

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК. 621.438

Халатов А. А., Коваленко А. С.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН НА ТОРЦЕВОЙ СТЕНКЕ МЕЖЛОПАТОЧНОГО КАНАЛА ПРИ ЕЕ ЗАГРАДИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Часть 3. Подача охладителя в тангенциальной плоскости

Наведено аналіз експериментальних досліджень загороджувального охолодження торцевої поверхні міжлопаткових каналів при щілинному видуві охолоджувача у тангенціальній площині.

Представлен анализ экспериментальных исследований заградительного охлаждения торцевой поверхности межлопаточного канала при щелевой подаче охладителя в тангенциальной плоскости.

The analysis of experimental studies on the film cooling over the vane end wall at is given when the coolant supplies tangential.

b — хорда лопатки;
 c — скорость;
 d — диаметр отверстия;
 h — высота лопатки;
 G — расход;
 k — шаг перфорации;
 l — удаление щели от входа в канал;
 $m = \rho_b c_b / \rho_g c_g$ — параметр вдува;
 M — число Маха;
 p — давление;
 Re — число Рейнольдса;
 s — ширина щели;
 t — шаг решетки;
 T — температура;
 x — криволинейная координата вдоль характерной линии, отсчитываемая от места вдува;
 $\bar{h} = h/t$ — относительная высота лопатки;
 $\bar{g}_g = G_b / G_g$ — относительный расход охлаждающего воздуха;
 $\bar{l} = l/t$ — относительное удаление щели от входа в канал;
 $K_p = (p_1 - p_2) / \rho_1 c_1$ — коэффициент статического давления;

$\bar{T}_g^* = T_g^* / T_g^*$ — относительная температура;
 β — меридиональный угол подачи охладителя;
 γ — тангенциальный угол подачи охладителя;
 Δ — геометрическая характеристика щели;
 Θ_{zg} — интенсивность заградительного охлаждения;
 ρ — плотность.

Индексы верхние:

* — параметры заторможенного потока.

Индексы нижние:

ад — адиабатическая;
 в — воздух;
 г — горячий газ;
 i — текущий параметр;
 1 — параметры на входе в канал;
 2 — параметры на выходе из канала.

Особенности тангенциальной подачи охладителя

При подаче охладителя с изменением угла β в меридиональной плоскости ($\gamma=0$) щель выполняется заподлицо с поверхностью. При подаче охладителя в тангенциальной плоскости ($\beta=0$) по направлению к выпуклой или вогнутой поверхности

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

узел подачи выполняется в виде уступа (козырька). Экспериментальные исследования показали, что, в отличие от меридиональной подачи охладителя из плоской щели, поверхностный уступ существенно влияет на гидродинамику потока и локальный теплообмен во входном участке канала.

При отсутствии подачи охладителя за уступом образуется рециркуляционная зона. Ее размеры и характер течения в ней определяются одновременным влиянием продольного и поперечного перепада давления на входе в канал, а также размерами уступа. Эта зона имеет тенденцию смещения к выпуклой поверхности. Поток из рециркуляционной зоны захватывается левой ветвью входного вихря, перемешивается с ней и транспортируется в область формирования канального вихря [1]. При подаче охладителя область за уступом заполняется и интенсивность

рециркуляции уменьшается, вплоть до ее полного исчезновения при больших параметрах вдува. Пограничный слой сразу за уступом в этом случае будет состоять только из охладителя. При этом, в силу консервативных свойств пограничного слоя локальная концентрация охладителя на торцевой поверхности при тангенциальной подаче будет выше, чем при меридиональной. Более того, появляется возможность влияния на распределение интенсивности заградительного охлаждения $\theta_{зг}$ по торцевой стенке за счет изменения параметра вдува и тангенциального угла подачи охладителя.

В части 3 дается обзор исследований, представленных в работе [1], а также в других публикациях, характеристики которых представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Конструктивные и режимные параметры объектов исследования.

