

УДК 621.438

А. А. Халатов, член-кор. НАН Украины**А. С. Коваленко**, канд. техн. наук**А. В. Кузьмин**, канд. техн. наук**А. В. Лисовский**

Институт технической теплофизики НАН Украины

(г. Киев, E-mail: admin@ittf.kiev.ua; kovalenkoas@vortex.org.ua)

**ПЛЕНОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ТОРЦЕВОЙ
СТЕНКИ СОПЛОВОГО АППАРАТА**

Представлены результаты экспериментальных исследований пленочного охлаждения торцевой стенки соплового аппарата газовой турбины. Показано влияние вторичных течений, режимных и конструктивных параметров на уровень и характер изменения интенсивности пленочного охлаждения.

Наведено результати експериментальних досліджень плівкового охолодження торцевої стінки соплового апарату газової турбіни. Показано вплив вторинних течій, режимних та конструктивних параметрів на рівень і характер зміни інтенсивності плівкового охолодження.

1. Введение

Безотказная работа сопловых аппаратов высокотемпературных газовых турбин возможна только при их интенсивном охлаждении. Наиболее распространенным способом защиты торцевых стенок межлопаточных каналов является выдув на их поверхность воздуха, отобранного из компрессора. Воздух изолирует поверхность от горячего газа, но ниже по потоку защитный слой размывается, и действие охладителя уменьшается. Такое пленочное (заградительное) охлаждение [1] организуют через щель или перфорированный пояс, выполняемый в предельном случае из проницаемого (пористого) материала. Удельный тепловой поток от газа к стенке

$$q = \alpha_{\text{сл}}(T_{\text{сл}}^* - T_{\text{ст}}) \quad (1)$$

при таком охлаждении и известной температуре поверхности стенки $T_{\text{ст}}$ предполагает знание законов изменения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{сл}}$ и температуры торможения этого слоя $T_{\text{сл}}^*$ вдоль защищаемой поверхности. Рассчитать эти величины сложно, поэтому на практике их определяют экспериментально, обобщая опытные данные. Значительная часть опубликованных исследований посвящена анализу распределения $T_{\text{сл}}^*$ на поверхности. Измерить ее в реальных условиях невозможно, поэтому решают данную проблему с помощью метода «адиабатной стенки». Результаты определения $T_{\text{сл}}^*$ ($T_{\text{ад}}$) представляют в виде безразмерного параметра

$$\Theta_{\text{зг}} = \frac{T_{\text{г}}^* - T_{\text{ад}}}{T_{\text{г}}^* - T_{\text{в}}^*}, \quad (2)$$

который называют интенсивностью охлаждения заградительного охлаждения [2]. Здесь $T_{\text{ад}}$ – температура адиабатной поверхности, соответствующая температуре охладителя около нее, а $T_{\text{г}}^*$ и $T_{\text{в}}^*$ – температура торможения газа и охладителя соответственно.

Несмотря на многочисленные исследования заградительного охлаждения, они, большей частью, посвящены плоской пластине. Около торцевых стенок межлопаточного канала гидродинамика потока кардинально отличается из-за наличия здесь развитых вторичных течений [3]. Основными являются: подковообразный вихрь и течение в пограничном

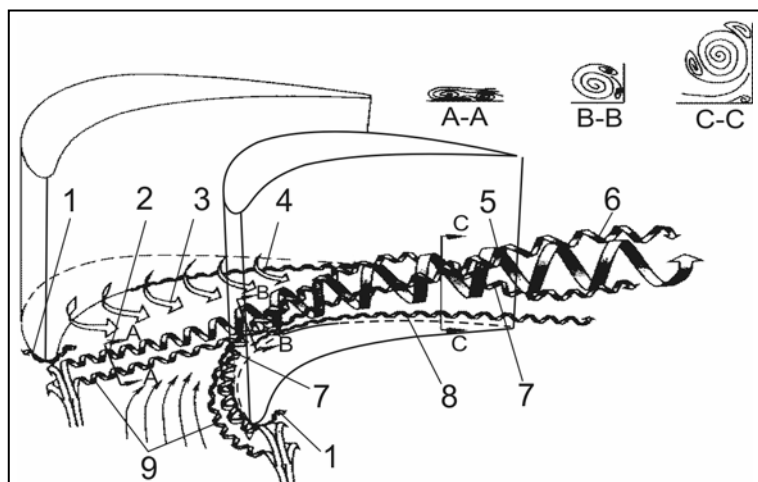


Рис. 1. Вихревая структура в межлопаточном канале:

