ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН УСКОРЕННОГО ПОТОКА ОКОЛО ПЛОСКИХ СТЕНОК МЕЖЛОПАТОЧНОГО КАНАЛА

Халатов А.А., Коваленко А.С., Шевцов С.В.

Институт технической физики НАН Украины, Киев, Украина

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена ускоренного потока около торцевой поверхности криволинейного и межлопаточного каналов. Выявлены уровень и характер изменения теплообмена в зависимости от высоты канала и толщины пограничного слоя на входе в него. Полученные данные могут быть использованы при проектировании и испытаниях теплообменного и теплоэнергетического оборудования.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

c..... скорость внешнего течения;
t ..... шаг решетки;
x ..... криволинейная координата;
Re..... число Рейнольдса;
$\bar{h}$ =h/t относительная высота канала;
$\bar{x}$ =x /x_{max}.. относительная координата;
α ..... коэффициент теплоотдачи;
δ ..... толщина пограничного слоя;
$\overline{\alpha}=\alpha/\alpha_0$ относительный коэффициент теплоотдачи.

ИНДЕКСЫ

max.....значение координаты на выходе из канала;
0.....параметры для пластины в безградиентном потоке;
1.....параметры на входе в канал

ВВЕДЕНИЕ

Закрытые криволинейные каналы плоского типа являются основным элементом, реализующим ускоренное течение в лопаточных машинах энергетического назначения. Главной особенностью гидродинамики такого канала является возникновение около его плоских (торцевых) стенок вторичных течений различного типа. Они существенно влияют на теплообмен около торцевой поверхности и на практике могут быть использованы как для интенсификации тепло - и массообмена, так и для управления газодинамической структурой потока.

Особое значение приобретает присутствие вторичных течений в высокотемпературном потоке, когда необходимо обеспечить надежную работу стенок канала. По мере повышения температуры рабочего тела конвективный способ организации охлаждения уже не в состоянии обеспечить тепловую защиту поверхности. Переход к более эффективным способам охлаждения связан с выдувом охладителя в поток [1]. Это требует знания особенностей теплообмена на стенках канала. Иначе можно не только не достичь требуемого уровня охлаждения, но и понести дополнительные потери, связанные с неблагоприятным обтеканием элементов канала и неоправданными затратами охладителя. В этом случае, естественно, надежность работы защищаемых элементов и эффективность применения охлаждения резко снижаются.

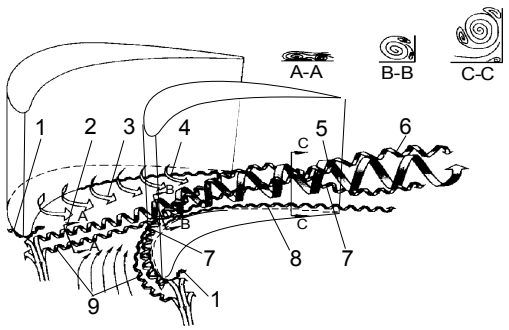

Рис.1 Схема вихревой структуры в межлопаточном канале: 1–входной угловой вихрь; 2–правая ветвь подковообразного вихря; 3–вторичное течение; 4–угловой вихрь около вогнутой поверхности; 5–канальный вихрь; 6–угловой вихрь около выпуклой поверхности, противоположно направленный канальному вихрю; 7–левая ветвь подковообразного вихря; 8–угловой вихрь около выпуклой поверхности, сонаправленный с канальным вихрем; 9–отрывной вихрь перед входной кромкой лопаток.

Кроме того, ввиду специфических особенностей развития вторичного течения его влияние особенно значительно, когда ширина торцевой поверхности на входе в канал становится меньше высоты криво-

линейных стенок. На практике это проявляется в увеличении относительной доли вторичных потерь [2].

