

УДК. 621. 438

ХАЛАТОВ А.А., КОВАЛЕНКО А.С., КУЗЬМИН А.В.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН НА ТОРЦЕВОЙ СТЕНКЕ МЕЖЛОПАТОЧНОГО КАНАЛА ПРИ ЕЕ ЗАГРАДИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Часть 1. Щелевая подача охладителя ($\gamma = 0$; $\beta = \text{var}$)

Наведено аналіз впливу конструктивних та режимних параметрів на інтенсивність загороджувального охолодження торцевої поверхні міжлопаткового каналу.

Представлен аналіз впливання конструктивних і режимних параметрів на інтенсивність заградительного охолодження торцевої поверхності міжлопаточного каналу.

Analysis of the influence of design and operative parameters on the intensity of film. A cooling of the end wall of a vane channel is given.

c – скорость;

h – высота лопатки;

l – удаление щели от входа в канал;

$m = \rho_v c_v / \rho_g c_g$ – параметр вдува;

M – число Маха;

Re – число Рейнольдса;

s – ширина щели;

T – температура;

t – шаг решетки;

x – криволинейная координата вдоль характерной линии, отсчитываемая от места вдува;

x' – криволинейная координата вдоль характерной линии, отсчитываемая от переднего фронта решетки;

$\bar{h} = h/t$ – относительная высота лопатки;

$\bar{l} = l/t$ – относительное удаление щели от входа в канал;

$\bar{T}_v^* = T_v^* / T_g^*$ – относительная температура воздуха;

$\bar{x}' = x'_i / x'$ – относительная координата;

α – коэффициент теплоотдачи;

β – меридиональный угол выдува охладителя;

γ – тангенциальный угол выдува охладителя;

λ – коэффициент скорости;

Θ_{zg} – интенсивность заградительного охлаждения;

ρ – плотность.

Индексы верхние:

* – параметры заторможенного потока.

Индексы нижние:

i – текущий параметр;

ад – адиабатическая;

v – воздух;

г – горячий газ;

1 – параметры на входе в канал;

2 – параметры на выходе из канала.

Введение

Межлопаточные криволинейные каналы различного конструктивного выполнения достаточно распространены в современных инженерных приложениях. Характерной особенностью гидродинамики таких каналов является возникновение около их торцевых (плоских) стенок развитых вторичных течений [1]. Вторичные течения существенно влияют на теплообмен в межлопа-

точных каналах, особенно небольшой относительной высоты ($h/t < 0,8 \dots 1,0$) у высокотемпературных газовых турбин, когда тепловые потоки через торцевые и криволинейные стенки канала становятся соизмеримыми. В этом случае при повышении температуры основного потока конвективный способ охлаждения не обеспечивает защиту торцевой стенки. Необходим переход к более эффективному охлаждению, связанному с выдувом охлаждающего воздуха на поверхность.

При заградительном (завесном) охлаждении охладитель подается на защищаемую поверхность, изолируя ее от горячего потока [2]. Ниже по потоку защитный слой размывается, и действие охладителя уменьшается. Организация такого охлаждения требует знания газодинамической картины течения, так как можно не только не достичь требуемого эффекта охлаждения, но и понести дополнительные гидравлические потери.

Заградительное охлаждение поверхности организуют через сплошную или прерывистую щель, ряд круглых или овальных отверстий, перфорированный пояс, выполняемый в предельном случае из пронизываемого (пористого) материала. Определяющий фактор при этом – наиболее полное использование охладителя. Степень защиты поверхности заградительным охлаждением оценивается безразмерным параметром

$$\Theta_{\text{зг}} = \frac{T_{\text{г}}^* - T_{\text{ад}}}{T_{\text{г}}^* - T_{\text{в}}^*}, \quad (1)$$

который часто называют интенсивностью охлаждения [3]. Здесь $T_{\text{ад}}$ – температура адиабатной поверхности, соответствующая реальной температуре охладителя у поверхности.

Заградительное охлаждение плоской пластины организовать нетрудно. К настоящему времени многими исследователями выполнен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении [2, 3]. В случае же торцевой стенки межлопаточного канала на охладитель, выходящий на поверхность, существенно влияют вторичные течения основного потока. Равномерность охлаждения торцевой поверхности нарушается, и появляются ее участки с неудовлетворительным охлаждением. Таким образом, организация заградительного охлаждения торцевой поверхности не является очевидной и требует обязательного учета гидродинамических особенностей пространственного пограничного слоя. В частности, можно выделить два основных способа подачи охладителя на торцевую поверхность (рис. 1.1): с выдувом его в меридиональной ($\gamma = 0$; $\beta = \text{var}$) или же тангенциальной плоскости ($\gamma = \text{var}$; $\beta = 0$).

