

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАВЕСНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА СПИНКЕ И КОРЫТЦЕ ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ V-ОБРАЗНЫХ ВЫЕМОК

© 2019

- В. В. Лебедев** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Авиационные двигатели»;  
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва;  
[lebedevvlad2000@mail.ru](mailto:lebedevvlad2000@mail.ru)
- О. В. Лебедев** аспирант кафедры «Авиационные двигатели»;  
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва;  
[lebedevov2000@mail.ru](mailto:lebedevov2000@mail.ru)
- А. Е. Ремизов** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Авиационные двигатели»;  
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва;  
[ad@rsatu.ru](mailto:ad@rsatu.ru)

Наряду с развитием способов интенсификации конвективного теплообмена внутри лопатки актуальной остаётся разработка методов локального повышения эффективности плёночного охлаждения её поверхности. Завесная пелена на поверхности лопатки формируется в условиях большой кривизны профиля, низкой начальной скорости газового потока в окрестности передней кромки с последующим резким его ускорением. Приведены данные об особенностях формирования завесной пелены на спинке и корытце турбинной лопатки в окрестности передней кромки. Экспериментальные распределения температур на адиабатной стенке получены с использованием тепловизора FLIR-E64501. Выявлено, что условия формирования завесной пелены на спинке лопатки более благоприятны, чем на корытце. Это проявляется в том, что оптимальные параметры вдува на спинке лопатки значительно меньше, чем на корытце. В качестве мероприятия для локального увеличения эффективности плёночного охлаждения предложены V-образные выемки, располагающиеся на стенке непосредственно за отверстиями для вдува. Выполнено сравнение эффективностей завесного охлаждения при формировании завесной пелены без использования и с использованием за отверстиями для вдува V-образных выемок. Получено локальное повышение эффективности и равномерности распределения плёночного охлаждения при использовании за рядом отверстий V-образных выемок.

*Турбинная лопатка; спинка; корытце; V-образные выемки; параметр вдува; эффективность завесного охлаждения.*

---

**Цитирование:** Лебедев В.В., Лебедев О.В., Ремизов А.Е. Особенности формирования завесного охлаждения на спинке и корытце турбинной лопатки при использовании V-образных выемок // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 4. С. 96-105.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-96-105

### Введение

Организация завесного (плёночного) охлаждения в окрестности передних кромок, спинки и корытца сопловых лопаток сталкивается с проблемами, связанными с большой кривизной профиля лопатки, низкой начальной скоростью газового потока в окрестности передней кромки с последующим резким его ускорением, неоптимальными углами, образуемыми векторами скоростей вдуваемого холодного воздуха и горячего газового потока [1]. Кроме того, дискретные холодные струи при вдуве их в сносящий горячий поток отрываются от стенки. Из-за разрежения под струёй на образующуюся в сечении струи вихревую пару накручиваются вихри, осуществляющие подсос

к стенке горячего газа [2]. Существующие проблемы решаются увеличением расхода охладителя и совершенствованием систем плёночного охлаждения. Конструктивные решения, призванные нивелировать негативные эффекты от перечисленных факторов, систематизированы в [3].

Известны методы интенсификации теплообмена между потоком и обтекаемой стенкой с помощью расположенных на стенке  $V$ -образных выемок [4]. Возникающие на  $V$ -образной выемке вихри противоположного вращения втягивают в неё среду из внешнего потока и способствуют возникновению высоких коэффициентов теплоотдачи между потоком и стенкой. Было предложено расположить  $V$ -образные выемки за отверстиями для вдува охладителя, чтобы образующаяся вихревая пара раскручивала вихри в сечении струи и концентрировала охладитель у стенки, перераспределяя массу охладителя вниз по потоку от отверстий.

Была поставлена задача: провести экспериментальное исследование формирования завесного охлаждения при дискретном вдуве охладителя через ряд отверстий на передней кромке, спинке и корытце лопатки и возможности использования  $V$ -образных выемок для локального управления эффективностью охлаждения с целью её увеличения.