Визуализация потока с помощью различных индикаторов в гидро- и аэродинамических трубах показывает сложную картину проявления вторичных течений в реальных конструкциях. Рассматривая межлопаточный канал, как развитие исходного прямолинейного канала, можно идентифицировать в нем несколько типов вторичного течения:

- вихревое течение в угловых зонах (угловой вихрь) [3, 4, 5];
- течение в пограничном слое торцевой стенки, вызванное поперечным перепадом давления (вторичное течение) [6];
- канальный вихрь, возникающий при натекании поперечного (вторичного течения) на выпуклую криволинейную стенку [6];
- подковообразный вихрь, возникающий при обтекании входной кромки межлопаточного канала и являющийся основным элементом входного вихря [7].

Одновременное существование [8] различных по природе возникновения вторичных течений (рис.1) требует исследования, как общего, так и раздельного их влияния на теплообмен около торцевой стенки межлопаточного канала. Очевидно, наиболее сильное воздействие на теплообмен оказывает вторичное течение в пограничном слое стенки (3) и подковообразный вихрь (2, 7), особенно его правая (по потоку) ветвь (2). Поэтому авторам представлялось необходимым проведение поэтапного исследования: сначала в обособленном канале (криволинейный канал), когда развивается вторичное течение и связанный с ним канальный вихрь, а затем в идентичном канале, смежном с двумя аналогичными (межлопаточный канал), когда появляется еще и входной вихрь.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились на аэродинамической трубе открытого типа, воздух в которую подавался от центробежного компрессора (расход воздуха до 1кг/с; c_1=50 м/с;$Re_1=3\cdot10^5\ldots12\cdot10^5$). Объектом исследования служил средний канал прямой решетки из четырех модельных лопаток, криволинейные стенки которых соответствовали профильным поверхностям межлопаточного канала соплового аппарата высокотемпературной газовой турбины (рис.2).

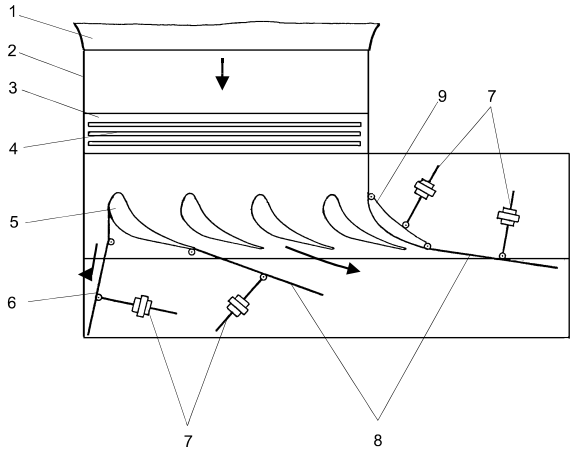

Рис.2 Схема рабочей части экспериментальной установки: 1– сопло Витошинского; 2– ограничивающие стенки; 3– сменная пластина; 4– щели для слива пограничного слоя; 5– лопатки исследуемой решетки; 6– поворотная пластина канала; 7– винтовые пары; 8– регулировочные створки; 9– поворотная профилированная стенка.

Для обособления его соседние каналы перекрывались профилированными вставками (на рисунке не показаны), которые обеспечивали равномерное поле скоростей на входе. Аналогичные вставки применялись и при изменении высоты канала. При этом неизменность режима обтекания обеспечивалась поддержанием постоянного перепада давления на канале. Необходимый угол входа потока уста-

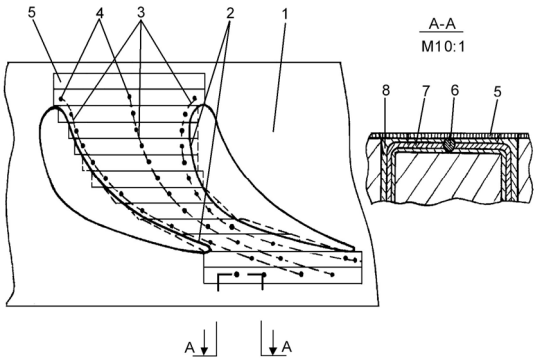

Рис.3 Схема размещения нагревателя и термопар на торцевой поверхности криволинейного канала: 1– торцевая поверхность; 2– криволинейная стенка канала; 3– линии установки термопар; 4– места установки термопар; 5– полоски нагревателя; 6– горячий спай термопары; 7– термопарные провода; 8– отверстия для термопарных проводов

