

Е.Ю. МАРЧУКОВ,

д-р техн. наук,

А.В. СТАРОДУМОВ(ОКБ им. А. Люльки) – филиал
ПАО «ОДК-УМПО», Москва),**А.В. ИЛЬИНКОВ,**

канд. техн. наук,

А.В. ЩУКИН,

д-р техн. наук,

В.В. ТАКМОВЦЕВ,

канд. техн. наук

(КНИТУ-КАИ, Казань)

a.v.shchukin@rambler.ru

Эффективность тепловой завесы, создаваемой веерными отверстиями, для антиобледенительных систем летательных аппаратов и их двигателей

Экспериментально исследована сравнительная эффективность нагрева воздушной пленкой выпуклых и вогнутых участков поверхности использованием однорядных поясков с веерными и цилиндрическими отверстиями.

Физический эксперимент, пленочный воздушный нагрев, выпуклая и вогнутая поверхность, эффективность тепловой завесы, параметр вдува, угол вдува, цилиндрические и веерные отверстия

Эксплуатация авиационной техники в арктических и других районах с холодным климатом требует решения вопросов повышения эффективности и надежности работы антиобледенительных систем летательных аппаратов и их двигателей. Для тепловой защиты крыла, оперения летательных аппаратов и воздухозаборников газотурбинных двигателей наиболее широко применяются воздушно-тепловые и электротепловые системы.

При проектировании воздушно-тепловых антиобледенительных систем важно обеспечение стабильности тепловых завес, предназначенных для противодействия нарастанию ледяной корки на обтекаемых потоком траекторных поверхностях летательных аппаратов и их двигателей.

В последние десятилетия активно исследуются методы повышения эффективности тепловых завес применением профилированных отверстий [1–14]. Вдув воздуха через такие отверстия в ряде случаев позволяет значительно повысить эффективность тепловой завесы по сравнению с пояском цилиндрических отверстий. В результате повышения стабильности и устойчивости образующейся на обтекаемой поверхности пленки воздуха повышается эффективность нагрева обтекаемых поверхностей. При этом нередко возникает проблема расчета и проектирования систем вдува горячего воздуха на выпуклые и вогнутые поверхности. Неизотермический поток за сечением вдува при обтекании выпуклых и вогнутых поверхностей подвергается воздействию центробежных массовых сил. В связи с этим требуются данные для учета влияния фактора кривизны на температуру пленки воздуха, подаваемого для предотвращения нарастания корки льда.

В настоящей статье приводятся результаты опытного исследования эффективности пленочного нагрева обтекаемых поверхностей вдувом горячего воздуха на выпуклые или вогнутые поверхности через однорядные пояски веерных отверстий в сравнении с их цилиндрическими вариантами.

Эффективность тепловой завесы, образуемой вдувом горячего воздуха через веерные отверстия при обтекании выпуклой или вогнутой поверхности, исследовалась на двух рабочих участках, входящих в состав экспериментального стенда [4].

Схемы и общий вид этих рабочих участков с выпуклой поверхностью канала показаны на рис. 1, а, с вогнутой поверхностью канала – на рис. 1, б.

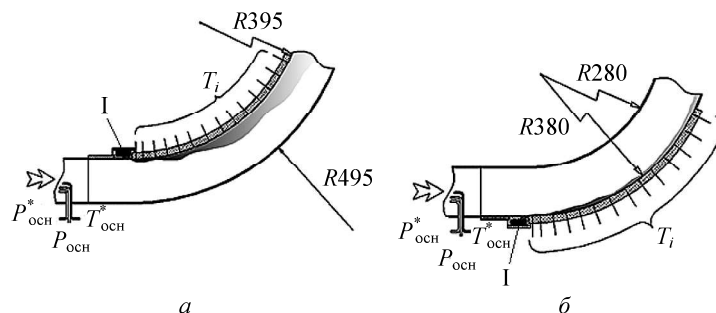


Рис. 1. Рабочие участки для исследования эффективности тепловой завесы, создаваемой отверстиями на поверхностях (I – текстолитовый вкладыш с пояском отверстий)