### Условия проведения опытов

Опыты выполнены с использованием тепловизора FLIR-E64501 с чувствительностью  $0.05^\circ\text{C}$ . В качестве прототипа для турбинной лопатки использовано среднее сечение соплового аппарата высокотемпературной ступени турбины современного турбореактивного двигателя, имеющей повышенную степень реактивности. Числа Рейнольдса, определённые по выходной скорости истечения основного потока и хорде лопатки, составляли  $Re = 4 \cdot 10^5$ . Числа Маха не моделировались. Кинематическое подобие обеспечивалось приближительной идентичностью распределения безразмерного параметра ускорения  $k = v_z/V_z^2 (dV_z/dS)$  по спинке и корытцу опытной лопатки и лопатки-прототипа в натуральных условиях. Режимы исследуемых завес задавались относительным расходом вдува  $\bar{G}$ , равным отношению расхода вдува к расходу основного потока, приходящихся на один шаг отверстий в ряду, и параметром вдува  $m = \rho_v V_v / \rho_z V_z$ . Эффективность завесного охлаждения определялась как относительная температура адиабатной стенки по формуле  $\theta = (T_z - T_{cm}) / (T_z - T_g)$ . Здесь  $\rho, V, \nu$  – плотность, скорость, кинематическая вязкость потока соответственно;  $T$  – температура;  $S$  – координата, отсчитываемая вдоль профиля лопатки; индексы  $z, v, cm$  – газ (основной поток), воздух (вдуваемый поток), адиабатная стенка соответственно. Опыты сводились к сравнению эффективности завесного охлаждения за отверстиями с  $V$ -образными выемками и без выемок. Экспериментальная установка и методика поведения опытов описаны в [5], где изложены исследования влияния  $V$ -образных выемок на формирование завесной пелены за отверстиями для вдува на плоской стенке.

На рис. 1 приведены данные о перфорации для вдува на передней кромке лопатки, корытце и спинке лопатки и параметры  $V$ -образных выемок.

На передней кромке, спинке и корытце лопатки по её высоте расположены ряды из пяти отверстий с  $V$ -образными выемками непосредственно за отверстиями и ряды из пяти отверстий без  $V$ -образных выемок. Буквами  $A$  и  $B$  на рис. 1 показаны варианты расположения  $V$ -образных выемок за рядом из отверстий на передней кромке. При этом вариант  $B$  предполагает влияние  $V$ -образных выемок на завесную пелену только со стороны корытца лопатки. Рассмотрен также вариант, когда для усиления влияния  $V$ -образных выемок на спинке и корытце использованы их двойные ряды (показано на

рис. 1 слева сверху). Диаметры отверстий для вдува  $d = 2$  мм. Относительный шаг отверстий в ряду равен четырём. Такое расположение перфорации для вдува позволяло одномоментно в одних и тех же условиях получать данные по завесе как при использовании  $V$ -образных выемок за отверстиями, так и при их отсутствии.

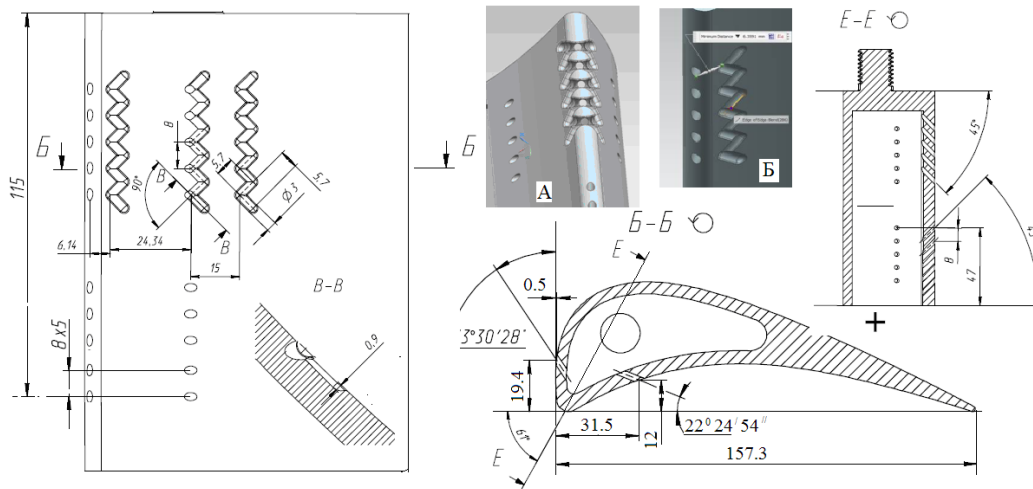


Рис. 1. Геометрия сопловой лопатки и перфорации для вдува

### Результаты исследований

На рис. 2 представлены распределения осреднённых по шагу отверстий в ряду эффективностей завесного охлаждения  $\theta_0$  при вдуве через отверстия на передней кромке лопатки. Отверстия на спинке и корытце лопатки были заглушены. По оси ординат отложена относительная координата  $S/d$ , отсчитываемая вдоль образующей корытца лопатки от её передней кромки. Относительные расходы вдува изменялись в диапазоне  $\bar{G} \sim 0,49\% \dots 1,85\%$ .  $V$ -образные выемки не использовались. Из-за невозможности измерить скорости набегающего потока непосредственно перед передней кромкой лопатки параметры вдува  $m$  здесь не определялись. Завесная пелена со стороны спинки лопатки не фиксировалась. При этом какая-то часть расхода вдува перетекала на сторону спинки лопатки. Поскольку экспериментально определить эту часть расхода вдува невозможно, то в дальнейшем при анализе эффективности завесного охлаждения со стороны корытца указаны полные относительные расходы для вдува  $\bar{G}$ .