навливался регулирующими створками (8), смонтированными на выходе из канала. Сменная пластина (3) со щелями слива (4) обеспечивала турбулизацию пограничного слоя перед торцевой поверхностью и позволяла менять его толщину на входе в объект исследования.

Таким образом, одна и та же экспериментальная база позволяла перейти от обособленного криволинейного канала к межлопаточному каналу и наоборот.

Исследование теплообмена на торцевой стенке проводилось при обратном направлении теплового потока (от поверхности к газу). Коэффициент теплоотдачи определялся электрометрическим методом. Обтекаемая воздухом торцевая поверхность (рис.3) нагревалась ленточными нагревателями (5), изготовленными из сеточного материала (13 полосок шириной 10 мм) с ячейками квадратного сечения 0,04×0,04 мм и приклеенными к плоской стенке эпоксидным клеем. Температура стенки измерялась термопарами (4), установленными вдоль характерных линий (3) торцевой стенки. Горячий спай их (6) располагался непосредственно под нагревателем. Тепловой поток определялся по электрической мощности нагревателя, а тепловые потери учитывались за счет тарировочных испытаний на плоской пластине.

Результаты исследований представлялись в относительном виде, по сравнению с плоской пластиной, для которой скорость обтекания соответствовала скорости потока около характерных линий торцевой стенки. Это позволило исключить влияние продольного градиента давления на интенсивность теплообмена.

КРИВОЛИНЕЙНЫЙ КАНАЛ

Эксперименты на обособленном криволинейном канале (рис.4) показали, что интенсивность теплообмена на торцевой поверхности при незначительной толщине пограничного слоя на входе (1 мм) крайне неравномерна вдоль канала и поперек его.

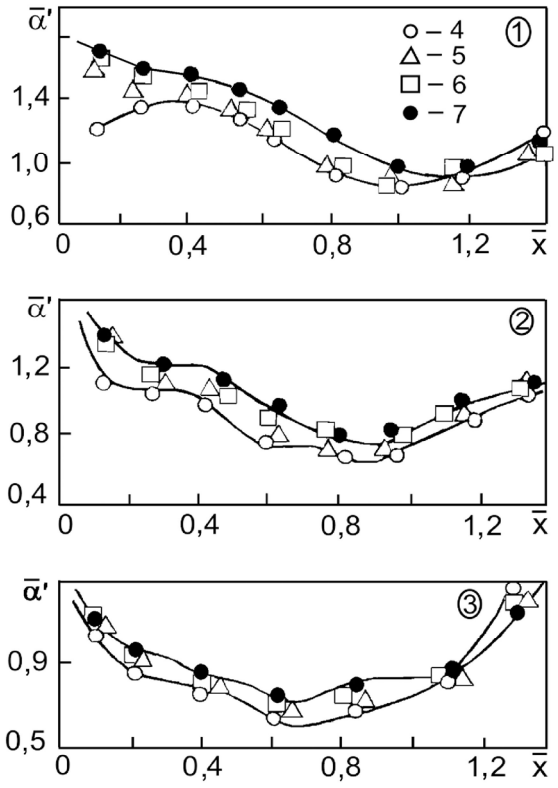

Рис.4 Относительное изменение интенсивности локального теплообмена вдоль торцевой поверхности криволинейного канала (Re_1= 3,7·10^5; $\delta_{вх}$= 1мм) по сравнению с плоской пластиной: 1…3– около вогнутой стенки, средней линии и выпуклой стенки канала соответственно; 4…7- $\bar{h}$ = 1,0; 0,47; 0,24 и 0,14 соответственно