В работе дан краткий анализ опубликованных результатов экспериментальных исследований

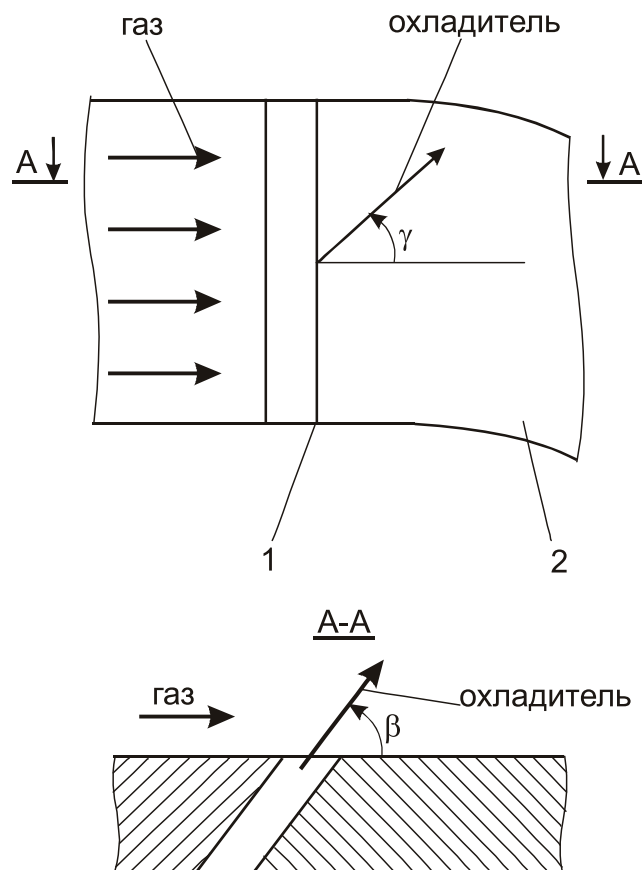


Рис. 1.1. Схема выдува воздуха при заградительном охлаждении: 1 – щель для подачи охладителя; 2 – защищаемая поверхность.

заградительного охлаждения торцевой поверхности межлопаточных каналов соплового аппарата. Рассмотрены гидродинамические особенности потока и интенсивность охлаждения поверхности при различных условиях подачи охладителя на входе в канал (щель, выполненная заподлицо с поверхностью, тангенциальная щель, перфорация). В обзоре использованы как собственные исследования авторов [4], так и работы других исследователей, список которых представлен. Обзор состоит из трех самостоятельных частей.

Особенности подачи охладителя

Выходное сечение щели выполняется на входе в канал заподлицо с торцевой поверхностью. Существующий здесь поперечный градиент давления искажает картину распределения охладителя уже на его выходе, особенно при небольших па-

Таблица. Конструктивные и режимные параметры объектов исследований

№ п/п	Источник	Тип решетки	Условия обтекания	\bar{h}	\bar{l}	s , мм	$Re_1 \times 10^{-5}$	\bar{T}_B^*	m	β , град
1	[5]	активная	$M_1 = 0,17 \dots 0,44$	1,43	0,13	2,35	4,2; 6,3	0,97	0,25; 1,03	90
2	[6]	реактивная	$M_1 = 0,08$	0,41	0	1,65	4,6	0,95	0,5...1,0	30
3	[7]	реактивная	$\lambda_{2ad} = 1,25$	0,89	0,08	1,0	$Re_2 \times 10^{-6} = 2,8$	0,85	0,5...2,0	90

раметрах вдува m . В итоге действительный угол выхода струи охладителя, получая поперечную составляющую в сторону выпуклой стенки, отличается от конструктивного. Вероятно, эта составляющая будет переменной по высоте пограничного слоя и значительно зависеть от угла выдува β .