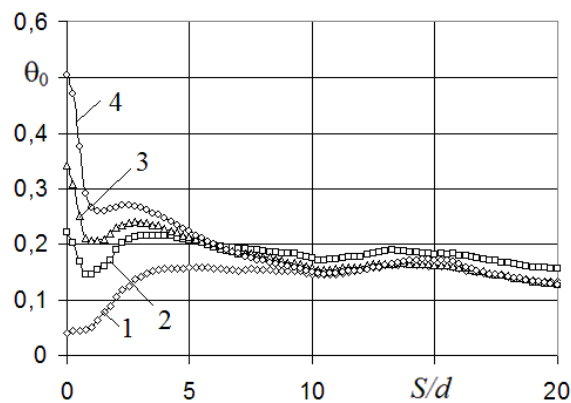


Рис. 2. Осреднённые по шагу отверстий  $\theta_0$  со стороны корытца лопатки при вдуве через отверстия на передней кромке:  
1 –  $\bar{G} = 0,49\%$ ; 2 –  $0,63\%$ ; 3 –  $1,1\%$ ; 4 –  $1,85\%$

Из рис. 2 видно, что для  $\bar{G} = 0,49\%$  завеса на корытце у передней кромки фактически отсутствует и появляется, начиная с  $S/d \geq 4$  – на удалении от передней кромки, выходя на уровень  $\theta_0 = 0,15$ . Начальные значения  $\theta_0 \sim 0,04$  лежат в пределах погрешности измерений из-за утечек тепла на стенке. С увеличением  $\bar{G}$  происходит монотонный рост максимальных значений  $\theta_0$ , связанных по положению с отверстиями для вдува. Для  $\bar{G} \geq 0,63\%$  в интервале  $S/d \sim 0,75...1,5$  наблюдается локальный минимум значений  $\theta_0$ , всё менее выраженный с ростом относительного расхода вдува. Наконец, при  $S/d \sim 2,5...3,5$  значения  $\theta_0$  достигают локальных максимальных значений и далее монотонно уменьшаются до уровня  $\theta_0 \sim 0,15$ . Наличие выраженного минимума значений  $\theta_0$  в интервале  $S/d \sim 0,75...1,5$  для относительных расходов вдува  $\bar{G} \geq 0,63\%$  свидетельствует об уносе здесь вдуваемой среды от поверхности корытца с последующим её возвращением к стенке в интервале  $S/d \sim 2,5...3,5$ .

На рис. 3 для того же диапазона относительных расходов вдува  $\bar{G} \sim 0,49...1,85\%$  приведены осреднённые по шагу отверстий распределения эффективности  $\theta$  при использовании расположенных за ними  $V$ -образных выемок в отношении к значениям  $\theta_0$ , полученным при отсутствии  $V$ -образных выемок –  $\theta/\theta_0$ . Используются обозначения, соответствующие рис. 2.

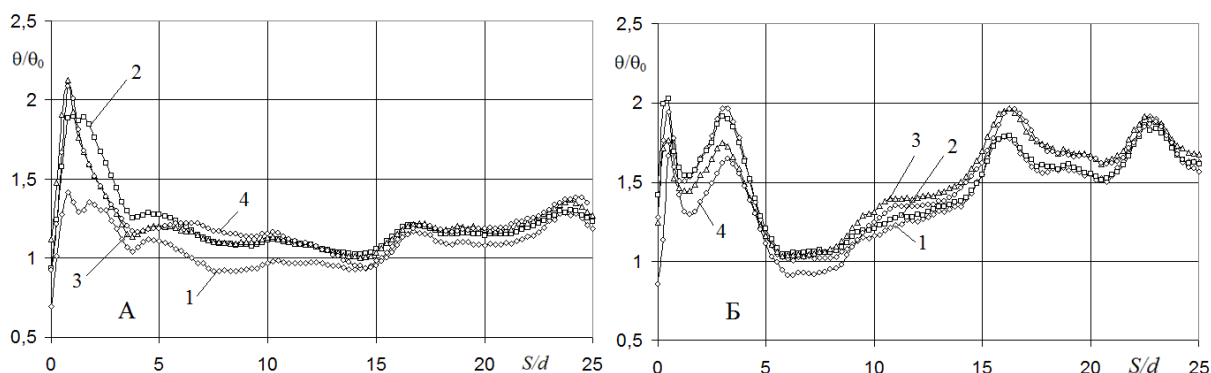


Рис. 3. Осреднённые по шагу отверстий  $\theta/\theta_0$  со стороны корытца лопатки при вдуве через отверстия на передней кромке

