных потоков существенно замедляется.

Рис. 7. Эффективность тепловой завесы при ламинарном режиме течения. $m = 0,5$; 0° (1), 74° (2), $W_s = 0,3$ м/с, $W_0 = 0,7$ м/с, $Re_s = 39$, $Re_0 = 1530$.

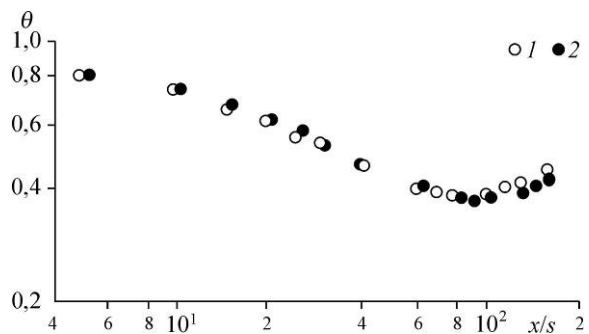


Рис. 8. Распределение весовой концентрации на стенке при вдуве газов различной плотности.

0° (1–4), 74° (5–8), $Q_s/Q_0 = 0,13$ (1, 5), 1,2 (2, 6), 1,36 (3, 7), 7,5 (4, 8); $m = 0,11$ (1, 5), 0,9 (2, 3, 6, 7), 5 (4, 8).

Как показал анализ экспериментальных данных для θ в цилиндрическом канале при турбулентном режиме течения, результаты измерения эффективности тепловой завесы могут быть обобщены с использованием комплекса $K_m = Re_{\Delta x} / [Re_s (\mu_s / \mu_0) (1 - s/D_k)]^{1,25}$. А опытные данные хорошо описываются зависимостью Кутателадзе–Леонтьева

$$\theta = (1 + 0,25 K_m)^{-0,8}. \tag{4}$$

Результаты измерения эффективности закрученной тепловой завесы при разных режимах течения сопоставлены на рис. 9. Здесь представлены опыты (1–3), отображенные на рис. 3, опыты (4), отображенные на рис. 4, данные (5–9), взятые из работы [12]. Сплошной линией показана зависимость Кутателадзе–Леонтьева (4), которой описывается эффективность завесы при турбулентном течении. Как видно из данных, представленных на рис. 9, опытные точки в обобщенных координатах расслаиваются в зависимости от числа Рейнольдса. При $Re_0 > 2 \cdot 10^4 \div 10^5$ эффективность газовой завесы может быть рассчитана по зависимостям, полученным для турбулентного течения. Если $Re_0 < (1,5 \div 2,3) 10^3$, то эффективность тепловой завесы оказывается намного выше расчетной кривой, определяющей защиту поверхности при турбулентном движении.

В случае ламинарного течения обобщающий комплекс записывается в следующем виде: $K_{л} = Re_x / [Re_s (\mu_s / \mu_0) (1 - s/D_k)]^2$, а выражение для эффективности завесы имеет вид

$$\theta = (1 + 10,6 K_{л})^{-0,5}. \tag{5}$$

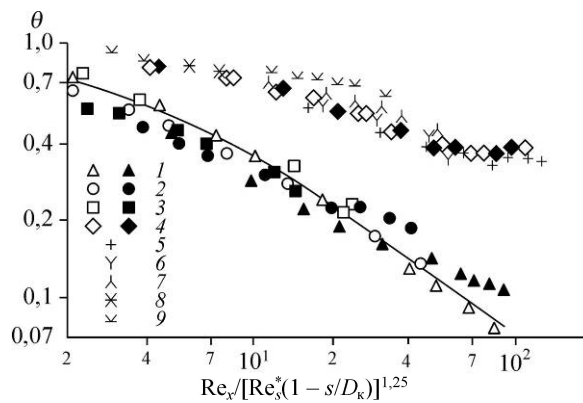


Рис. 9. Сопоставление опытных данных об эффективности закрученной газовой завесы из настоящей работы (1–4) и из работы [12] (символы 5–9) в обобщенных координатах для турбулентного режима течения.

0° (светлые символы 1–4), 74° (темные символы 1–4).

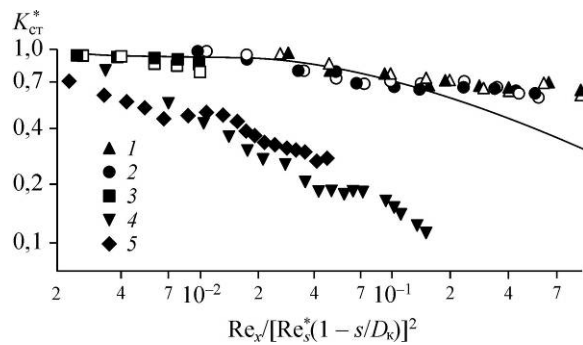


Рис. 10. Распределение весовой концентрации воздуха и аргона на стенке канала в обобщенных координатах для ламинарного течения.