С другой стороны, при постоянном давлении охладителя в камере коллектора и переменном перепаде давления потока поперек торцевой поверхности локальный параметр вдува поперек канала будет переменным. Наименьшее его значение имеет место около вогнутой стенки, а наибольшее – около выпуклой. При небольшой величине среднего параметра вдува заградительное охлаждение эффективно работает только около выпуклой стенки, поскольку охладитель “сносится” к ней основным течением. При большом поперечном градиенте давления возможно даже перетекание горячего газа через коллектор от вогнутой стенки канала к выпуклой и подмешивание его к охладителю. При увеличении параметра m область подачи охладителя без подмешивания горячего газа расширяется, но неравномерность его выхода из щели сохраняется. И только при достаточно больших значениях m защитная струя охладителя формируется по всей ширине канала, но с переменным параметром вдува поперек канала.

Удаление щели от канала снижает влияние поперечного перепада давления. Однако еще до входа в него вторичное течение, формируемое около торцевой поверхности [4], стремится отклонить завесу охладителя к выпуклой стенке. Потенциальные возможности его, определяемые конструктивными параметрами канала и режи-

мом течения основного потока, достаточно велики. Поэтому реальная картина течения на защищаемой поверхности зависит и от соотношения локальных значений количества движения выдуваемого охладителя и пограничного слоя, участвующего во вторичном течении.

Исходя из вышеизложенного, проанализируем влияние основных факторов, определяющих поведение охладителя при щелевой подаче на входе в канал (таблица).

Безградиентное течение в канале

Рассмотрим вначале организацию охлаждения в межлопаточном канале активной решетки, где отсутствует продольный градиент давления [5]. Охладитель подавался нормально к основному потоку на некотором расстоянии от входа в канал (таблица). Распределение интенсивности охлаждения можно оценить по линиям $\Theta_{зr} = \text{const}$ (рис. 1.2), построение которых обеспечивалось интерполяцией данных по координатам точек замера температуры торцевой стенки. Измерение производилось эквидистантно боковым стенкам канала. При $m = 0,25$ зона торцевой поверхности около вогнутой стенки и на средней линии в области узкого сечения канала (“горле”) охлаждается недостаточно (рис. 1.2, а). Интенсивность охлаждения по потоку уменьшается, а от вогнутой стенки к выпуклой сначала уменьшается, а затем растет. При увеличении m до 1,03 и том же значении Re_1 влияние поперечного градиента на поведение охладителя и, как следствие, неравномерность охлаждения поверхности снижаются. При этом интенсивность охлаждения около вог-

нутой и выпуклой поверхности увеличиваются (рис. 1.2, б). Максимум величины $\Theta_{зг}$ несколько смещается к середине канала и идентифицируется до самого выходного сечения. В связи с этим зона недостаточного охлаждения около вогнутой стенки заметно сокращается.

Результаты экспериментов хорошо согласуются с материалами исследования газодинамической структуры потока в канале [4]. Характер распределения интенсивности охлаждения на торцевой поверхности однозначно определяется существующими в канале вторичными течениями. Так, вторичное течение в пограничном слое торцевой поверхности способствует переносу подаваемого охладителя от вогнутой стенки канала к выпуклой. Правая (вдоль по потоку) ветвь подковообразного вихря, перемещаясь от входной кромки лопатки к выпуклой стенке канала, усиливает эффект переноса. Она сворачивает пограничный слой перед входной кромкой лопатки вместе с попавшим в него охладителем и транспортирует к выпуклой стенке в область образования канального вихря. Левая ветвь входного вихря под влиянием правой ветви и поперечного перепада давления вместе с частью охладителя также сносится в этот район. В результате наблюдается отчетливо выраженный максимум интенсивности охлаждения, направленный вниз по потоку. При небольших m он проявляется только на входе в канал, ближе к выпуклой стенке. С увеличением m этот максимум, смещаясь к середине канала, идентифицируется до его выхода (рис. 1.2, б). Это объясняется появлением в пограничном слое входной части торцевой поверхности течения охладителя к вогнутой стенке. При $m > 1,0$ углы скоса потока по всей длине канала близки к нулю или становятся отрицательными [4], что означает отклонение донных линий тока в сторону вогнутой стенки (к поверхности давления). В итоге направленные навстречу друг другу потоки охладителя локализируются в средней части канала.