№ п/п	Источник	Тип решетки	Условия обтекания	\bar{h}	\bar{l}	$s, (d \times k)$, мм	$Re_l \times 10^{-5}$	\overline{T}_B	m	$\gamma; (\beta)$, град
1	[2]	активная	$M_l=0,13 \dots 0,32$	1,4 3	0,21	2,0;(-)	2,9; 3,8; 4,8	0,94	0,65; 0,69; 1,5	0; (0)
2	[3]	реактивная	$M_l=0,13 \dots 0,32$	1,0	0,092	2,0;(-)	4,3	0,90; 0,94	0,43; 1,17; 1,52	0; (0)
3	[3]	реактивная	$M_l=0,12$	1,0	0,092	2,0;(-)	4,3... 5,0	0,90; 0,94	0,43; 0,83; 1,52	0; (0)
4	[4]	реактивная; активная	$M_l=0,13 \dots 0,32$	1,0; 1,0	0,092; 0,092	2,0;(-)	5,0; 5,38	0,90; 0,94	1,14; 0,76	0; (0); 0; (0)
5	[5]	реактивная	$M_l=0,13 \dots 0,18$	1,0	0,092	2,0;(-)	5,0	0,91 ... 0,96	1,15	0; 30; 45; 60; (0)
6	[6]	реактивная	$M_l=0,12$	1,0	0,092	2,0;(-)	4,8; 4,75	0,90; 0,92	1,29; 2,17	0; (0);
7	[7]	реактивная	$M_{2ад}=0,42 \dots 0,84$	1,2 7	0,17	(-); 0,8×2,5	-	1,0	1,7	45; - 45; (45)

Особенности вторичного течения

Анализ заградительного охлаждения при подаче охладителя из тангенциальной щели рассмотрим вначале в условиях его выпуска параллельно основному потоку ($\gamma=0$), т. е. нормально к фронту решетки. На охладитель в пограничном слое около торцевой стенки оказывает влияние как поперечный градиент давления, так и нестационарная вихревая структура на входе в канал. Перемещаясь по пограничному слою, она с некоторой периодичностью “проталкивает” порции охладителя вовнутрь канала. В то же время ветви входного вихря являются для выдуваемого охладителя аэродинамическим препятствием как в силу своего расположения, так и за счет направления вращения [1]. Охладитель, взаимодействуя со входным вихрем, сдвигает формирование канального вихря около выпуклой стенки канала вниз по потоку.

Исследования, выполненные в условиях безградиентного потока [2], показали, что распределение интенсивности заградительного охлаждения на торцевой поверхности в канале активной решетки (табл. 3.1) для щели с уступом качественно такое же (рис. 3.1), как в канале со щелью, выполненной заподлицо с поверхностью, что определяется гидродинамикой течения в канале. Однако при тангенциальной подаче, влияние защитного слоя ввиду большей его консервативности проявляется более заметно. Даже при небольших параметрах вдува ($m=0,69$) подавляющая часть торцевой поверхности, в том числе и около вогнутой стенки охлаждается значительно лучше (рис. 3.1б), чем при меридиональном выдуве и $m=1,03$. Исключение составляет лишь зона образования канального вихря, куда попадает меньше охладителя, чем при подаче охладителя в меридиональной плоскости и $\beta=90$. В последнем случае роль подковообразного вихря в “переброске” в эту зону охладителя, попавшего в пристенный и пограничный слои, оказывается решающей. Уменьшение числа Рейнольдса на входе в канал при одинаковых параметрах вдува (рис. 3.1б и 3.1в) способствует более глубокому проникновению защитного слоя вниз по потоку.



Рис. 3.1. Интенсивность заградительного охлаждения на торцевой поверхности межлопаточного канала активной решетки: а, б, в – Re и m соответственно равны $4,8 \cdot 10^5$ и $1,5$; $2,9 \cdot 10^5$ и $0,69$; $3,8 \cdot 10^5$ и $0,65$; 1 – линия среза сопла щели.