1 – входной угловой вихрь; 2 – правая ветвь подковообразного вихря; 3 – вторичное течение; 4 – угловой вихрь; 5 – канальный вихрь; 6 – угловой вихрь, противоположный канальному вихрю; 7 – левая ветвь подковообразного вихря; 8 – угловой вихрь одного направления с канальным вихрем; 9 – входной отрывной вихрь

слое торцевой стенки от вогнутой поверхности к выпуклой (рис. 1). Подковообразный вихрь возникает при обтекании передней кромки лопатки и сразу же разделяется на две ветви, входящие в соседние каналы.

Вторичные течения существенно влияют на теплообмен около торцевой поверхности, особенно при отношении высоты канала к шагу решетки $\bar{h} = h/t < 0,8 \dots 1,0$, когда тепловые потоки через торцевые и криволинейные стенки соизмеримы. Кроме того, они, воздействуя на поведение выдуваемого охладителя, вызывают резкую неравномерность охлаждения торцевых стенок.

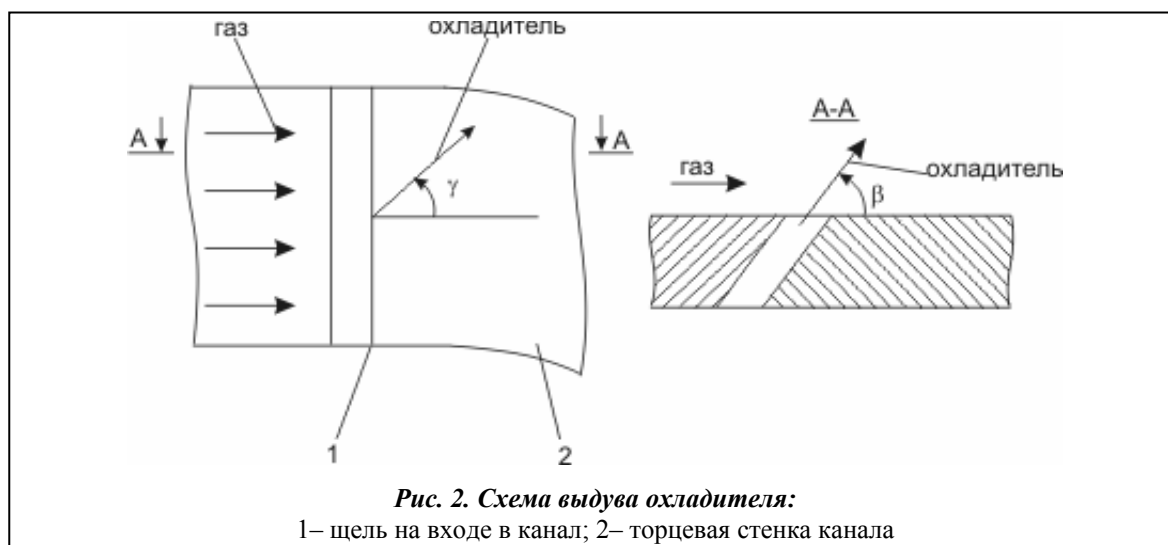
Таким образом, организация заградительного охлаждения торцевой поверхности требует обязательного учета гидродинамических особенностей пространственного пограничного слоя.