Отношения  $\theta/\theta_0$  приведены для случаев, когда завесная пелена формируется при использовании  $V$ -образных выемок у передней кромки –  $A$  (соответствует фрагменту  $A$  на рис. 1) и при смещённых  $V$ -образных выемках вниз по течению вдоль корытца на расстояние 6,14 мм –  $B$  (фрагмент  $B$  на рис. 1). Использование  $V$ -образных выемок даёт прирост осреднённых по шагу отверстий значений эффективности завесного охлаждения – отношение  $\theta/\theta_0 > 1$  практически во всем диапазоне значений  $S/d \leq 25$ , что связано с концентрацией вдуваемой среды на выемках у стенки. Значения  $\theta/\theta_0 < 1$  получены только для  $\bar{G} = 0,63$  в диапазоне  $6,5 \leq S/d \leq 15,5$  при расположении  $V$ -образных выемок непосредственно у отверстий для вдува ( $A$ ), а также в диапазоне  $5,5 \leq S/d \leq 8,5$  для  $\bar{G} = 1,85\%$  для случая  $V$ -образных выемок, смещённых вниз по потоку от отверстий ( $B$ ). В диапазоне  $S/d \leq 5$  для последнего случая наблюдаются два чётко выраженных

максимума  $\theta/\theta_0$ . Начиная с  $S/d > 8$ , значения  $\theta/\theta_0$  вниз по течению возрастают и превышают  $\theta/\theta_0 > 1,5$  при  $S/d > 15$ . Наблюдаемые здесь локальные экстремумы значений  $\theta/\theta_0$  объяснить пока не представляется возможным.

В целом можно отметить, что использование  $V$ -образных выемок, смещённых вниз по потоку от отверстий ( $B$ ), даёт более высокий прирост  $\theta/\theta_0 > 1$  по сравнению с использованием  $V$ -образных выемок непосредственно у отверстий для вдува ( $A$ ).

Завесная пелена на спинке лопатки наблюдалась в диапазоне параметров вдува  $0,5 \leq m \leq 2,0$  при заглушенных отверстиях для вдува на передней кромке и на корытце.

На рис. 4 приведены распределения осреднённых по шагу отверстий эффективности завесного охлаждения  $\theta_0$ , полученные без использования  $V$ -образных выемок за отверстиями на спинке.

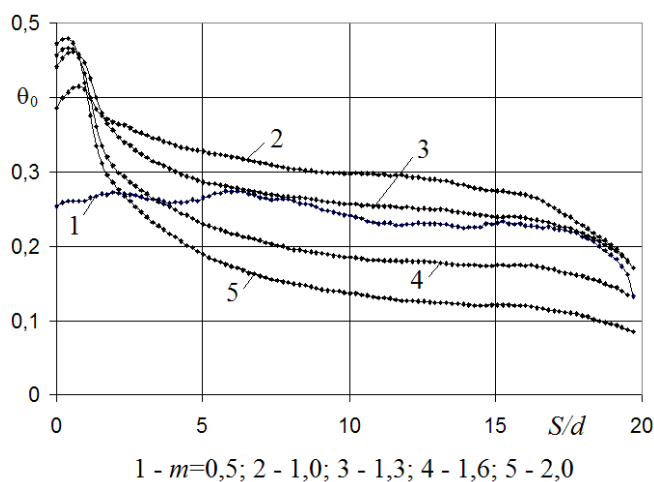


Рис. 4. Распределения осреднённых по ряду отверстий значений  $\theta_0$  при отсутствии  $V$ -образных выемок на спинке лопатки

Отсчёт координаты  $S/d$  производится вниз по потоку от отверстий на спинке лопатки. Зависимости получены в условиях ускоряющегося основного потока с параметрами ускорения  $k$  в диапазоне от  $6,2 \cdot 10^{-5}$  в окрестности вдува при  $S/d = 0$  до  $k \sim 4,6 \cdot 10^{-6}$  при  $S/d \approx 20$  в пределах графика. Видно, что для параметров вдува  $m \leq 1$  зависимости  $\theta_0$  от  $S/d$  имеют пологий характер. При дальнейшем росте  $m > 1$  зависимости становятся более крутыми, особенно в окрестности вдува (при  $S/d < 2,5$ ). При  $m > 1,6$  на удалении от отверстий ( $S/d > 2,5$ ) значения  $\theta_0$  значительно снижаются, что вызвано уходом вдуваемых струй от спинки лопатки.

На рис. 5 выполнено сравнение осреднённых по шагу отверстий относительных эффективностей завесного охлаждения  $\theta/\theta_0$  в зависимости от  $S/d$ , отсчитываемого от центра отверстий вниз по потоку, при использовании одинарных и расположенных друг за другом двух  $V$ -образных выемок для фиксированных параметров вдува  $m$ .

Видно, что использование расположенных за отверстиями одного ряда  $V$ -образных выемок (цифра 1 на рис. 5) даёт локальный эффект  $\theta/\theta_0 > 1$  вниз по потоку вблизи отверстий. Использование сдвоенных  $V$ -образных выемок (цифра 2 на рис. 5) приводит к более обширному эффекту локального повышения эффективности завесы –  $\theta/\theta_0 > 1$ . С ростом  $m$ , вплоть до  $m = 1,85$ , область значений  $\theta/\theta_0 > 1$  расширяется от  $S/d = 5$  при  $m = 0,7$  до  $S/d = 13$ .