Исследование реактивного межлопаточного канала (табл. 3.1) показало существенное влияние тангенциального выдува (в отличие от меридионального) на распределение коэффициента статического давления $K_p = (p_1 - p_i) / \rho_1 c_1^2$ на торцевой поверхности [3]. Анализ области взаимодействия охладителя с вторичным течением (до места образования канального вихря) показывает, что при отсутствии выдува (рис. 3.2а) статическое давление на входе в межлопаточный канал около вогнутой стенки ($x/b \leq 0,4$) в 3...4 раза выше, чем около выпуклой. Небольшой выдув (до $m=0,43$), уменьшая размеры рециркуляционной зоны, незначительно воздействует на расположение изобар около выпуклой стенки, но существенно влияет на распределение K_p около вогнутой стенки (рис. 3.2а). Если в районе входной кромки наблюдается увеличение статического давления (по сравнению с нулевым выдувом) из-за ослабления рециркуляционного течения, то, начиная с $x/b \approx 0,25 \dots 0,30$, поток заметно разгоняется. Вероятно, охладитель с низкой кинетической энергией под воздействием поперечного перепада давления “сносится” в район образования канально-

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

го вихря, уменьшая эффективное проходное сечение. При неизменном расходе через межлопаточный канал, это приводит к росту скорости основного потока.

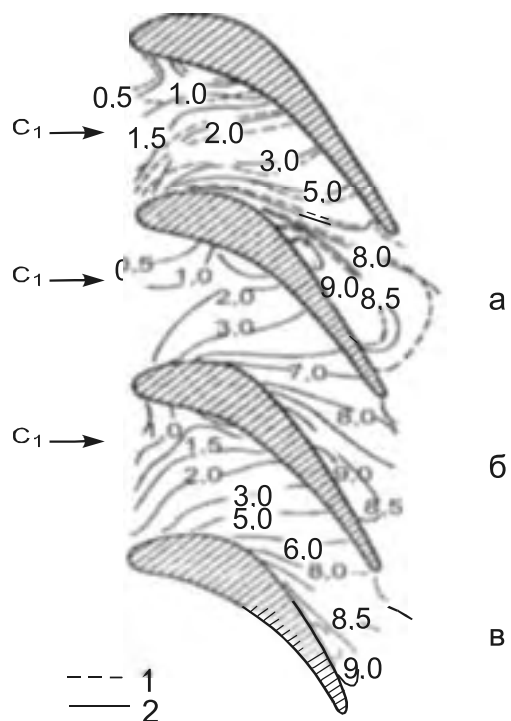


Рис. 3.2. Коэффициент статического давления на торцевой поверхности межлопаточного канала реактивной решетки: а, б, в – $m = 0,43; 1,17$ и $1,52$; 1 и 2 – $m = 0$ и $m > 0$ соответственно.

С увеличением параметра вдува до 1,17 отмеченные особенности течения около вогнутой стенки усиливаются (рис. 3.2б), что свидетельствует о сохранении физических причин данного явления. Однако зона возрастания статического давления значительно сокращается и при дальнейшем росте параметра вдува (до 1,52) исчезает совсем (рис. 3.2в). Распределение давления по ширине торцевой поверхности канала становится более равномерным, хотя и при более низком уровне по сравнению с предыдущими случаями. Вероятно, этому способствует дросселирующее влияние зоны взаимодействия высокоскоростной струи охладителя с подковообразным вихрем и вторичным течением.

Влияние ускорения потока

Распределение интенсивности охлаждения по торцевой поверхности для канала реактивного типа [3] в целом подобно рассмотренному выше случаю безградиентного течения. Вместе с тем, существенные отличия, связанные с ускорением потока и отмеченные при анализе меридионального выдува в реактивной решетке (ч. 1), здесь приобретают свои характерные особенности, определяемые способом подачи охладителя.

Протекание изолиний θ_{32} на входе со стороны вогнутой стенки для среднего параметра вдува ($m = 0.83$) здесь более крутое (рис. 3.3б), а их максимумы во входной части канала локализируются ближе к его средней линии. Это объясняется более высоким энергетическим воздействием тангенциальной струи, по сравнению с выдувом охладителя под углом β к торцевой поверхности. Как было отмечено ранее (ч. 1), при меридиональном выдуве с уменьшением угла β возрастает кинетическая энергия струи охладителя, и она меньше отклоняется (при $m = const$) в сторону выпуклой стенки канала. В случае же тангенциального выдува это проявляется более заметно и участок поверхности, защищаемый заградительным охлаждением, естественно, расширяется.