Для базовой относительной высоты канала $\bar{h}$ = 1,0 интенсивность теплообмена на его входе (до "горла") снижается (примерно в 1,6…2 раза) как по длине, так и поперек канала, в направлении от вогнутой стенки к выпуклой. Исключение составляет локальное увеличение на входе около вогнутой стенки. За "горлом" наблюдается интенсификация теплообмена, степень которой растет от вогнутой стенки к выпуклой. В итоге около выпуклой стенки на выходе из канала уровень теплообмена становится даже больше, чем на входе. В то же время около вогнутой стенки это явление проявляется значительно слабее. Картина изменения интенсивности теплообмена вдоль средней линии занимает промежуточное положение. Учитывая предложенный выше способ представления экспериментальных данных, можно предположить, что основной физической причиной, определяющей особенности теплообмена около торцевой стенки канала, является состояние пограничного слоя и влияние вторичного течения на его характеристики.

Местное увеличение коэффициентов теплоотдачи возле вогнутой стенки канала может быть связано с наличием здесь диффузорного участка течения [6, 9], который усиливает неустойчивость пограничного слоя. Более интенсивный теплообмен около вогнутой стенки канала (по сравнению с безградиентным течением вдоль пластины) объясняется уменьшением толщины пограничного слоя. При этом происходит отток среды с низкопотенциальной энергией в сторону выпуклой стенки. На ее место поступает среда из пограничного слоя вогнутой стенки канала, но в значительно меньшем количестве из-за гидравлического сопротивления угловой зоны, где в потоке имеет место предраспо-

ложенность к формированию парного углового вихря [2]

По мере приближения к выпуклой стенке пограничный слой утолщается, и при натекании вторичного течения на нее срывается. Образуется так называемый канальный вихрь, который сносится течением на выпуклую поверхность канала и в ядро потока. За оторвавшимся вихрем толщина пограничного слоя существенно уменьшается, что в условиях вихревого течения во внешнем потоке вызывает резкую интенсификацию теплообмена на выходе из канала около выпуклой стенки.

Уменьшение относительной высоты канала по сравнению с базовой практически не влияет на характер изменения относительной интенсивности теплоотдачи. Исключение составляет входной участок около вогнутой стенки, где с уменьшением $\overline{h}$ исчезает участок увеличения относительного коэффициента теплоотдачи из-за резкого его роста. Это объясняется, по-видимому, увеличением степени загромождаемости поперечного сечения канала пограничным слоем, что вызывает усиление диффузорного эффекта. При этом интенсивность теплообмена на всей торцевой поверхности с уменьшением $\overline{h}$ возрастает почти одинаково (в 1,1…1,2 раза). Вероятно, это связано с усилением взаимовлияния вторичных течений на противоположных торцевых поверхностях.

МЕЖЛОПАТОЧНЫЙ КАНАЛ

Общий характер изменения теплообмена на торцевой поверхности в межлопаточном канале такой же, как и для криволинейного канала (рис.5).

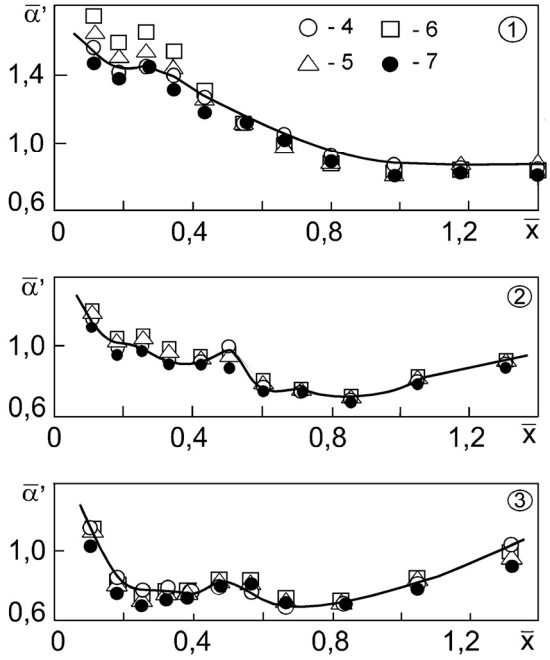

Рис.5 Изменение относительной интенсивности локального теплообмена вдоль торцевой поверхности межлопаточного канала (Re_1= 3,3·10^5; $\delta_{вх}$= 2,0мм) по сравнению с плоской пластиной: 1…7– обозначения на рис.4.