В обоих случаях объект исследования – криволинейная асбоцементная пластина постоянного радиуса кривизны, препарированная поверхностными термопарами для измерения температуры пленки $T_{пл}^*$ (адиабатной температуры стенки $T_{ад.ст}^*$) за пояском цилиндрических (рис. 2, а) и веерных (рис. 2, б) отверстий. Эти отверстия (по пять штук в ряду) выполнялись в текстолитовых прямоугольных вкладышах с размерами 160×50×25 мм (рис. 1, позиция I). Их диаметр во входной части отверстий и шаг между ними составляли $d = 5$ мм, $t_{цил} = 10$ мм, $t_{веер} = 12$ мм. Вкладыши устанавливались заподлицо с асбоцементной пластиной.

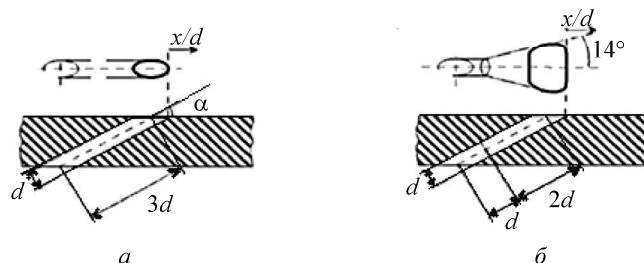


Рис. 2. Отверстия в текстолитовом вкладыше для исследования пленочного нагрева

Экспериментальный стенд оснащен необходимыми измерительными системами и приборами. По воздушной магистрали для основного потока с помощью комбинированного датчика замерялись следующие параметры: статическое давление $P_{осн}$, полное давление $P_{осн}^*$, температура $T_{осн}^*$.

В системе вторичного (подогретого) потока, вдуваемого через пояски цилиндрических или веерных отверстий в основной поток, замерялись температура нагретого воздуха $T_{в}^*$, давление $P_{в}^*$ и его массовый расход $G_{в}$. Температура вторичного воздуха $T_{в}^*$ замерялась хромель-алюмелевой термопарой, расположенной на входе в газосборник, там же располагался и приемник отбора давления $P_{в}^*$.

В качестве датчиков для замера адиабатной температуры стенки $T_{ад.ст}^*$ использовались хромель-алюмелевые термопары, расположенные в продольном меридиональном сечении асбоцементной пластины. Показания температуры регистрировались с помощью аналого-цифрового преобразователя фирмы «L-Card» (Россия) марки Е-270, имеющего класс точности 0,05. Давления замерялись измерителями давления компании НПП «ПРОМА» (Россия) с классом точности 1. Их сигналы оцифровывались модулем аналого-цифрового преобразователя Е-270 и передавались в компьютер.

Расход вторичного потока воздуха $G_{в}$ замерялся ротаметром РМ40УЗ.

Приведем основные параметры:

- относительное расстояние x/d от сечения вдува до точки измерения температуры пленки $T_{пл}^*$;
- параметр вдува

$$m = \frac{\rho_{в} W_{в}}{\rho_{осн} W_{осн}},$$

где $W_{осн}$, $W_{в}$ и $\rho_{осн}$, $\rho_{в}$ – среднерасходные скорости и значения плотности основного и вторичного потоков;

- число Рейнольдса для основного потока

$$Re_{осн} = \frac{W_{осн} \rho_{осн} l_{пл}}{\mu_{осн}},$$

где $l_{пл}$ – длина адиабатной пластины; $\mu_{осн}$ – динамический коэффициент вязкости воздуха для основного потока;

- число Рейнольдса для вторичного потока

$$Re_{в} = \frac{W_{в} \rho_{в} d}{\mu_{в}},$$

где d – диаметр входной части отверстий во вкладыше; $\mu_{в}$ – динамический коэффициент вязкости вторичного потока воздуха;

- эффективность пленочного нагрева на различных относительных расстояниях от сечения вдува $(x/d)_i$

$$\eta_{пл\ i} = \frac{T_{пл\ i}^* - T_{осн}^*}{T_{в}^* - T_{осн}^*},$$

где имеется шестнадцать точек замера $T_{пл\ i}^*$ в продольном направлении.