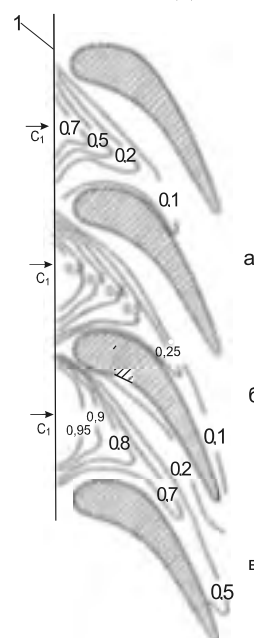


Рис. 3.3. Интенсивность заградительного охлаждения на торцевой поверхности межлопаточного канала реактивной решетки: а, б, в – $m = 0,43; 0,83$ и $1,52$; 1 – линия среза сопла щели.

Однако даже для максимального выдува ($m=1,52$), представленного на рис. 3.3в, в отличие от безградиентного обтекания, вблизи вогнутой стенки, сохраняется участок поверхности с низкой интенсивностью охлаждения ($\theta_{зг} \leq 0,2$). Вероятно, способность более тонкого пограничного слоя, формирующегося в условиях сильной ламинаризации течения, удерживать охладитель резко снижается, и он активно “вымывается” в основной поток. В то же время слабое вторичное течение на торцевой стенке неспособно полностью снести защитный слой охладителя к выпуклой стенке, тем более, что перед “горлом” канала отрицательный градиент давления намного выше, чем на входе.

Небезынтересно утверждение, полученное здесь на основе анализа распределения $\Theta_{зг}$, о том, что “снос” пристенной струи охладителя начинается уже на срезе щели. Такой вывод вполне согласуется с результатами исследований, представленных в работе [1], где выявлены причины усиления этого явления при удалении тангенциальной щели от фронта решетки.

Сравнение интенсивности охлаждения торцевой поверхности в реактивной и активной решетке [4] при одинаковом конструктивном выполнении узла выдува и примерно равных параметрах вдува (табл. 3.1) подтверждает полученный выше вывод о том, что в условиях межлопаточного канала ускорение потока ведет к усилению неравномерности охлаждения торцевой поверхности (рис. 3.4). В результате, даже при небольшом расходе охладителя ($m=0,76$), обеспечивается достаточно высокая интенсивность охлаждения ($\Theta_{зг} \geq 0,25$) около вогнутой стенки активной решетки. В каналах реактивной решетки в этой области торцевая поверхность остается незащищенной даже при $m=1,14$.

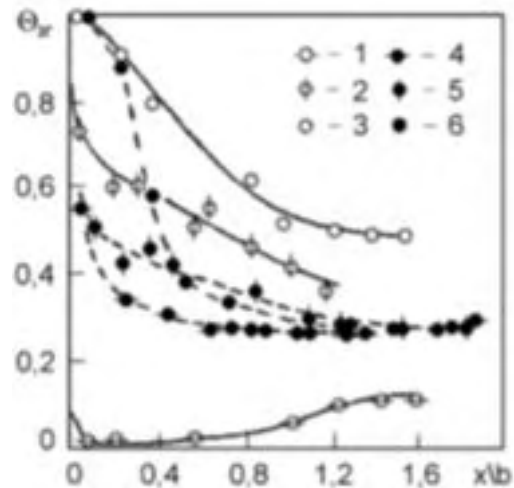


Рис. 3.4. Влияние продольного градиента давления на интенсивность заградительного охлаждения торцевой поверхности межлопаточного канала: 1-3 и 4-6 – около вогнутой стенки, на средней линии и около выпуклой стенки канала реактивной ($Re_1 = 5 \cdot 10^5$; $m = 1,14$) и активной ($Re_1 = 5,38 \cdot 10^5$; $m = 0,76$) решеток соответственно.

Влияние параметра вдува

В зависимости от типа решетки увеличение параметра вдува по-разному сказывается на распределении $\Theta_{зг}$ по торцевой поверхности. В безградиентном потоке при интенсивной подаче охладителя ($m=1,5$) тангенциальный выдув обеспечивает защиту практически всей торцевой стенки (рис. 3.1а). В ускоренном потоке с увеличением параметра вдува наблюдается постепенное уменьшение “крутизны” изолиний $\Theta_{зг}$ на входе в канал (рис. 3.3). Примерно, в том же темпе сокращается и область незащищенной поверхности вдоль вогнутой стенки. Как показали исследования [1], это связано с перераспределением охладителя по всей ширине щели, включая и участок около вогнутой стенки. Локальная дальность струи возрастает и защищаемая охладителем поверхность расширяется.

