

## СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ «ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ» БАНДАЖНОЙ ПОЛКИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ВД ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТВВД

© 2006 Ю.Г. Горелов, В.Ф. Казуров, Н.И. Михайлов

ОАО НПО «Сатурн», г. Рыбинск, ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

Значительные потребные расходы воздуха связанные с необходимостью обеспечения допустимых температур бандажных полок, заставляют разработчиков турбин подойти к проблеме обеспечения требуемой эффективности охлаждения этих элементов турбин, как к чрезвычайно актуальной, острой проблеме. Цена решения данной проблемы для полок выше, чем для пера лопаток, так, при увеличении температуры газа перед турбиной на 50° дополнительные затраты на охлаждение пера рабочей лопатки ВД должны составить 0,7%, а на охлаждение полки – 1,1% .

Исследуемые в [1] антивибрационные бандажные полки НК-321, имели конструкцию отличную от конструкции газодинамических полок НК-93, конструкция этого элемента лопатки включала три гребешка с «платиками». Большая площадь и объем полки, позволяли размещать в ней более сложные каналы внутрискребочного охлаждения.

В представленной работе изучению проблемы охлаждения газодинамической бандажной полки посвящены исследования различных способов конвективного и заградительного охлаждения газодинамической полки НК-93, полки спроектированной с минимальным объемом, выбранным из условий прочности, даны рекомендации по оптимизации системы охлаждения полки.

Проведенные ранее исследования [2] показали, что струйное натекание на полку сверху более эффективно и экономично, чем способ предложенный в [3, 4], в основе которого - организация воздушной завесы на внутренней поверхности бандажа. С целью увеличения эффективности способа струйного натекания на полку сверху в представленной работе исследовался способ струйного подвода под большим перепадом давления через специальные сопла в перфорированной пластине рис. 1. В работе представлены результаты сравнительного исследования двух схем подвода охлаждающего воздуха – струйного подвода под большим перепадом давления и исходного варианта с подводом через отверстия в сегментах. Сравнительное термометрирование бандажных полок с двумя этими способами охлаждения проводилось датчиками ИМТК на полномасштабном двигателе НК-93. Охлаждающий воздух в количестве 2,2% подавался из-за компрессора ВД через перфориро-

ванную пластину и соосные отверстия в сегментах под перепадом давления ( $\pi = P_{ВХ}/P_{ВЫХ} = 1,73$ ) на бандажные полки. В исходном варианте охлаждающий воздух в количестве 1,9% подавался через отверстия в сегментах  $\varnothing 1,7 - 96$ отв. и  $\varnothing 2,5 - 48$ отв. и через щели между сегментами на бандажные полки рабочих лопаток 1 ступени ( $\pi = P_{ВХ}/P_{ВЫХ} = 1,125$ ). Кроме того, в исходном варианте из верхних коробок соплового аппарата 1 ступени через отверстия выпускался воздух в количестве 0,75% для охлаждения свесов верхних полок 1 с.а., сегментов и бандажных полок 1 р.к.

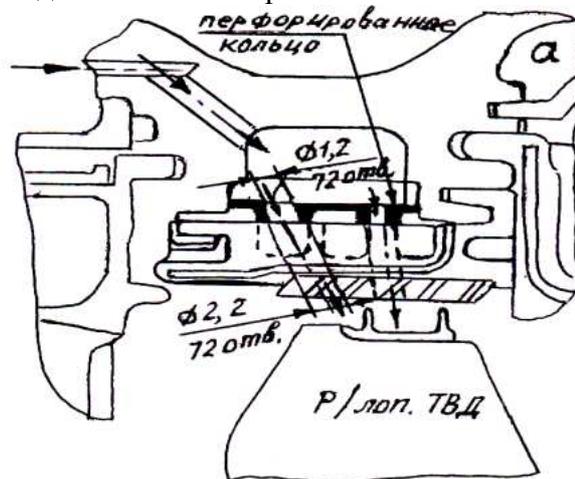
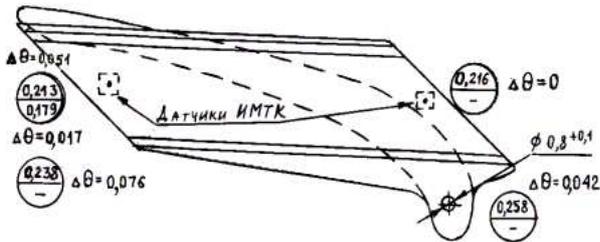


Рис. 1. Схема охлаждения бандажных полок струями с высокой кинетической энергией

При сравнительном испытании датчики ИМТК устанавливались на бандажные полки со стороны газового тракта, по одному датчику со стороны спинки и со стороны корытца рис. 2.