Ускорение потока в канале

Влияние отрицательного градиента давления на интенсивность заградительного охлаждения можно оценить по материалам исследований

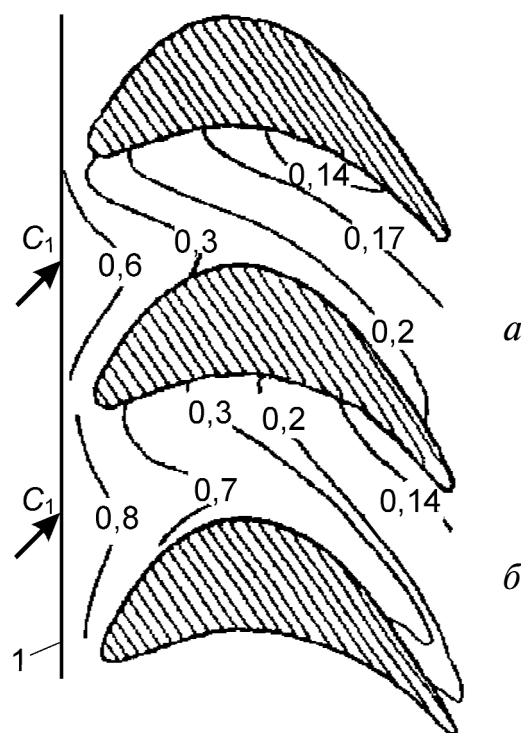


Рис. 1.2. Изолинии интенсивности заградительного охлаждения на торцевой поверхности межлопаточного канала активной решетки ($M_1 = 0,17 \dots 0,44$): а – $Re_1 = 4,2 \cdot 10^5$, $m = 0,25$; б – $Re_1 = 6,3 \cdot 10^5$, $m = 1,03$; 1 – линия “среза” сопла щели.

сопловых каналов. Вначале рассмотрим канал с закругленными входными кромками, имитирующими соседние лопатки реактивной решетки, и выдувом охладителя под углом $\beta = 30^\circ$ [6]. Основные конструктивные и режимные параметры эксперимента приведены в таблице. Измерение температуры торцевой стенки производилось вдоль характерных линий (около вогнутой и выпуклой стенок и в средней части канала). Регулировочные створки на выходе из канала и свободное обтекание на входе обеспечивали характер течения, соответствующий реальному межлопаточному каналу сопловой реактивной решетки.

Распределение $\Theta_{зг}$ на торцевой поверхности канала при $m = 0,75$ аналогично случаю безградиентного обтекания, но имеет некоторые особенности (рис. 1.3). Так, неравномерность этого распределения значительно усилилась. Вдоль вогнутой стенки, начиная от входа, появилась неохлаждаемая зона. Максимум интенсивности

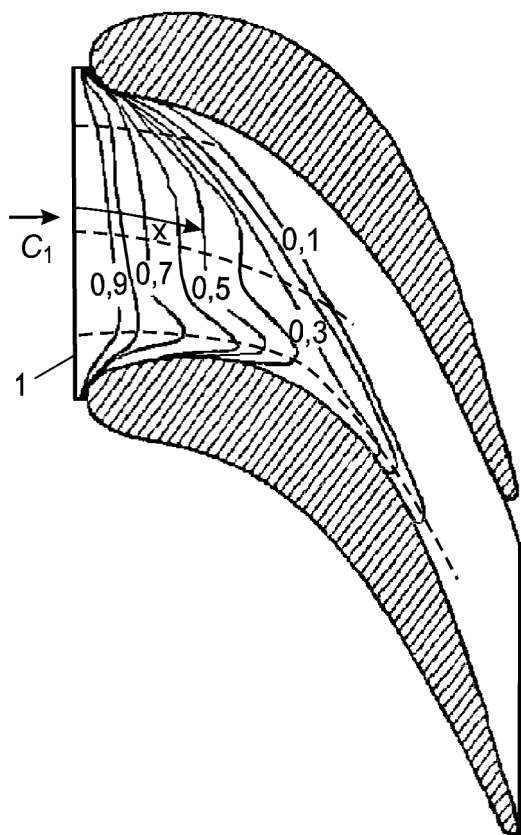


Рис. 1.3. Интенсивность заградительного охлаждения на торцевой поверхности межлопаточного канала дозвуковой реактивной решетки при $m = 0,75$ ($M_1 = 0,08$):
1 – линия “среза” сопла щели.