В работе дан краткий анализ результатов экспериментальных исследований заградительного охлаждения торцевой поверхности при выдуве охладителя на входе в канал через сплошную щель, выполненную заподлицо с поверхностью (рис. 2), т.е. когда угол выдува в меридиональной плоскости $\beta = \text{var}$, а в тангенциальной – $\gamma = 0^\circ$. Рассмотрено влияние гидродинамики потока, конструктивных и режимных факторов на интенсивность охлаждения поверхности. Практический интерес представляет выявление раздельного влияния вышеупомянутых вторичных течений на уровень и характер изменения $\Theta_{\text{з}}$ защищаемой поверхности. Для этого проведен сравнительный анализ исследований, выполненных авторами [4] и другими исследователями в криволинейном и межлопаточном канале.

2. Особенности подачи охладителя

Поперечный градиент давления в канале влияет на выдуваемый из щели охладитель, особенно при небольших параметрах вдува. Реальный угол выдува, получая поперечную составляющую в сторону выпуклой стенки, отличается от конструктивного. Эта составляющая переменна по высоте пограничного слоя и зависит 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 $m = \rho_v c_v / \rho_g c_g$ (здесь ρ и c – плотность и скорость воздуха и газа соответственно) поперек канала также переменный. Наименьшим он будет около вогнутой стенки, а наибольшим – около выпуклой. При небольших средних m заградительное охлаждение хорошо работает только около выпуклой стенки, поскольку охладитель «сносится» к ней основным течением. При большом поперечном градиенте давления возможно перетекание горячего газа через камеру коллектора от вогнутой стенки канала к выпуклой и подмешивание его к охладителю. При увеличении m область подачи охладителя без подмешивания горячего газа расширяется, но неравномерность его выхода из щели сохраняется. И только при большом среднем m защитная струя охладителя формируется по всей ширине канала, но все равно с переменным m поперек его.



Удаление щели от канала l снижает влияние поперечного перепада давления. Однако еще до входа в канал вторичное течение, формируемое перед торцевой поверхностью, стремится отклонить завесу охладителя к выпуклой стенке. Поэтому реальная картина течения на защищаемой поверхности зависит и от соотношения локальных количеств движения выдуваемого охладителя и пограничного слоя, участвующего во вторичном течении.

Исходя из этого, ниже рассмотрено влияние основных факторов, определяющих поведение охладителя при его меридиональном выдуве, на интенсивность охлаждения торцевой стенки.

3. Влияние вторичного течения в пограничном слое

Учитывая сложный характер течения в межлопаточном канале, проанализируем вначале изменение $\Theta_{зг}$ на торцевой стенке обособленного криволинейного канала [4], где отсутствует входной подковообразный вихрь. Полученные данные свидетельствуют о существенной неравномерности температурного поля торцевой поверхности. Изолинии $\Theta_{зг}$ большей частью направлены по нормали к изобарам статического давления и практически совпадают с донными линиями тока, что подтверждает зависимость интенсивности охлаждения от поперечного течения в пограничном слое торцевой стенки.

При небольших параметрах вдува ($m = 0,58$) зона поверхности, прилегающая к вогнутой стенке, и даже посередине канала остается неохлаждаемой (рис. 3). Лучше всего защищена торцевая поверхность около выпуклой стенки. Но и здесь $\Theta_{зг}$ вниз по потоку монотонно снижается. Исключением является область формирования канального вихря, где $\Theta_{зг}$ несколько возрастает (на 12...15%) из-за транспортирования сюда охладителя со средней части поверхности.

С увеличением параметра вдува (до 1,1), неизменном значении чисел Re_1 и угла выдува ($\beta = 25^\circ$) влияние поперечного градиента давления на поведение охладителя падает и неравномерность охлаждения поверхности уменьшается (рис. 4). Это хорошо согласуется с результатами исследования структуры потока в канале [4]. При $m > 1,0$ углы скоса потока по всей длине канала близки к нулю или становятся отрицательными, когда донная линия тока направлена в сторону вогнутой стенки. При этом $\Theta_{зг}$ продолжает уменьшаться от вогнутой стени к выпуклой и вниз по потоку. Около выпуклой стенки эта монотонность, как и в предыдущем случае, вследствие влияния канального вихря, нарушается локальным увеличением $\Theta_{зг}$. Кроме того, наблюдается некоторое возрастание $\Theta_{зг}$ на средней линии торцевой поверхности во входной части канала. Оно затем трансформируется в глубокий седлообразный прогиб изолиний $\Theta_{зг}$, распространяющийся на значительную глубину вниз по потоку. Вероятно, в пристенном слое около выпуклой стенки возникает течение охладителя в сторону