Таблица

Опыты	1	2	3	4	5
m	0,3	0,5	5	0,5	0,9
W_s/W_0	0,04	0,067	0,67	0,36	0,65
Вдув	воздуха в гелий			аргона в воздух	

Результаты измерений из работы [12] в указанных координатах хорошо обобщаются между собой, расчетная зависимость (5), хорошо описывающая $K_{ст}^*$ до значений комплекса $\sim 0,4$, подтверждает ламинарный характер перемешивания потоков.

Исследование вдува воздуха в гелиевый основной поток обнаружило ламинарный характер струйного смешения. Поэтому распределение весовой концентрации воздуха было представлено на рис. 10 (символы 1 ÷ 3) в зависимости от комплекса $K_{ст}^*$. Условия, при которых проводились опыты, приведены в таблице. Нанесена расчетная кривая эффективности ламинарной газовой завесы (ур. 5), которая хорошо описывает опытные точки до значения комплекса меньше 0,15, далее, как и в тепловых опытах (рис. 7) при тех же значениях комплекса, расчет дает более низкие значения эффективности.

Измерения концентрации воздуха на стенке канала были проведены как при незакрученном (светлые символы), так и закрученном ($\varphi_s = 74^\circ$ — темные символы) вторичном потоке. Анализ представленных опытов показал, что в условиях сильных положительных градиентов плотности эффективность завесы практически не зависит от ее закрутки и принимает наибольшее значение.

Кроме опытов с гелиевым основным потоком, на рис. 10 нанесены результаты экспериментов со вдувом аргона ($m = 0,5, 0,9$; $\varphi_s = 74^\circ$, соответственно символы 4 и 5). Как видно, в этом случае влияние центробежных сил оказалось недостаточным, чтобы осуществить ламинаризацию течения, при котором эффективность газовой завесы описывалась бы соотношением (5).

Выводы

Впервые экспериментально исследована эффективность газовой завесы в цилиндрическом канале при переходном и ламинарном режимах течения. Проведены опытные сопоставления эффективности закрученного охлаждения при различных способах его организации. Положительный градиент плотности по радиусу трубы и снижение числа Рейнольдса основного потока способствуют ламинаризации течения. При закрутке периферийной струи полной ламинаризации течения не достигается. Однако в турбулентном режиме течения закрутка пристенной струи повышает его устойчивость — весьма важный фактор в ряде случаев, как например, в плазмотронах с вихревой стабилизацией дуги.

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 343 с.
2. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
3. Репухов В.М. Тепловая защита стенки вдувом газа. Киев: Наукова думка, 1977. 216 с.
4. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
5. Ксталхерман М.Г., Соловова Е.П. Эффективность газовой завесы в трубе при вдуве через щель перпендикулярно потоку воздуха // Газодинамика горения в сверхзвуковом потоке: сб. науч. тр. Новосибирск, 1985. С. 90–101.
6. Terekhov V.I., Mshvidobadze Yu.M. Experimental investigation flow structure and hydraulic resistance of a cylindrical duct with injection a fan slot jet // Int. J. Experimental Thermal and Fluid Sci. 2005. Vol. 29. P. 159–167.
7. Волчков Э.П., Лебедев В.П., Шишкин Н.Е. Эффективность газовой завесы при взаимодействии пристенной струи со встречным потоком // Тепломассобмен—VII: Мат. VII Всесоюз. конф., Минск, май 1984. 1984. Т. 1, ч. 2. С. 44–48.
8. Лебедев В.П., Низовцев М.И. Тепловые характеристики встречной пристенной струи // ЖПМТФ. 1989. № 5. С. 110–113.
9. Volchkov E.P., Lebedev V.P., Terekhov V.I., Shishkin N.E. An experimental study of the flow stabilization in a channel with a swirled periphery jet // Int. J. Heat and Mass Trans. 2000. Vol. 49. P. 375–386.
10. Шишкин Н.Е., Дворников Н.А. Структура вращающегося потока газа в кольцевой щели и эффективность закрученной газовой завесы // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1977. № 3, вып. 1. С. 35–39.
11. Хигир Н.А., Бэр Дж.М. Распределение скорости и статического давления в закрученных воздушных струях, вытекающих из кольцевых расширяющихся сопел // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Сер. D. Теоретические основы инженерных расчетов. 1964. Т. 86, № 4 С. 185–194.
12. Сухович Е.П. Экспериментальное исследование струйного смешения в ограниченном закрученном потоке // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. 1975. № 2. С. 57–63.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2013 г.