При высоком параметре вдува возможна частичная или полная ликвидация влияния входного вихря на режим течения около торцевой поверхности. Область существования вторичного течения в передней части канала также значительно сокращается. В результате, для достаточно высоких параметров вдува (рис. 3.3в) наблюдается проникно-

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

вание защитного слоя даже в район косого среза канала.

Влияние угла подачи охладителя

Наличие “скоса” потока, влияющего на поведение защитного слоя охладителя еще до входа в межлопаточный канал, привело к необходимости каким-то способом воспрепятствовать этому явлению. В работе [5] проведено исследование выдува из тангенциальной щели не по нормали к фронту решетки ($\gamma = 90^\circ$), а под некоторым углом к нему ($\gamma = 30^\circ$; 45° и 60°), который отсчитывается от этой нормали против часовой стрелки. Изменение направления выдува обеспечивалось установкой на внутренней стенке козырька щели тонких ребер толщиной 2мм с шагом 14мм. Эти перегородки, кроме основной функции формирования угла выдува, препятствовали поперечному перетеканию охладителя вдоль щели, что важно при небольших параметрах вдува.

Возникновение поперечной составляющей импульса струи охладителя, подаваемой в канал, препятствует ее сносу к выпуклой стенке. В результате неохлаждаемый участок около вогнутой стенки канала практически исчезает. Интенсивность охлаждения в этой области значительно возрастает (рис. 3.5), а у выпуклой стенки и по средней линии канала снижается. Выдуваемый охладитель, преодолевая сопротивление вторичного течения и входного вихря, попадает непосредственно в район вогнутой стенки, где поперечный перепад давления намного меньше, чем на входе в канал. Далее уже более слабым вторичным течением охладитель сносится вниз по потоку, защищая практически всю торцевую поверхность. При этом слой охладителя, который распространяется вдоль выпуклой стенки, служит своеобразной аэродинамической стенкой для вторичного течения, на которой и формируется канальный вихрь.

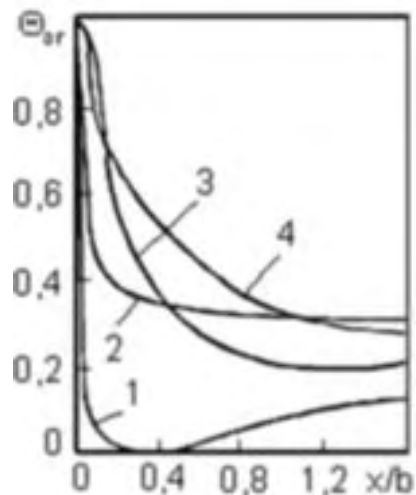


Рис. 3.5. Влияние тангенциального угла выдува охладителя на интенсивность заградительного охлаждения торцевой поверхности межлопаточного канала реактивной решетки: 1 – $4 - \gamma = 0^\circ$; 30° ; 45° и 60° соответственно.

Таким образом, изменяя угол выдува в тангенциальной плоскости, можно за счет уменьшения дальности струй, добиться выравнивания интенсивности охлаждения поперек торцевой поверхности (рис. 3.6). В данном исследовании это достигается при $\gamma = 30^\circ$. К сожалению представленные материалы получены при достаточно большом расходе охладителя $\bar{g}_b = 2,5\%$, что в реальных неавтоматических системах охлаждения реализовать проблематично.

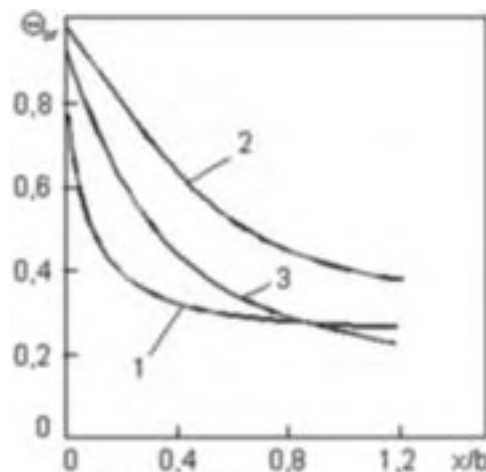


Рис. 3.6. Интенсивность заградительного охлаждения торцевой поверхности межлопаточного канала реактивной решетки при $\gamma = 30^\circ$: 1 – 3 – около вогнутой стенки, на средней линии и около выпуклой стенки канала соответственно.