В результате исследования получены следующие осредненные эффективности охлаждения бандажных полок с системой струйного охлаждения полок через инжекционные сопла при большом перепаде дав-

лений -  $\theta_{\delta/n}=0,25$ ; с исходной системой подвода воздуха через отверстия в сегментах  $\varnothing 1,7$  и  $\varnothing 2,5$  -  $\theta_{\delta/n}=0,115$ .



Таким образом, система подачи дискретными струями с высокой кинетической энергией позволяет получить более высокую эффективность охлаждения по сравнению со штатной системой подвода через отверстия в сегментах. Разница в эффективностях охлаждения приведенных выше систем составляет  $\Delta\theta_{\delta/n} = \theta_{\delta/n\text{ струйн}} - \theta_{\delta/n\text{ исх}} = 0,135$ . Это эквивалентно снижению температуры полки на взлетном режиме ~ на  $80^\circ$  по сравнению с исходным вариантом охлаждения.

Традиционный для двигателей СНТК им. Н.Д. Кузнецова способ струйного охлаждения бандажных полки сверху (для НК-93 - через перфорированную пластину) позволяет обеспечивать требуемое тепловое состояние полки до  $T_{\Gamma}^*$  равной 1620...1630К при расходах воздуха на охлаждение полки 2,2...2,3%. По результатам анализа испытаний НК-93 и данным [1] способ струйного охлаждения сверху при  $T_{\Gamma}^*=1680...1700\text{К}$  потребует увеличения расхода воздуха на охлаждение полки до 3...3,1%.

С целью поиска более экономичных средств обеспечения уровня  $T_{\Gamma}^* \approx 1680\text{К}$  было исследовано комбинированное охлаждение: способ струйного натекания воздуха на

полку сверху в количестве 2,2% в сочетании с одним из дополнительных вариантов охлаждения.

Вариант 1 – исходный вариант со струйной подачей сверху на бандажную полку через инжекционные сопла.

Вариант 2 – с увеличенным диаметром передних противопылевых отверстий с  $\varnothing 0,6^{+0,1}$  мм до  $\varnothing 0,8^{+0,1}$  мм на рабочей лопатке №1 и до  $\varnothing 1,0^{+0,1}$  мм на рабочих лопатках №2 и №3 рис. 3.

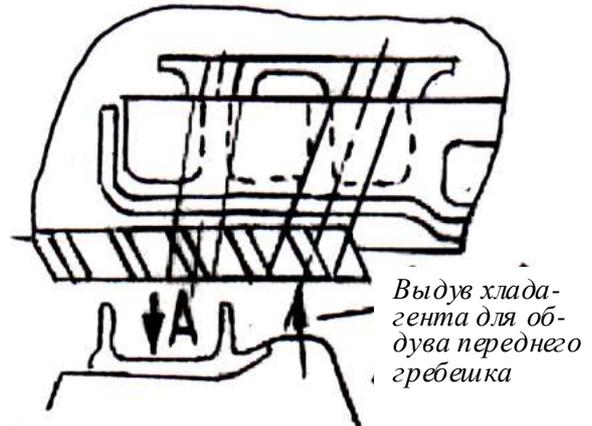


Рис. 3. Вариант заградительного охлаждения переднего гребешка

Вариант 3 – с перфорацией на корытце в подположном сечении (6 отв.  $\varnothing 0,6^{+0,1}$  мм) с увеличенным до  $\varnothing 0,8^{+0,1}$  мм диаметром передних противопылевых отверстий рис. 4.

Вариант 4 – с выпуском охлаждающего воздуха через 6 отверстий  $\varnothing 0,6^{+0,1}$  мм в верхний торец с увеличенным до  $\varnothing 0,8^{+0,1}$  мм диаметром передних противопылевых отверстий (рис. 4).