охлаждения в передней части канала меньше, чем в случае активного канала, и располагается он вплотную к выпуклой стенке. Вероятно, это вызвано увеличением угла входа потока в решетку (по сравнению с безградиентным обтеканием) от 55° до 90° . В результате положение и интенсивность ветвей подковообразного вихря в межлопаточном канале изменились. Угол между более “сильной” правой ветвью и вогнутой поверхностью становится менее крутым, а диссипация вихревого движения в ускоренном потоке намного выше, чем в безградиентном. Потому вторичное течение сильнее отклоняет эту ветвь вихря к выпуклой стенке канала, несмотря на меньший угол поворота потока в реактивной решетке (72°) по сравнению с активной (87°).

Эти результаты получены при небольших докритических перепадах давления на сопловой ре-

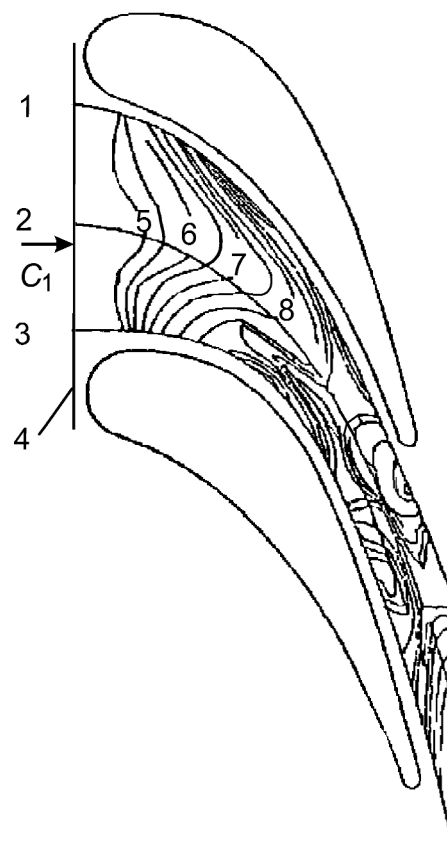


Рис. 1.4. Интенсивность заградительного охлаждения на торцевой поверхности межлопаточного канала сверхзвуковой реактивной решетки при $m = 1,0$ ($\lambda_{2ад} = 1,25$):
1–3 – линии измерения температур (две промежуточные не показаны); 4 – линия “среза” сопла щели; 5–8 – изолинии $\Theta_{зг}$ соответственно 0,60; 0,50; 0,40; 0,30.

шетке, что не соответствует условиям работы первой ступени турбины. Поэтому целесообразно установить особенности поведения воздушной завесы в условиях сверхкритического перепада давления. В работе [7] при сверхзвуковом течении ($\lambda_{2ад} = 1,25$) выдув охладителя производился по нормали к стенке ($\beta = 90^\circ$). Анализируя распределение интенсивности охлаждения по торцевой поверхности при $m = 1,0$, можно выделить два характерных участка (рис. 1.4). Один из них представляет собой входную часть канала до “горла”, а другой – “горло” и зону косога среза.

Во входной части характер распределения $\Theta_{зг}$ по сравнению с докритическим режимом работы не изменился. Однако максимумы изолиний

$\Theta_{зг} = \text{const}$ располагаются не около выпуклой стенки, а в средней части торцевой поверхности. Все изолинии протекают почти симметрично, причем градиент интенсивности охлаждения наименьший посередине канала, а наибольший – около вогнутой стенки. По-видимому, сильный продольный градиент давления, ослабляя входной вихрь, растягивает его по потоку. Одновременно ламинаризация пограничного слоя способствует удержанию в нем охладителя, попавшего сюда еще на входе в канал. Около выпуклой стенки, перед “горлом”, характер распределения $\Theta_{зг}$ свидетельствует о сильном вихреобразовании. При небольших докритических перепадах давления на решетке лопаток здесь происходил отрыв поперечного течения и формировался канальный вихрь, который весь попавший в него охладитель транспортировал на выпуклую стенку и в поток [4]. Влияние этого вихря проявляется и в рассматриваемом случае, но характер изменения $\Theta_{зг}$ в средней части канала дает повод усомниться в его силе. Вероятной причиной может быть достаточная устойчивость ламинарного пограничного слоя на торцевой поверхности, обеспечивающая большую степень его независимости как от канального, так и от подковообразного вихря. Таким образом, в условиях высокого отрицательного продольного градиента давления возможно раздельное существование ослабленного входного вихря, сносимого к выпуклой стенке канала, и канального вихря, возникающего при натекании незначительного вторичного течения на эту же стенку.