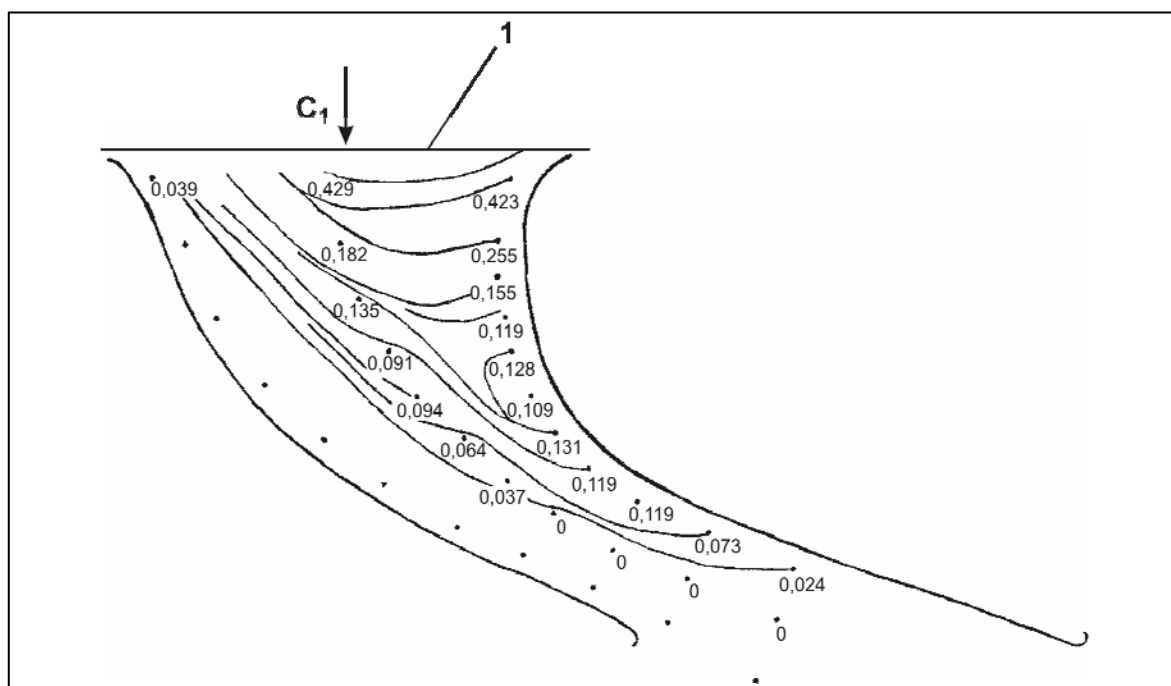


Рис. 3. Интенсивность заградительного охлаждения торцевой поверхности криволинейного канала при $m = 0,58$:

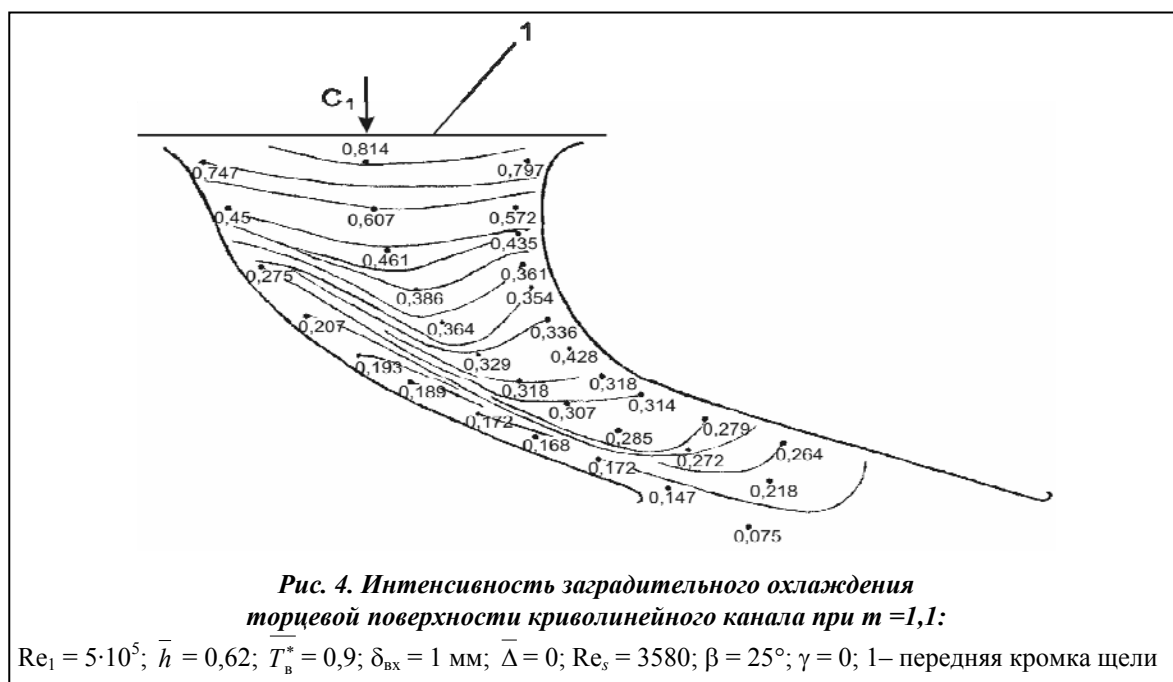
число Рейнольдса на входе в канал $Re_1 = 5 \cdot 10^5$; $\bar{h} = 0,62$; $\bar{T}_b^* = T_b^*/T_\Gamma^* = 0,9$; толщина пограничного слоя на входе в канал $\delta_{вх} = 1$ мм; относительное удаление щели от входа в канал $\bar{\Delta} = l/t = 0$; число Рейнольдса на выходе из щели, рассчитываемое по ее ширине s , $Re_s = 2680$; $\beta = 25^\circ$; $\gamma = 0$; 1 – передняя кромка щели

вогнутой поверхности, и потоки, направленные навстречу друг другу, локализуются по середине канала.

4. Влияние подковообразного вихря

По сравнению с криволинейным каналом течение около торцевых поверхностей межлопаточного канала имеет существенные отличия [4]. Они обусловлены тем, что боковые стенки последнего, являясь криволинейными поверхностями соседних лопаток, обтекаются потоком. Поэтому в угловой зоне между торцевой поверхностью и входной кромкой каждой из лопаток в результате сворачивания пограничного слоя поверхности возникает вихревая система. Основной составляющей этой системы является подковообразный вихрь, ветви которого развиваются в различных условиях. Благодаря поперечному перепаду давления, существующему еще до входа в межлопаточный канал (как и в случае криволинейного канала), правая по потоку ветвь перемещается к выпуклой стенке. Здесь и проявляется ее отрыв, который усиливает каналный вихрь, формируемый течением в пограничном слое торцевой поверхности. Левая ветвь подковообразного вихря, оставаясь около торцевой поверхности, огибает профиль лопатки с выпуклой стороны. Перед областью отрыва она отслаивается от торцевой поверхности и, постепенно затухая, смещается на периферию системы вихрей.

Таким образом, поведение охладителя, выдуваемого перед входом в канал, во многом определяется влиянием на него подковообразного вихря. Это видно на примере межлопаточного канала реактивной решетки [5], где выдув происходил под углом $\beta = 30^\circ$ к торцевой поверхности нормально к фронту решетки. Объект исследования – криволинейный канал с закругленными входными кромками, имитирующими лопатку турбины. С помощью створок на выходе из канала и свободного обтекания на входе обеспечивался характер течения, соответствующий реальному межлопаточному каналу сопловой реактивной решетки