Вариант 5 – с конвективным охлаждением бандажной полки рабочей лопатки турбины ВД с выпуском воздуха из внутренней полости лопатки под фольгу через 6

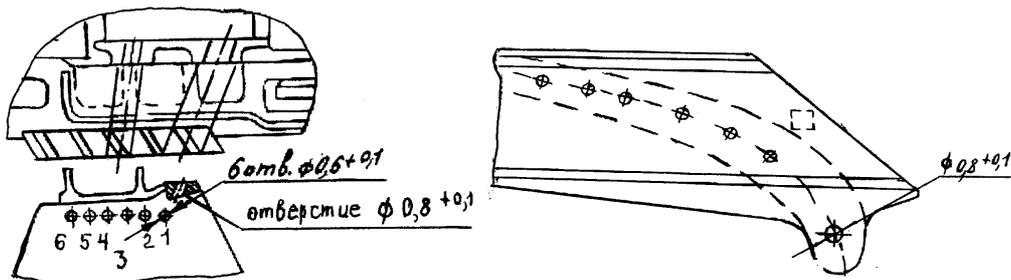


Рис. 4. Варианты охлаждения бандажной полки с выпуском хладагента: через отверстия в подположном сечении на корытце; с выпуском в верхний торец

отв.  $\varnothing 0,6^{+0,1}$  с увеличенным до  $\varnothing 0,8^{+0,1}$  мм диаметром передних противопылевых отверстий рис. 5.

Вариант 6 – с перфорацией на корытце из передней вихревой матрицы и из гладкого канала, с увеличенным до  $\varnothing 0,8^{+0,1}$  мм диаметром передних противопылевых отверстий (исследованный в [1] с целью форсирования эффективности охлаждения пера, в данном случае – полки).

Наибольшие трудности вызывает охлаждение корытного свеса и корытного гребешка бандажных полок, поскольку, как показали результаты стендовых испытаний НК-93, наибольшие повреждения по результатам испытаний получала корытная часть бандажных полок. Поэтому представленные в данной работе варианты охлаждения были направлены в основном на снижение ее температуры. Сравнительное термометрирование бандажных полок с перечисленными способами охлаждения проводилось на однокаскадном газогенераторе НК-93 на режиме  $T_{Г}^* = 1523\text{K}$ ;  $T_{К}^* = 696\text{K}$ ;  $n_{ВД} = 15122 \text{ мин}^{-1}$ .

В результате расчетов расходов воздуха установлено:

- по сравнению исходным  $G_{\text{охл.исх.}} = 1,77\%$  расход охлаждающего воздуха увеличился в варианте 2 (с увеличенным диаметром передних противопылевых отверстий) - на  $0,02\%$ ,  $G_{\text{охл.2 вар.}} = 1,8\%$ ; в варианте 3 (с перфорацией на корытце в подполочном поперечном сечении и с увеличенным диаметром передних противопылевых отверстий) - на  $0,18\%$ ,  $G_{\text{охл.2 вар.}} = 1,95\%$ ; в варианте 4 (с выпуском воздуха через 6 отверстий в верхний торец лопаток и с увеличенным диаметром передних противопылевых отверстий) - на  $0,21\%$ ,  $G_{\text{охл.}} = 1,98\%$ ; в варианте 5 (с конвективным охлаждением бандажной полки и с увеличенным диаметром передних противопылевых отверстий) -  $0,15\%$ ,  $G_{\text{охл.2 вар.}} = 1,92\%$ ; в варианте 6 (с перфорацией на корытце из передней вихревой матрицы и из гладкого канала, с увеличенным диаметром передних противопылевых отверстий) - на  $0,35\%$ ,  $G_{\text{охл.2 вар.}} = 2,12\%$ .