Непосредственно в “горле” канала и в области косога среза распределение $\Theta_{зг}$ носит крайне неравномерный характер. Сильная ламинаризация пограничного слоя в районе горла вызывает локальное уменьшение интенсификации теплообмена. Поэтому около вогнутой стенки интенсивность охлаждения возрастает. Кроме того, увеличивается вероятность попадания сюда охладителя из средней части канала, так как сформировавшийся выше по потоку канальный вихрь уже оторвался от торцевой поверхности. Поворот потока в области выходной кромки лопатки при его расширении в пучке характеристик (волн разрежения) способствует попаданию охладителя из верхних слоев пограничного слоя средней части поверхности в область, прилегающую к выпуклой стенке. За зонами повышенных

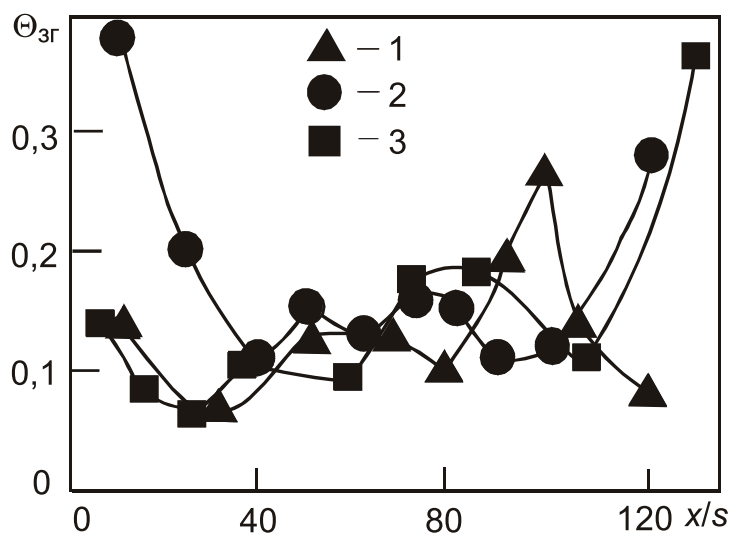


Рис. 1.5. Характер изменения интенсивности заградительного охлаждения на торцевой поверхности межлопаточного канала сверхзвуковой реактивной решетки при небольших параметрах вдува ($\lambda_{2ад} = 1,25$, $m = 0,5$): 1–3 – вдоль вогнутой стенки, средней линии и выпуклой стенки канала соответственно.

значений $\Theta_{зг}$ наблюдается резкое ее падение, вызванное возникновением диффузорного участка с последующим отрывом пограничного слоя.

Влияние параметра вдува

Распределение $\Theta_{зг}$ по торцевой поверхности позволяет качественно оценить влияние на нее гидродинамики течения. Количественную оценку дает анализ зависимостей $\Theta_{зг} = f(x/s)$, построенных вдоль характерных линий поверхности. Исследования сверхзвуковой решетки показывают [7], что независимо от параметра вдува поведение $\Theta_{зг}$ до “горла” канала мало отличается от рассмотренного выше случая решетки с докритическим перепадом давления. При $m = 0,5$ значение $\Theta_{зг}$ на входе около криволинейных стенок намного меньше, чем посередине канала (рис. 1.5). Ниже по потоку интенсивность заградительного охлаждения падает и вплоть до “горла” сохраняется примерно постоянной. За “горлом” характер ее изменения проанализирован выше. Возрастание параметра вдува ведет к усилению интенсивности охлаждения всей торцевой поверхности до “горла”, выравнивая ее по фронту