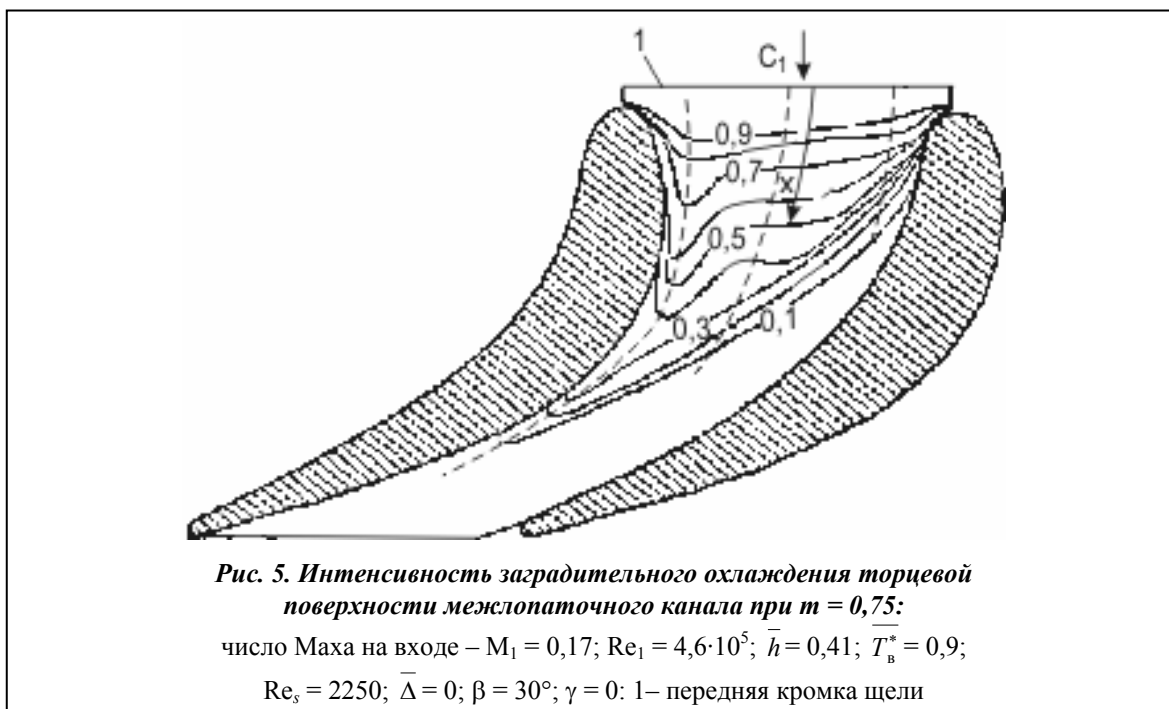
при докритическом перепаде давления на ней. Измерение температуры торцевой стенки производилось на удалении 3 мм от криволинейных стенок и посередине канала.

Распределение $\Theta_{зг}$ по торцевой поверхности межлопаточного канала при $m = 0,75$ аналогично случаю обособленного криволинейного канала, но имеет некоторые особенности (рис. 5). Так, неравномерность этого распределения значительно усилилась. Вдоль вогнутой стенки, начиная от входа, отчетливо выделяется неохлаждаемая зона. Изолинии $\Theta_{зг}$ посередине канала в передней его части имеют максимум, смещенный вниз по потоку.

Характер распределения $\Theta_{зг}$ на торцевой поверхности однозначно определяется существующими в канале вторичными течениями. Так, вторичное течение в пограничном слое торцевой стенки способствует переносу выдуваемого охладителя от вогнутой стенки канала к выпуклой. Правая ветвь подковообразного вихря, перемещаясь от входной кромки лопатки к выпуклой стенке канала, усиливает эффект переноса. Она сворачивает пограничный слой торцевой поверхности в передней части канала вместе с попавшим в него охладителем и транспортирует к выпуклой стенке, в область образования канального вихря. Левая ветвь входного вихря под влиянием поперечного перепада давления, вместе с частью охладителя также сносится в этот район. Максимум $\Theta_{зг}$ более четкий, чем в случае криволинейного канала, но менее глубокий и располагается почти вплотную к выпуклой стенке.