Обобщение экспериментальных результатов

Обобщение опытных данных по интенсивности заградительного охлаждения торцевой поверхности соплового аппарата является достаточно сложной задачей вследствие большого количества влияющих факторов. В работе [6] сделана попытка обобщения результатов исследования при тангенциальной подаче охладителя ($\gamma=0^\circ; \beta=0^\circ$). В результате получена следующая эмпирическая зависимость:

$$\Theta_{зг} = f(\Delta^{1,5} \cdot Re_{1S}^{-0,25} \cdot m^{-1,3} \cdot \bar{T}_e^{-1,25} \cdot \frac{X}{S}) = f(A). \quad (3.1)$$

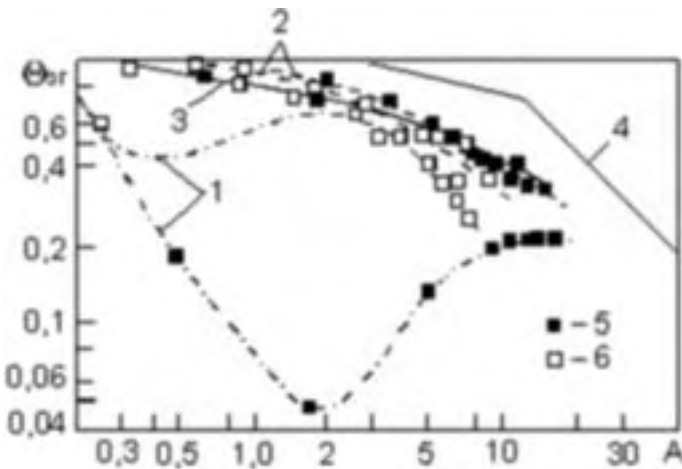


Рис. 3.7. Влияние обобщающего параметра вдува A на интенсивность заградительного охлаждения около торцевой поверхности межлопаточного канала реактивной решетки: 1 – 3 – около вогнутой стенки, на средней линии и около выпуклой стенки канала соответственно; 4 – расчет для плоской пластины в безградиентном потоке; 5, 6 - Re_1, m и T_e^* / T_Γ^* равны $4,8 \cdot 10^5, 1,29$ и $0,78; 4,75 \cdot 10^5, 2,17$ и $0,92$ соответственно.

Как видно из рис. 3.7, обобщающая зависимость (3.1) удовлетворительно описывает опытные данные по интенсивности заградительного охлаждения около выпуклой стенки и на средней линии канала. Эти данные располагают-

ся на (25...60)% ниже, чем экспериментальные данные для безградиентного обтекания плоской поверхности. Около вогнутой стенки интенсивность охлаждения ниже, чем на остальной части торцевой поверхности. Особенно это заметно при средних параметрах вдува ($m=1,29$). Поэтому зависимостью (3.1) можно воспользоваться только при больших параметрах вдува ($m=2,17$) и на достаточно большом удалении от входа в канал.

Подача охладителя через систему отверстий при пространственном угле выдува

Тангенциальный выдув не устраняет проблемы слабой тепловой защиты торцевой поверхности около вогнутой стенки межлопаточного канала. Дальнейшим развитием этого метода является использование пространственного угла выдува охладителя ($\beta > 0$ и $\gamma \neq 0$) через перфорацию на входе в канал. В работе [7] при выдуве охладителя из перфорации под пространственным углом ($\beta = 45^\circ; \gamma = 45^\circ$ и $\beta = 45^\circ; \gamma = -45^\circ$) экспериментально установлено изменение гидродинамики течения на торцевой поверхности. Так при выдуве по направлению к выпуклой стенке канала ($\gamma = -45^\circ$), то есть по направлению вторичного течения и мощной ветви входного вихря, статическое давление изменяется (увеличивается) только около выпуклой стенки (рис.3.8, б).