По результатам расчета эффективность охлаждения «газодинамических»

бандажных полок рабочих лопаток турбины ВД НК-93:

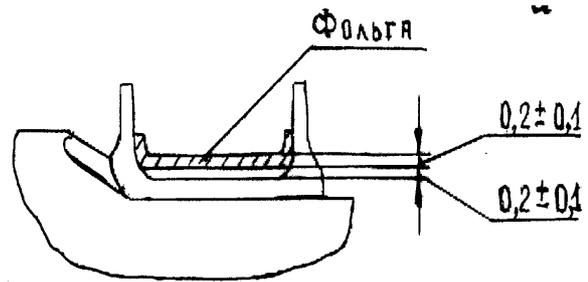


Рис. 5. Вариант с конвективным охлаждением бандажной полки (6 отв. в верхнем торце полки для выпуска воздуха согласно рис. 5)

1. При подаче охлаждающего воздуха к бандажной полке по исходному варианту 1 составляет  $0,162$  со стороны корытца и  $0,216$  со стороны спинки, средняя по спинке и корытцу –  $0,189$  при расходе охлаждающего воздуха  $1,77\%$ .

2. При охлаждении полок по варианту 2 эффективность охлаждения корытного свеса полки выше, чем в исходном варианте на  $\Delta\theta_{\text{кор.}} = 0,05$ . Увеличение диаметра противопылевых отверстий до  $\varnothing 1^{+0,1}$  не привело к заметному изменению эффективности охлаждения спинного свеса полок. Повышение эффективности охлаждения корытного свеса на  $\Delta\theta_{\text{кор.}} = 0,05$  эквивалентно снижению его температуры на  $\Delta t_{\text{кор.}} = 34^\circ$ . Расход охлаждающего воздуха при этом составил  $\bar{G}_{\text{охл.}} = 1,8\%$ .

3. При охлаждении полок по варианту 3 эффективность охлаждения полки составляет с корытца –  $0,21$ , со спинки –  $0,233$ , средняя эффективность охлаждения полки по спинке и корытцу –  $0,222$  при расходе воздуха  $\bar{G}_{\text{охл.}} = 1,95\%$ . Повышение эффективности охлаждения корытного свеса на  $\Delta\theta = 0,048$  и спинного – на  $\Delta\theta = 0,017$  эквивалентно снижению температуры – на  $\Delta t = 34^\circ$  и  $\Delta t = 12^\circ$ . Как показали эксперименты увеличение диаметра последнего шестого отверстия от входной кромки до  $0,7 \dots 0,8 \text{ мм}$  позволяет увеличить эффективность охлаждения корытного свеса до  $\theta_{\text{кор.}} = 0,238$ , спинного свеса – до  $\theta_{\text{сп.}} = 0,216$ , что позволило увеличить  $\theta_{\text{кор.}}$  на  $0,076$  при незначительном увеличении  $\bar{G}_{\text{охл.}}$  на  $\Delta \bar{G} = 0,18\%$ , что эквивалентно снижению температуры

корытного свеса на  $\Delta t=54^\circ$ . Увеличение диаметра добавочного противопылевого отверстия с торца бандажной полки до 0,7...0,8 мм приводит к увеличению эффективности охлаждения спинного свеса на  $\Delta\theta=0,052$  и снижению его температуры на  $\Delta t=37^\circ$ .

4. При охлаждении бандажных полок по варианту 4 с выпуском охладителя через отверстия в торце бандажных полок эффективность охлаждения полок составляет со стороны корытца -  $\theta_{кор.}=0,221$ , со стороны спинки -  $\theta_{сп.}=0,21$ , что эквивалентно увеличению эффективности охлаждения корытного свеса на  $\Delta\theta=0,059$  и снижению его температуры на  $\Delta t=42^\circ$  при увеличении  $\bar{G}_{охл}$  на 0,21%. При этом эффективность охлаждения спинного свеса практически не изменилась.

5. При охлаждении бандажных полок по варианту 5 (конвективное охлаждение) в случае, когда закрыты 2-е и 3-е отверстия от входной кромки рис. 5 эффективность охлаждения полок составляет со стороны корытца -  $\theta_{кор.}=0,196$ , со стороны спинки -  $\theta_{сп.}=0,216$ . Такой способ охлаждения приводит к увеличению  $\theta$  корытного свеса на  $\Delta\theta=0,034$  или снижению его температуры на  $\Delta t=24^\circ$  при увеличении расхода охлаждающего воздуха на  $\Delta\bar{G}=0,09\%$ . В случае раскрытия всех шести отверстий согласно рис. 77, 78 эффективность охлаждения корытного свеса составляет  $\theta_{кор.}=0,238$ , спинного -  $\theta_{сп.}=0,258$  при увеличении  $\bar{G}_{охл}$  на  $\Delta\bar{G}=0,15\%$ . По сравнению с исходным вариантом эффективность охлаждения корытного свеса увеличилась на  $\Delta\theta_{кор.}=0,076$ , спинного свеса - на  $\Delta\theta=0,042$ . Это эквивалентно снижению температуры корытного свеса на  $\Delta t=54^\circ$ , спинного свеса - на  $\Delta t=29^\circ$ .