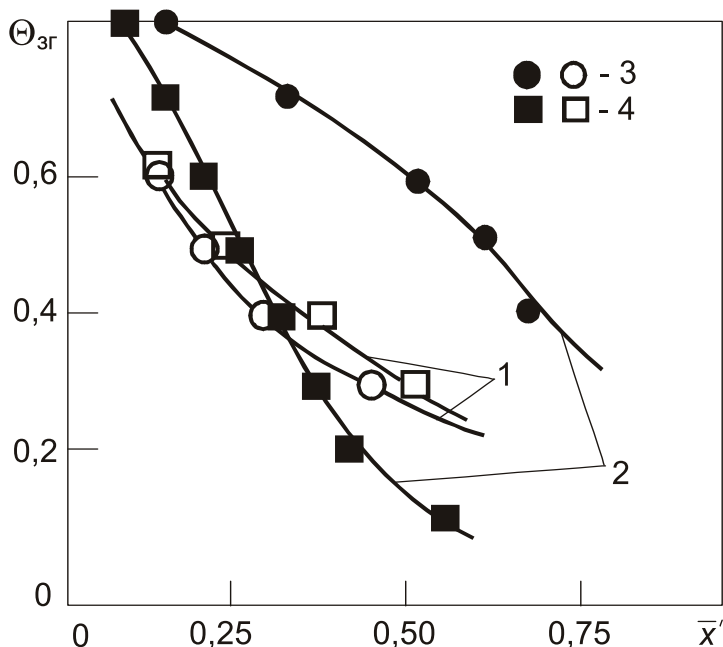


Рис. 1.6. Влияние меридионального угла выдува на интенсивность охлаждения торцевой поверхности межлопаточного реактивного канала: 1, 2 – $\beta = 90^\circ$ и 30° ; 3, 4 – около выпуклой и вогнутой стенки канала.

решетки; но при $m \geq 1,0$ параметр вдува уже не влияет на характер распределения $\Theta_{зг}$. За “горлом” канала качественная картина распределения $\Theta_{зг}$ остается неизменной при любом параметре вдува. Причина такого явления рассмотрена выше.

Влияние угла подачи охладителя

Исследования $\Theta_{зг}$ при разных β и близких параметрах вдува ($m = 0,75 \dots 1,0$) показали (рис. 1.3, 1.4) существенные различия в характере распределения $\Theta_{зг}$ на торцевой стенке входной части канала (до “горла” решетки). Очевидно, это объясняется не только влиянием ускорения основного потока. Так, около выпуклой стенки канала при уменьшении угла выдува от 90° до 30° увеличение $\Theta_{зг}$ составляет 100...150% (рис. 1.6). Вдоль вогнутой стенки возрастание $\Theta_{зг}$ значительно меньше, а при $\bar{x}' > 0,25$ она даже резко падает.

Таким образом, при $\beta = 30^\circ$ наблюдается существенная неравномерность охлаждения торцевой стенки. При нормальном выдуве охлаждение поверхности поперек канала более равномерно, хотя

и при более низких значениях $\Theta_{зг}$. Интересной особенностью влияния угла выдува является смена приоритетности в распределении $\Theta_{зг}$ поперек канала. При $\beta = 30^\circ$ лучше охлаждается область вдоль выпуклой стенки, а при $\beta = 90^\circ$ – около вогнутой. Отмеченные особенности в значительной мере обусловлены воздействием вторичных течений в решетке на поведение выдуваемого охладителя. Чем меньше угол β (конструктивно он, естественно, ограничен), тем больше воздуха попадает во входной пограничный слой. Поэтому при $\beta = 30^\circ$ практически весь охладитель захватывается подковообразным вихрем и вторичным течением. Перемещаясь к выпуклой стенке, он интенсивно охлаждает торцевую поверхность. Кроме того, свою долю вносит и локальный параметр вдува, который около выпуклой стенки наибольший.

Для $\beta = 90^\circ$ основная масса воздуха при выдуве не попадает в пограничный слой и не участвует во вторичном течении. К тому же вторичное течение, вследствие меньшей толщины пограничного слоя при сверхзвуковом перепаде давления, будет менее интенсивным. Поэтому торцевая поверхность около вогнутой стенки охлаждается лучше из-за транспортировки сюда охладителя из пристенной части потока под влиянием углового вихря и правой ветви входного вихря [4]. У выпуклой стенки ветви подковообразного вихря отесняют пристенный слой потока вместе с попавшим в него охладителем в ядро течения, что уменьшает здесь потенциальные возможности охлаждения.

Представление экспериментальных результатов

Обработка материалов исследования при меридиональном выдуве охладителя обычно производится с использованием комплексных параметров [6]. Из материалов исследований видно (рис. 1.7), что интенсивность охлаждения вдоль вогнутой стенки уменьшается намного быстрее, чем в средней части канала или вдоль его выпуклой стенки. Наименьший разброс экспериментальных точек наблюдается посередине канала, особенно по сравнению с областью около выпуклой стенки. Несмотря на представление опытных данных в обобщенной форме, удовлетворительное согласование результатов эксперимента для