В статье анализируются осредненные по ширине канала значения эффективности пленочного нагрева. Осреднение между соседними отверстиями выполнялось по шести точкам.

Сравнительные опытные исследования однорядных поясков с цилиндрическими и веерными отверстиями, расположенными на выпуклой и вогнутой поверхностях, проводились для углов вдува $\alpha = 30; 45^\circ$ в диапазоне изменения параметра вдува $m = 0,5 \dots 2,5$. Поскольку в сечении вдува пограничный слой, выросший на предвключенном участке нагреваемой поверхности, разрушается, фактор относительной кривизны δ^{**}/R (отношение условной толщины потери импульса к радиусу кривизны поверхности) был заменен на более удобный для инженерной практики симплекс s/R , где s – эквивалентная высота щели, определенная по пояску исследуемых отверстий; R – радиус кривизны обтекаемой поверхности. В выполненном исследовании для выпуклой поверхности $s/R_{вып} = 0,00552$, а для вогнутой – $s/R_{вогн} = 0,00574$.

При анализе полученных результатов будем иметь в виду, что при обтекании выпуклой поверхности воздействие центробежных массовых сил имеет консервативный характер, в связи с чем понижается интенсивность процессов конвективного переноса теплоты в пристенной области течения, а на вогнутой поверхности, наоборот, повышается интенсивность этих процессов. Кроме этого, необходимо учитывать и неизотермичность пристенного потока, когда между обтекаемой стенкой и основным холодным потоком расположена горячая пленка, вдуваемая через пояска отверстий цилиндрической или веерной формы. Необходимо учитывать и наличие парных почкообразных вихревых структур, образующихся за сечением вдува из цилиндрических отверстий. При вдуве через веерные отверстия эти вихревые структуры менее интенсивны, нежели за цилиндрическими отверстиями, при прочих равных условиях [1].

При оценке протяженности начального участка смешения использовались соответствующие эпюры распределения эффективности тепловой завесы, демонстрирующие неодинаковый характер зависимостей, аппроксимирующих опытные точки $\bar{\eta}_{веер}/\bar{\eta}_{цил} = f(x/d)$. Сравнительные исследования эффективности пленочного нагрева $\eta_{пл}$ за цилиндрическими и веерными отверстиями на моделях выпуклой и вогнутой поверхностей проводились для однорядных веерных и цилиндрических поясков отверстий в идентичных условиях при варьировании параметра вдува m , угла вдува α и чисел Рейнольдса $Re_{осн}$, $Re_{в}$. Сравнительные эксперименты с варьированием чисел Рейнольдса не показали различий в результатах, поэтому в статье приведены данные, полученные при $Re_{в} = 5,2 \cdot 10^4$.

В статье выполнен сравнительный анализ относительных значений эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}_{веер}/\bar{\eta}_{цил}$ для оптимальных ($m = 0,5$) и максимальных в проведенном эксперименте значений параметра вдува.

Тестовые опыты проводились сопоставлением кривых [5] для однорядного пояска веерных отверстий с углом вдува $\alpha = 30^\circ$ и параметром вдува $m = 0,5$.

Полученные результаты программных экспериментов представлены в относительном виде $\bar{\eta}_{веер}/\bar{\eta}_{цил} = f(x/d)$. В качестве базовых приняты данные по эффективности тепловой завесы, осредненные вдоль пояска цилиндрических отверстий (по ширине канала). Они получены при прочих равных условиях с исследованными веерными отверстиями.

На рис. 3 сопоставлены сравнительные значения эффективности тепловой завесы на выпуклой поверхности с веерными отверстиями относительно цилиндрических отверстий при вдуве воздуха под углом $\alpha = 30^\circ$.