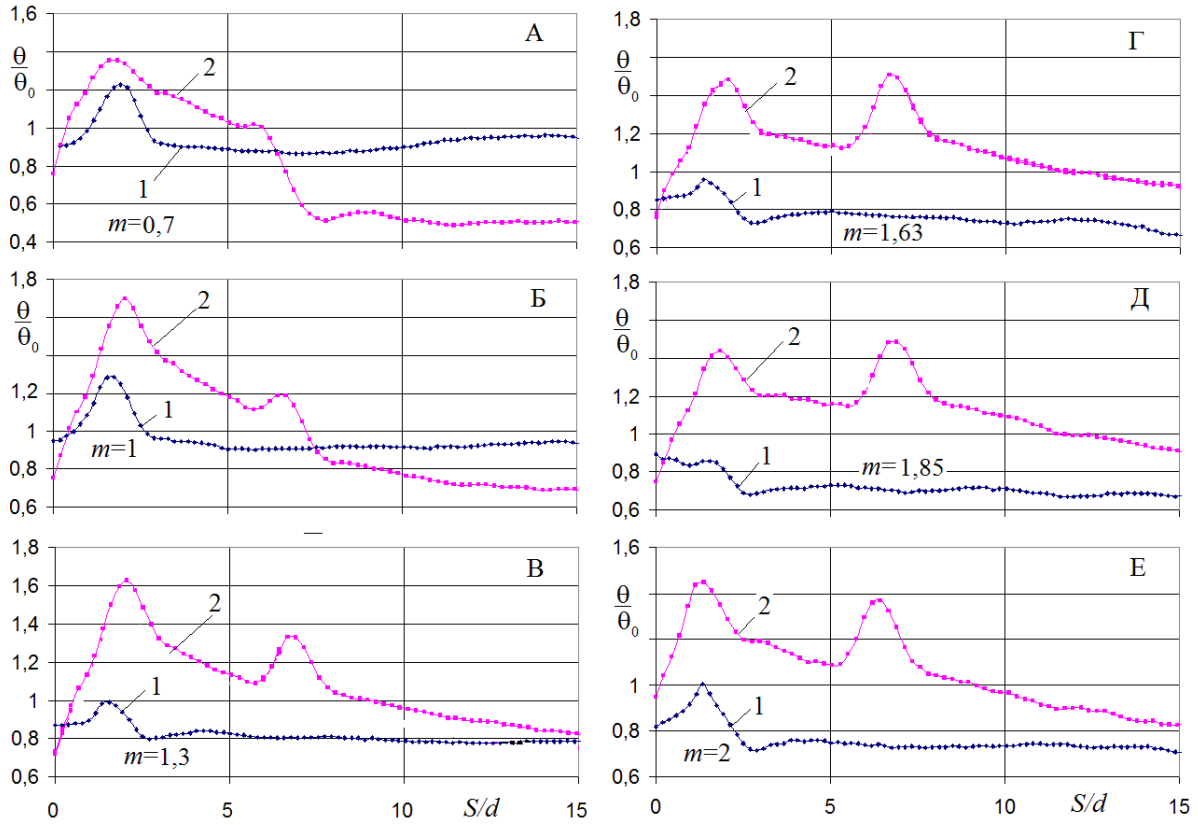


Рис. 5. Относительная эффективность завесного охлаждения  $\theta/\theta_0$  на спинке лопатки:  
1 – одна V-образная выемка; 2 – две V-образных выемки

При значениях  $S/d$ , больших указанных, для соответствующих значений  $m$ , напротив, наблюдаются пониженные значения –  $\theta/\theta_0 < 1$ . Таким образом, наличие V-образных выемок способствует увеличению количества вдуваемой среды в пристеночном слое непосредственно за отверстиями, что приводит к локальному росту эффективности завесного охлаждения. При дальнейшем росте  $m$  диапазон значений  $S/d$ , при которых  $\theta/\theta_0 > 1$ , сокращается.

На рис. 6 представлены средние по шагу отверстий значения  $\theta_0$  и  $\theta$  для взятых в качестве примера фиксированных расстояний (сечений) вниз по потоку от отверстий  $S/d = 4$  (заполненные значки) и  $S/d = 10$  (пустые значки).