По результатам исследований установлено, что наиболее эффективным способом охлаждения бандажных полок является конвективное внутрискрипное охлаждение и охлаждение с помощью отверстий перфорации на корытце в подполочном сечении при  $\Delta\bar{G}$  всего 0,15% и 0,18%, соответственно, температура полки снижается с корытца на  $54^\circ$  в обоих способах, со спинки - на  $29^\circ$  и  $12^\circ$ , соответственно для двух способов. Как показали

предварительные оценки, аналогичный результат при применении, например традиционного способа (вариант 1) может быть получен лишь при дополнительных затратах воздуха в 1...1,5% (относительно исходного расхода 2...2,2% полученного с инжекционными соплами на НК-93). Высокая эффективность внутрискрипного конвективного охлаждения и охлаждения с помощью отверстий в подполочном сечении обуславливает интерес к этому способу, как к средству обеспечения работоспособности бандажных полок высокотемпературных двигателей НК-93 и НК-44 с минимальными затратами (увеличение  $\Delta\theta$  на 0,1 - повышает допустимую  $T_{Г^*}$  на 4%). Успешное внедрение способа конвективного внутрискрипного охлаждения возможно при решении технологических проблем запыления каналов в эксплуатации, внедрение способа охлаждения с помощью отверстий перфорации на корытце в подполочном сечении - после прочностных испытаний в модельных условиях.

Наиболее простым в технологии изготовления является вариант дополнительного охлаждения с выпуском охладителя в верхний торец при сравнительно неплохих результатах повышения эффективности охлаждения корытного свеса бандажных полок по сравнению с исходным вариантом - на  $\Delta\theta_{кор.}=0,059$  и практически неизменной эффективности охлаждения спинного свеса. В настоящее время данный вариант внедрен на рабочих лопатках турбины ВД - НК-93, что позволяет успешно проводить стендовые испытания двигателей НК-93 при  $T_{Г^*}\approx 1620...1630\text{K}$  и эксплуатировать двигатель НК-38СТ с «газодинамической» бандажной полкой в течение межремонтного ресурса

### Список литературы

1. Ю.Г. Горелов, И.С. Копылов, А.С. Матвеев. Комбинированный способ охлаждения бандажных полок рабочих лопаток высокотемпературных турбин // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. №2. С. 37-40.
2. Ю.Г. Горелов, И.С. Копылов, А.С. Матвеев, Д.А. Якушков. Результаты исследования эффективности струйного охлаждения бандажных полок рабочих лопаток высокотемпературных турбин // Изв. вузов. Авиационная техника. 1998. №2. С. 99-102.
3. Богомоллов Е. Н. Исследование эффективности струйной завесы бандажных полок

рабочих лопаток газовой турбины // Высокотемпературные охлаждаемые газовые турбины двигателей летательных аппаратов/ КАИ. Казань, 1985. с. 34-41.

4. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей / В.И. Локай, М. Н. Бодунов, В. В. Жуйков, А. В. Щукин. М.: Машиностроение, 1993. 288 с.

## **THE COOLING MEANINGS FOR "GASODYNAMIC" BENDING SHROUD OF WORKING BLADE FOR A HP TURBINE FROM TURBOFAN ENGINE WITH HIGH GAS TEMPERATURE**

© 2006 Y.G Gorelov, V.F. Kazurov, N.I. Mihailov

JSC "NPO SATURN", Rybinsk, JSC "SNTK named after N.D. Kuznetsov", Samara

The cooling meanings for "gasodynamic" bending shroud of working blade for a HP turbine are considered. Its analysis is made from the view point of cooling efficiency and adaptability to manufacture.