Как видим (см. рис. 3), на начальном участке смешения ($x/d \approx 0 \dots 20$) значение $\bar{\eta}_{веер}/\bar{\eta}_{цил}$ при параметре вдува $m = 0,5$ по мере перемещения вниз по потоку снижается с 1,2 до 0,8. Более низкие численные значения $\bar{\eta}_{веер}/\bar{\eta}_{цил}$ наблюдаются при прочих равных условиях на плоской пластине: сниже-

ние $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ там происходит от 0,97 до 0,74. Это свидетельствует о 20 %-м положительном влиянии продольной кривизны выпуклой поверхности на относительную эффективность пленочного нагрева $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ по сравнению с плоской поверхностью.

При высоком значении параметра вдува ($m = 2,5$) отрыв горячего потока воздуха на начальном участке смешения, вдуваемого из цилиндрических отверстий в холодный поток воздуха, отсутствует (см. рис. 3). Можно полагать, что причиной этого является стабилизирующий пристенное течение эффект обтекания выпуклой нагреваемой поверхности – так называемое консервативное воздействие центробежных массовых сил. При этом известный фактор снижения интенсивности парных почкообразных вихревых структур за всерными отверстиями позволяет получить дополнительный положительный эффект в применении всерных отверстий $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}} = 1,25 \dots 1,15$.

На основном участке смешения основного и вторичного потоков ($x/d = 20 \dots 80$) при $m = 0,5$ величина $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ составляет около 0,8. В то же время при $m = 2,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ возрастает по ходу основного потока от 1,2 до 2,7. Причина положительного эффекта от использования всерных отверстий при высоких параметрах вдува также состоит в малой интенсивности почкообразных вихрей в диффузорных каналах всерных отверстий по сравнению с цилиндрическими отверстиями.

В идентичных условиях на плоской поверхности было получено $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}} \approx 0,9 \dots 1,42$.

При вдуве на выпуклую поверхность горячего воздуха под углом $\alpha = 45^\circ$ (рис. 4) в случае однорядного пояса всерных отверстий на всем протяжении тепловой завесы и на оптимальном и высоких значениях параметров вдува демонстрируется преимущество всерных отверстий.

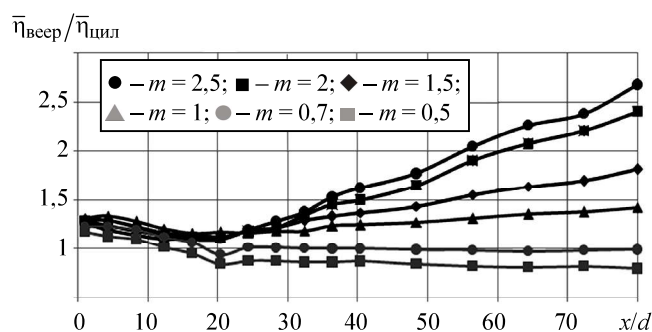


Рис. 3. Относительная эффективность пленочного нагрева $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ на выпуклой поверхности при вдуве воздуха под углом $\alpha = 30^\circ$

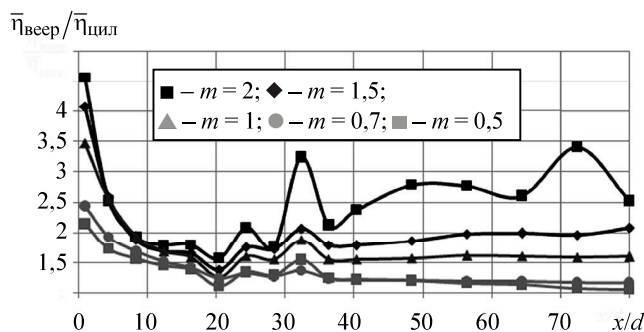


Рис. 4. Относительная эффективность пленочного нагрева $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ на выпуклой поверхности при вдуве воздуха под углом $\alpha = 45^\circ$

Так, на начальном участке смешения ($x/d \approx 0 \dots 20$) при параметре вдува $m = 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ снижается по ходу потока с 2,2 до 1,1, при $m = 2$ – от 4,5 до 1,6. На основном участке смешения при оптимальном $m = 0,5$ и высоком $m = 2$ параметрах вдува значения относительной эффективности тепловой завесы повышаются по мере увеличения x/d , соответственно, от 1,1 до 1,6 и от 1,6 до 2,8.