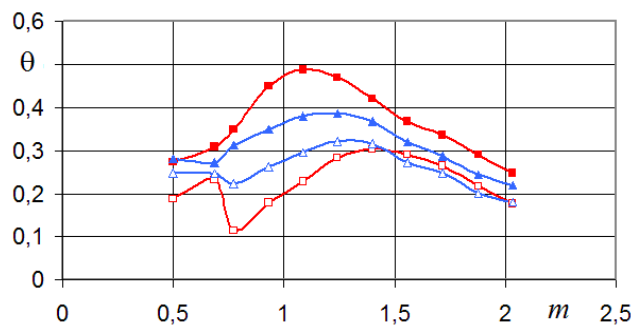


Рис. 6. Осреднённые по шагу отверстий значения  $\theta$  для  $S/d = 4$ ; 10 на спинке:  
— без выемок; — две V-образные выемки

Наличие сдвоенных  $V$ -образных выемок за отверстиями (прямоугольные значки) перераспределяет вдуваемые массы у стенки, что приводит к более высоким значениям  $\theta$  при  $S/d = 4$  (заполненные значки) и более низким значениям  $\theta$  при  $S/d = 10$  (пустые значки). Данные, полученные при отсутствии  $V$ -образных выемок (треугольные значки), легли между ними. При наличии сдвоенных  $V$ -образных выемок наблюдается сдвиг максимума  $\theta$  в сечениях  $S/d$  по значениям параметра вдува  $m$ : для  $S/d = 4$  максимум  $\theta$  реализуется при  $m \approx 1,08 \dots 1,09$ , а для  $S/d = 10$  – при  $m \approx 1,4$ . При отсутствии  $V$ -образных выемок максимумы  $\theta_0$  для  $S/d = 4$  и для  $S/d = 10$  наблюдаются практически при одинаковых значениях параметра вдува  $m \approx 1,24 \dots 1,25$ .

Завесная пелена на корытце лопатки наблюдалась в диапазоне параметров вдува  $1,6 \leq m \leq 3,0$  при отсутствии на стенке  $V$ -образных выемок, при использовании за отверстиями  $V$ -образных выемок и сдвоенных  $V$ -образных выемок соответственно. При этом отверстия на передней кромке и спинке лопатки были заглушены. На рис. 7 представлены значения осреднённых эффективностей завесного охлаждения  $\theta_0$  при отсутствии  $V$ -образных выемок для параметров вдува  $m = 1,9; 2,4; 3,0$  в зависимости от координаты  $S/d$ , отсчитываемой вдоль образующей корытца лопатки от отверстий для вдува на корытце.

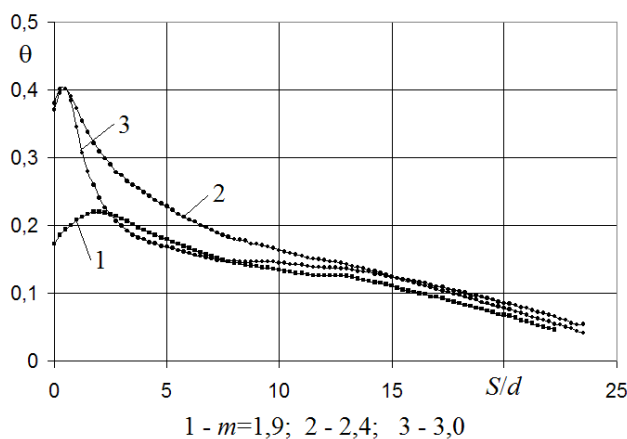


Рис. 7. Распределения осреднённых по шагу отверстий  $\theta_0$  вниз по потоку от отверстий на корытце лопатки

Видно, что с ростом параметров вдува  $m$  значения  $\theta_0$  резко растут в окрестности отверстий для вдува при  $S/d \leq 5$ . Далее вниз по потоку с ростом  $S/d$  значения  $\theta$  для всех параметров вдува  $m$  начинают сходиться в узкий интервал значений и становятся меньшими 0,1 для  $S/d \geq 19$ .

Влияние  $V$ -образных выемок на значения  $\theta/\theta_0$  (аналогично случаям на спинке лопатки) показано на рис. 8. Принятые обозначения аналогичны обозначениям на рис. 5. Получено, что применение одиночных  $V$ -образных выемок в диапазоне рассмотренных значений  $m$  не дало положительного эффекта: для  $S/d < 20$  значения  $\theta/\theta_0 < 1$ . При применении сдвоенных  $V$ -образных выемок для  $m = 1,6$  в интервале  $S/d < 8,5$  наблюдались связанные с ними по положению при  $S/d \approx 0,25$  и  $S/d \approx 7,5$  два локальных максимума  $\theta/\theta_0 > 1$ . Максимальный эффект от сдвоенных  $V$ -образных выемок достигался при  $m = 1,9$ . Начиная с  $m \geq 2,7$ , значения  $\theta/\theta_0$  становятся меньшими единицы.