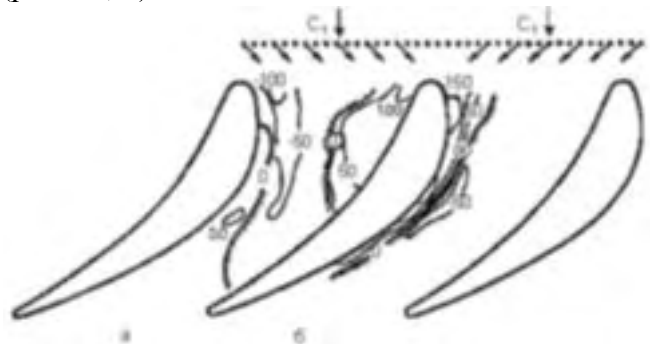


Рис. 3.8. Влияние пространственного угла выдува на характер распределения статического давления на торцевой поверхности межлопаточного канала реактивной решетки с подачей охладителя через перфорацию на входе: а и б – $\beta = 45^\circ, \gamma = 45^\circ$ и $\beta = 45^\circ, \gamma = -45^\circ$ соответственно.

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Если же подавать охладитель в сторону вогнутой стенки ($\gamma=45^\circ$), т. е. против вторичного течения, то статическое давление около вогнутой стенки увеличивается, а возле выпуклой - падает (рис. 3.8, *a*). В середине канала и около его стенок статическое давление не изменяется (на рисунке 3.8 показаны изолинии разности давлений для случая с выдувом охладителя и без него). Анализ такого поведения изолиний статического давления дает основание предполагать, что основную роль в этом случае играет взаимовлияние ветвей входного вихря и поперечной составляющей выдуваемого охладителя, которая препятствует или же, наоборот, способствует их распространению в канале.

Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований щелевого заградительного охлаждения торцевой стенки при тангенциальной подаче охладителя на входе в межлопаточный канал, показывает, что, по сравнению с меридиональным выдувом, тангенциальный выдув изменяет как величину, так и характер распределения статического давления на торцевой стенке. Неравномерность охлаждения защищаемой поверхности существенно снижается, поскольку защитный слой при одинаковых параметрах вдува проникает в канал глубже, вплоть до выхода из канала. Увеличение параметра вдува усиливает интенсивность охлаждения всей торцевой стенки канала, включая и область косога среза. Изменение тангенциального угла выдува влияет на уровень и характер распределения интенсивности охлаждения торцевой стенки.

Выдув в тангенциальной плоскости в сторону вогнутой стенки под углом 30° к нормали фронта решетки существенно снижает неравномерность охлаждения поперек потока. Ускорение потока усиливает неравномерность охлаждения торцевой стенки по сравнению с безградиентным течением.

Общие выводы

Анализ рассмотренных выше исследований показал следующее:

- все предлагаемые способы организации заградительного охлаждения торцевой поверхности межлопаточного канала выдувом воздуха на его входе не устраняют существенную неравномерность ее температурного состояния поперек канала;
- неравномерность охлаждения торцевой поверхности межлопаточного канала обусловлена, в основном, наличием входного (подковообразного) вихря;
- для более полного использования потенциальных возможностей заградительного охлаждения в рассматриваемом случае необходимы конструктивные мероприятия, уменьшающие влияние входного вихря или же организация локальной защиты наиболее теплонапряженных участков торцевой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халатов А.А., Коваленко А.С. Теплообмен и гидродинамика ускоренного потока в плоских криволинейных каналах. – Киев: Наукова думка, 2006. – 222 с.
2. Зрелов А.В., Мартыянов 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.
3. Сударев Б.В., Черныш А.А., Нарезный Э.Г., Мартыянов В.Д. Эффективность охлаждения торцевой стенки соплового канала при тангенциальном вдуве воздуха // Пром. теплотехника. – 1988. – Т.10, №6. – С. 37-41.
4. Зрелов А.В., Мартыянов 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.
5. Нарезный Э.Г., Сударев Б.В., Тимиров А.М. и др. Заградительное охлаждение торцевой стенки соплового канала // Энергомашиностроение. – 1988. – №6. – С. 9-11.