Интенсивность теплообмена вдоль канала сначала падает, а потом возрастает. Ее уровень выше около выпуклой поверхности, а меньше около вогнутой. Однако заметны и существенные различия. Так при базовой относительной высоте канала $\overline{h}$ = 1,0 уровень теплообмена заметно выше практически на всей торцевой поверхности. Вместе с тем исчезает небольшой участок возрастания теплоотдачи, существующий у криволинейного канала, и около входной кромки межлопаточного канала теплообмен возрастает на 30…40%. Далее, вплоть до выхода из канала уровень теплообмена несколько ниже, чем в криволинейном канале, как около вогнутой стенки, так и во всем выходном сечении. В итоге существенно снижается общая неравномерность теплообмена. Несомненно, это является доказательством того, что подковообразный вихрь, сворачивая пограничный слой на входе в канал, ограничивает интенсивность вторичного течения внутри канала и, как следствие, ослабляет образующийся ниже по течению канальный вихрь [9].

Уменьшение относительной высоты канала практически не влияет на уровень относительного теплообмена и характер его изменения на торцевой поверхности. Исключением является небольшой участок на входе в канал около вогнутой стенки. Здесь наблюдается сначала некоторый рост относительной теплоотдачи, а при $\overline{h}$ = 0,14 его падение до первоначального значения.

По координатам локального увеличения относительной теплоотдачи на представленных зависимостях можно уверенно определить расположение правой ветви подковообразного вихря на торцевой стенке.

ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование теплообмена на торцевой стенке криволинейного и межлопаточного каналов при тонком пограничном слое на входе показало:

- изменение интенсивности относительного теплообмена носит неравномерный характер как поперек, так и вдоль канала с минимумом в районе узкого сечения;
- интенсивность относительного теплообмена уменьшается вниз по потоку и от вогнутой стенки к выпуклой, за исключением области на выходе из канала;
- уменьшение относительной высоты канала усиливает относительный теплообмен около торцевой поверхности криволинейного канала и слабо влияет на него в межлопаточном канале;
- представленные в относительных координатах зависимости, оценивая степень влияния основных вторичных течений в коротких криволинейных каналах плоского типа на локальный теплообмен около торцевой стенки, позволяют существенно упростить его расчет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швец И.Т., Дыбан Е.П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. – Киев: Наук. думка, 1974. - 487 с.
2. Копелев С.З., Тихонов Н.Д. Расчет турбин авиационных двигателей. - М.: Машиностроение, 1974. - 268 с.
3. Nikuradse I. Turbulente Stromung in nicht kreisformigen Rohren // Ing. Arch. - 1930. - Bd. 1. - S. 306-332.
4. Гесснер Ф.Б., По Дж.К., Эмери А.Ф. Измерения развивающегося турбулентного течения в квадратном канале / Пер. с англ. под ред. А. С. Гиневского // Турбулентные сдвиговые течения. 1.-М.: Машиностроение, 1982. - 432 с.
5. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. -М.: Наука, 1972.-471 с.
6. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 671 с.
7. Goldstein R.J., Yoo S.Y., Chung M.K. Convective Mass Transfer from a Square Cylinder and its Base Plate. – P. 90-103.
8. 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.
9. Халатов А.А., Коваленко А.С. Теплообмен и гидродинамика ускоренного потока в плоских криволинейных каналах. -Киев: Наук, думка, 2006.-224 с.