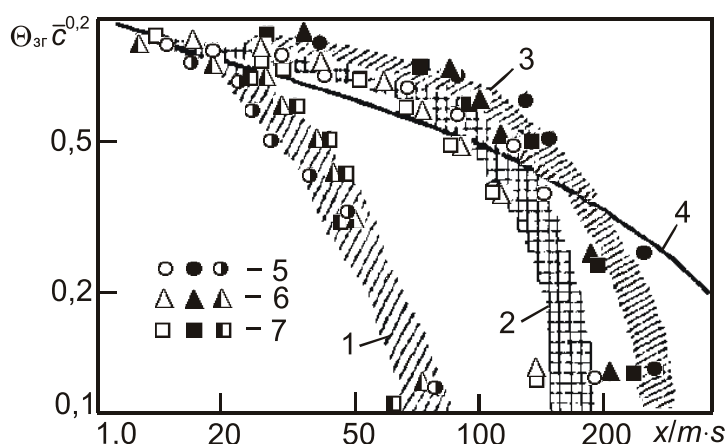


Рис. 1.7. Интенсивность охлаждения торцевой поверхности межлопаточного канала реактивной решетки в обобщенных координатах: 1–3 – около вогнутой стенки, средней линии и выпуклой стенки канала соответственно; 4 – результаты экспериментов на плоской пластине в потоке с ускорением; 5–7 – $m = 0,50; 0,75$ и $1,0$ соответственно.

анализируемого способа подачи охладителя и плоской пластины наблюдается в ограниченном диапазоне изменений параметра длины. Причем около вогнутой стенки канала этот диапазон ограничен величиной $x/ms \leq 30$, а для средней части канала и около выпуклой – $x/ms \leq 180$. Различие результатов, полученных для торцевой стенки и для плоской пластины [8], однозначно объясняется лишь влиянием вторичных течений в межлопаточном канале [4].

Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований заградительного охлаждения торцевой стенки межлопаточных каналов при шелевом выдуве воздуха на их входе в меридиональной плоскости показывает:

1. Течение потока в криволинейном межлопаточном канале сопровождается развитием около его торцевой поверхности вторичных течений различного типа, основными из которых являются: течение в пограничном слое от вогнутой стенки к выпуклой, вызванное поперечным перепадом давления, и подковообразный вихрь, возникающий при взаимодействии пограничных слоев входной кромки лопаток и торцевой поверхности.

2. Высокая неравномерность интенсивности охлаждения вдоль по потоку и поперек поверхности обусловлена влиянием вторичных течений в канале.

3. Увеличение параметра выдува (до $m = 1,0$) и уменьшение меридионального угла выдува увеличивают интенсивность охлаждения практически на всей поверхности.

4. Ускорение потока и уменьшение меридионального угла выдува ведут к усилению неравномерности охлаждения торцевой стенки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang H.P., Olson S.J., Eckert R.G. Flow visualization in a linear turbine cascade of high performance turbine blades.// ASME Paper 95-GT-7.
2. Швец И.Т., Дыбан Е.П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. – К.: Наук. думка, 1974. – 487 с.
3. Копелев С.З., Тихонов Н.Д. Расчет турбин авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 268 с.
4. Халатов А.А., Коваленко А.С. Теплообмен и гидродинамика ускоренного потока в плоских криволинейных каналах. – К.: Наук. думка, 2006. – 222 с.
5. Зрелов А.В., Мартыанов В.Д., Нарезный Э.Г., Сударев Б.В. Эффективность охлаждения торцевой стенки межлопаточного канала соплового аппарата активного типа// Тр. ЛКИ: Методы преобразования энергии в СЭУ. – 1982. – С. 25–30.
6. Блэр М.Ф. Экспериментальное исследование теплоотдачи и пленочного охлаждения торцевых стенок крупногабаритных турбин// Теплопередача. – 1974. – № 4. – С. 92–98.
7. Голованов А.В., Емин О.Н., Пиотух С.М. Исследование эффективности пленочного охлаждения торцевой стенки в сверхзвуковой турбинной решетке// Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах газотурбинных двигателей. – Казань: КАИ. – 1989. – С. 3–12.
8. Гарнетт Дж., Экерт Е., Биркенбак Р. Анализ основных характеристик турбулентного пограничного слоя с подачей воздуха через тангенциальные щели// Тр. Америк. об-ва инж.-мех. Сер. С. – 1961. – 83, № 3. – С. 80–99.

Получено 21.07.2008 г.