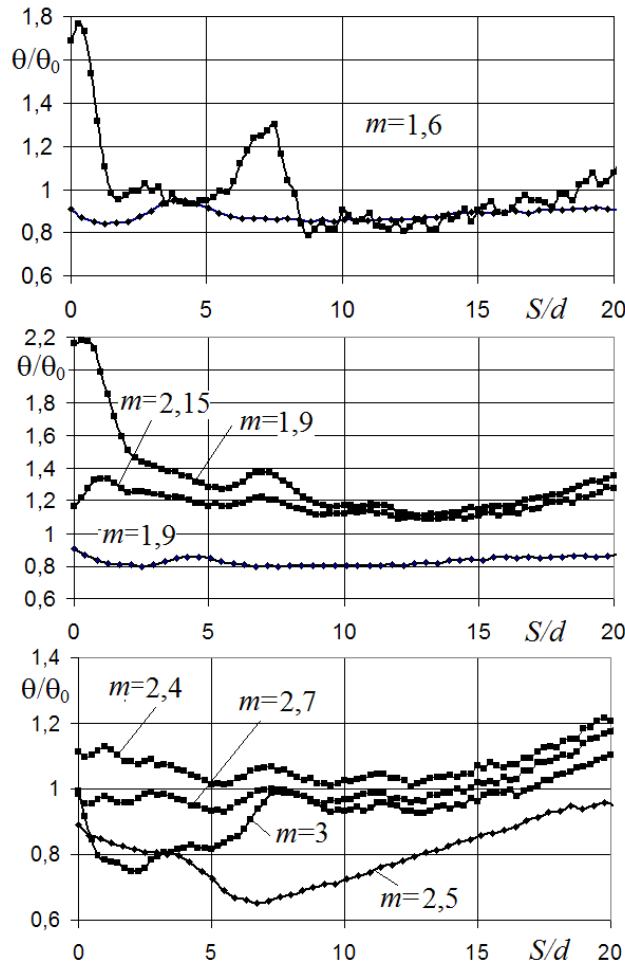


Рис. 8. Осреднённые по шагу отверстий значения  $\theta/\theta_0$  на корытце лопатки:  
 — — одна V-образная выемка; — — две V-образные выемки

На рис. 9 представлены средние по шагу отверстий в ряду значения  $\theta_0$  и  $\theta$  при вдуве на корытце для взятых в качестве примера фиксированных расстояний (сечений) вниз по потоку от отверстий  $S/d = 4$  (заполненные значки) и  $S/d = 10$  (пустые значки). Рассмотрен случай сдвоенных V-образных выемок. Принятые обозначения аналогичны обозначениям на рис. 6.

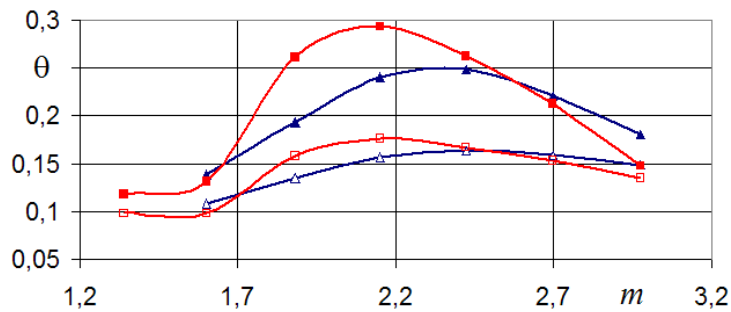


Рис. 9. Осреднённые по шагу отверстий значения  $\theta$   
 на корытце без выемок: —▲—  $S/d = 4$ ; —△—  $S/d = 10$ ;  
 две V-образные выемки: —■—  $S/d = 4$ ; —□—  $S/d = 10$



Получено, что максимумы  $\theta_0$  при отсутствии выемок на стенке корытца для  $S/d = 4$  и  $S/d = 10$  достигаются при параметрах вдува  $m \approx 2,4 \dots 2,42$  соответственно (треугольники). При использовании сдвоенных  $V$ -образных выемок максимумы  $\theta$  для значений  $S/d = 4$  и  $S/d = 10$  достигаются при  $m \approx 2,1 \dots 2,2$  (прямоугольники). Таким образом, использование сдвоенных  $V$ -образных выемок сдвигает оптимальные значения параметра вдува  $m$  на корытце на величину  $\Delta m \approx 0,3$  в сторону его уменьшения.

### **Заключение**

Применение  $V$ -образных выемок за отверстиями на передней кромке приводит к возрастанию эффективности  $\theta$ .

Условия формирования завесной пелены на спинке лопатки более благоприятны, чем на корытце. Так, завесная пелена на спинке наблюдалась во всём охваченном экспериментами диапазоне параметров вдува  $0,5 \leq m \leq 2,0$ . Завесная пелена на корытце наблюдалась в диапазоне  $1,6 \leq m \leq 3,2$ .

Максимальные осреднённые по шагу отверстий эффективности завесного охлаждения получены на спинке для  $m \approx 1,2 \div 1,4$ ; на корытце – для  $m \approx 2,4 \div 2,5$ . При этом эффективность завесы на спинке в 1,5 – 2 раза превышает эффективность завесы на корытце.