Распределение $\Theta_{зг}$ по торцевой поверхности позволяет качественно оценить влияние на него гидродинамики течения. Количественную оценку дает анализ зависимостей $\Theta_{зг} = f(x' = x'_i/x')$, построенных вдоль характерных линий поверхности относительно текущей криволинейной координаты x'_i , отсчитываемой от переднего фронта решетки. При этом особой информативностью отличаются участки около вогнутой и выпуклой стенок каналов.

Результаты, полученные авторами, для криволинейного канала [4] свидетельствуют, что появление подковообразного вихря заметно меняет характер протекания этих зависимостей. Сравнение производилось при практически одинаковых углах выдува ($\beta = 25 \dots 30^\circ$), параметрах вдува охладителя ($m=0,75$) и числах Рейнольдса потока на входе (рис. 6). Неравномерность охлаждения, возникающая на входе в криволинейный канал (4) около криволинейных стенок, вызвана переменным локальным параметром вдува по причинам, указанным выше. Ниже по потоку под влиянием вторичного течения она в абсолютном отношении сохраняется неизменной до момента появления канального вихря (3) около выпуклой стенки.



При переходе к межлопаточному каналу (1) и появлении в связи с этим подковообразного вихря $\Theta_{зг}$ на входе резко возрастает. Небольшой угол выдува и благоприятное направление вращения правой ветви вихря способствуют этому. Около вогнутой стенки $\Theta_{зг}$ выросла более чем в два раза, а вдоль выпуклой – только в полтора. Характерно, что вдоль выпуклой стенки межлопаточного канала $\Theta_{зг}$ больше, чем у криволинейного на одинаковую величину, пока не возникает отрыв потока (3). Этот отрыв, спровоцированный правой ветвью подковообразного вихря, наступает раньше, чем у криволинейного канала, и $\Theta_{зг}$ за ним, естественно, падает. Абсолютная неравномерность охлаждения вначале по величине остается такой же, как и в криволинейном канале, но уже при $x' > 0,08$ она резко возрастает, а при $x' > 0,2$ поверхность вдоль вогнутой стенки становится неохлаждаемой.

5. Влияние параметра вдува и угла выдува

Анализ распределения $\Theta_{зг}$ на торцевой поверхности криволинейного и межлопаточного каналов показывает, что увеличение параметра вдува практически не меняет его характера, а ведет только к усилению интенсивности охлаждения всей торцевой поверхности, выравнивая ее по фронту решетки.

Увеличение меридионального угла выдува (рис. 6) от 30° до 90° ведет в межлопаточном канале к заметному снижению $\Theta_{зг}$ (2) на всей торцевой поверхности, хотя поперек канала охлаждение становится более равномерным [6]. Интересной особенностью увеличения 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 обусловлены влиянием вторичных течений в решетке на поведение выдуваемого охладителя. Чем меньше угол выдува (конструктивно он, естественно, ограничен), тем больше воздуха попадает во входной пограничный слой. Поэтому при $\beta = 30^\circ$ практически весь охладитель захватывается подковообразным вихрем. Перемещаясь к выпуклой стенке, он интенсивно охлаждает здесь торцевую поверхность. Свою долю вносит и локальный параметр вдува, который около выпуклой стенки наибольший. При $\beta = 90^\circ$ основная масса воздуха, минуя пограничный слой, не участвует во вторичном течении. Однако поверхность около вогнутой стенки охлаждается лучше из-за транспортировки сюда охладителя из пристенной части потока в силу благоприятного направления вращения правой ветви

вихря [4]. У выпуклой стенки левая ветвь вихря оттесняет пристенный слой потока вместе с попавшим в него охладителем в ядро течения, что уменьшает потенциальные возможности охлаждения.