Использование двух  $V$ -образных выемок за отверстиями способствовало снижению оптимальных значений  $m$  на спинке до значений  $1,1 \div 1,2$ ; на корытце – до значения  $m \approx 2,15$ . При этом возрастали значения осреднённых по шагу отверстий эффективностей завесного охлаждения и расширялся диапазон формирования завесной пелены на корытце в сторону снижения  $m$  до 1,34.

### **Библиографический список**

1. Сендюрев С.И., Тихонов А.С., Хайрулин В.Т., Самохвалов Н.Ю. Современные системы охлаждения сопловых аппаратов высоконагруженных газовых турбин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2015. № 42. С. 34-46. DOI: 10.15593/2224-9982/2015.42.03
2. Sgarzi O., Leboeu F. Analysis of vortices in three-dimensional jets introduced in a cross-flow boundary-layer // Proceedings of the ASME Turbo Expo. 1997. V. 1. DOI: 10.1115/97-GT-517
3. Нестеренко В.Г., Матушкин А.А. Конструктивные методы совершенствования системы плёночного охлаждения рабочих лопаток турбин ВРД // Труды МАИ. 2010. № 39. <http://trudymai.ru/published.php?ID=14813>
4. Jordan C.N., Wright L.M. Heat transfer enhancement in a rectangular (AR=3:1) channel with v-shaped dimples // Proceedings of ASME Turbo Expo. 2011. V. 5. DOI: 10.1115/gt2011-46128
5. Ремизов А.Е., Лебедев В.В., Лебедев О.В. Повышение локальной эффективности и равномерности распределения плёночного охлаждения при использовании  $V$ -образных выемок // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьёва. 2018. № 1 (44). С. 26-31.

## FORMATION OF FILM COOLING ON THE TURBINE BLADE BACK AND PRESSURE SIDE IN THE CASE OF USING V-SHAPED DIMPLES

© 2019

- V. V. Lebedev** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft Engines; Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation; [lebedevvlad2000@mail.ru](mailto:lebedevvlad2000@mail.ru)
- O. V. Lebedev** Postgraduate Student of the Department of Aircraft Engines; Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation; [lebedevov2000@mail.ru](mailto:lebedevov2000@mail.ru)
- A. E. Remizov** Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Aircraft Engines; Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation; [ad@rsatu.ru](mailto:ad@rsatu.ru)

Alongside the development of methods of intensifying convective heat transfer inside the blade, development of methods of local improvement of the efficiency of film cooling of the blade's surface is still of immediate interest. The film is formed on the blade surface in conditions of high-camber shape and low initial velocity of the gas flow in the vicinity of the leading edge with its subsequent abrupt acceleration. The paper presents some data on the peculiarities of film formation on the back and pressure side of the blade in the vicinity of the leading edge. Experimental temperature distribution over the adiabatic wall was obtained with the use of a FLIR-E 64501 thermal imager. It was found that the conditions for the film formation on the blade back are more favorable than those on the pressure side. It manifests itself in the fact that optimal blowing parameters on the blade back are considerably lower than those on the pressure side. The use of V-shaped dimples located on the wall immediately behind the holes for blowing was suggested as a measure for local improvement of film cooling efficiency. The efficiencies of film cooling in the formation of a curtain, without the use and with the use of V-shaped dimples behind the holes for blowing were compared. Local improvement of efficiency and uniformity of film cooling distribution with the use of V-shaped dimples behind the holes for blowing was observed.

*Turbine blade; back side; pressure side; V-shaped dimples; blowing parameter; film cooling efficiency.*

*Citation:* Lebedev V.V., Lebedev O.V., Remizov A.E. Formation of film cooling on the turbine blade back and pressure side in the case of using V-shaped dimples. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 4. P. 96-105. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-96-105

### References

1. Sendyurev S.I., Tikhonov A.S., Khairulin V.T., Samokhvalov N.Yu. Modern cooling vane's systems of high-loaded gas turbines. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2015. № 42. P. 34-46. DOI: 10.15593/2224-9982/2015.42.03. (In Russ.)
2. Sgarzi O., Leboeu F. Analysis of vortices in three-dimensional jets introduced in a cross-flow boundary-layer. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 1997. V. 1. DOI: 10.1115/97-GT-517
3. Nesterenko V.G., Matushkin A.A. Design methods of modern air-jet engines turbine rotor blades film cooling system improvement. *Trudy MAI*. 2010. No. 39. Available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14813>. (In Russ.)
4. Jordan C.N., Wright L.M. Heat transfer enhancement in a rectangular (AR=3:1) channel with v-shaped dimples. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 2011. V. 5. DOI: 10.1115/gt2011-46128
5. Remizov A.E., Lebedev V.V., Lebedev O.V. Enhancement of local efficiency and film cooling allocation uniformity at V-shape recesses employment. *Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*. 2018. No. 1 (44). P. 26-31. (In Russ.)