6. Выводы

Результаты экспериментальных исследований заградительного охлаждения торцевой поверхности криволинейных и межлопаточных каналов при меридиональном выдуве воздуха на ее входе показывают:

- высокая неравномерность охлаждения поверхности обусловлена влиянием вторичных течений;
- наличие подковообразного вихря – основная причина появления неохлаждаемого участка поверхности около вогнутой стенки канала;
- уменьшение меридионального угла выдува, улучшая охлаждение около выпуклой стенки, усиливает неравномерность охлаждения поверхности;
- увеличение параметра вдува в большей мере улучшает охлаждение поверхности около выпуклой стенки;
- остается актуальным исследование различных способов уменьшения и учета влияния вторичных течений на поведение охладителя в межлопаточном канале: локального ускорения основного потока, вдува охладителя через систему закрученных струй, изменения его тангенциального угла выдува и других факторов.

Литература

1. Швец И. Т. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин / И. Т. Швец, Е. П. Дыбан. – Киев: Наук. думка, 1974. – 487 с.
2. Копелев С. З. Расчет турбин авиационных двигателей / С. З. Копелев, Н. Д. Тихонов. – М.: Машиностроение, 1974. – 268 с.
3. Wang H. P. Flow visualization in a linear turbine cascade of high performance turbine blades. / H. P. Wang, S. J. Olson, R. J. Goldstein, R. G. Eckert // ASME Paper 95-GT-7, 1995. – 11 p.
4. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика ускоренного потока в плоских криволинейных каналах / А. А. Халатов, А. С. Коваленко. – Киев: Наук. думка, 2006. – 222 с.
5. Блэр М. Ф. Экспериментальное исследование теплоотдачи и пленочного охлаждения торцевых стенок крупногабаритных турбин / М. Ф. Блэр // Теплопередача. – 1974. – № 4. – С. 92–98.
6. Голованов А. В. Исследование эффективности пленочного охлаждения торцевой стенки в сверхзвуковой турбинной решетке / А. В. Голованов, О. Н. Емин, С. М. Пиотух // Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах газотурбинных двигателей. – Казань: Казан. авиац. ин-т. – 1989. – С. 3–12.

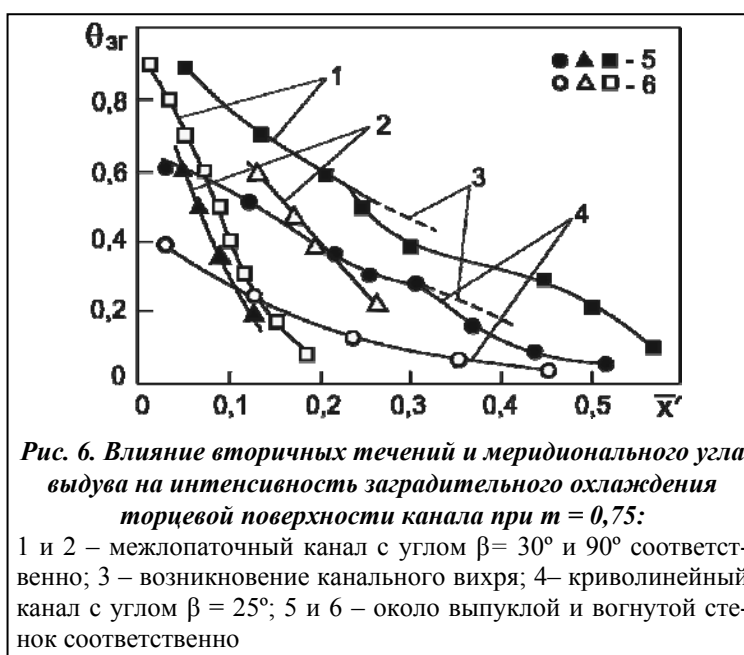


Рис. 6. Влияние вторичных течений и меридионального угла выдува на интенсивность заградительного охлаждения торцевой поверхности канала при $m = 0,75$:

1 и 2 – межлопаточный канал с углом $\beta = 30^\circ$ и 90° соответственно; 3 – возникновение канального вихря; 4 – криволинейный канал с углом $\beta = 25^\circ$; 5 и 6 – около выпуклой и вогнутой стенок соответственно

Поступила в редакцию
09.10.11