На вогнутой поверхности всерные отверстия практически на всей защищаемой пленкой поверхности имеют преимущество, по сравнению с цилиндрическими отверстиями, по эффективности пленочного нагрева при прочих равных условиях.

Действительно, при значении угла вдува 30° (рис. 5, а) на начальном участке смешения ($x/d = 0 \dots 20$) при параметре вдува $m = 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ снижается по ходу потока с 1,6 до 1,15. При высоком значении параметра вдува ($m = 2,5$) относительная величина $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ снижается с 1,45 до 1,2.

На основном участке смешения ($x/d = 20 \dots 80$) при $m = 0,5$ относительная эффективность тепловой завесы повышается с 1,15 до 1,5, а при $m = 2,5$ возникает незначительный положительный эффект использования всерных отверстий: $\bar{\eta}_{\text{всеп}}/\bar{\eta}_{\text{цил}} = 1,2 \dots 1,1$.

При значении угла вдува $\alpha = 45^\circ$ на начальном участке пленочного нагрева вогнутой поверхности (рис. 5, б) прослеживается значительное преимущество всерных отверстий.

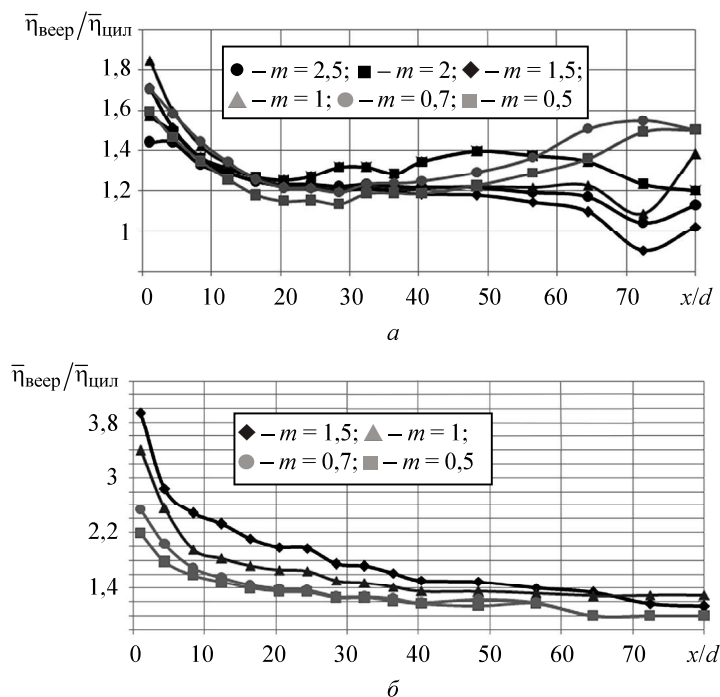


Рис. 5. Влияние продольной кривизны вогнутой поверхности на эффект замены цилиндрических отверстий на веерные при вдуве воздуха под углом $\alpha = 30^\circ$ (а) и $\alpha = 45^\circ$ (б)

Так, при оптимальном параметре вдува значение $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил}$ снижается по ходу основного потока с 2,2 до 1,35, а при высоких параметрах вдува – от 3,95 до 2. На основном участке пленочного нагрева ($x/d = 20 \dots 80$) при $\alpha = 45^\circ$ и параметре вдува $m = 0,5$ веерные отверстия позволяют поддерживать относительную величину $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил}$ на уровне 1,35...1. При высоких значениях параметров вдува $m = 1,5$ значение $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил}$ изменяется вниз по потоку от 2 до 1.

Таким образом, выполнено сравнительное экспериментальное исследование эффективности тепловой завесы нагревом воздушной пленкой выпуклых и вогнутых поверхностей с использованием поясков с веерными и цилиндрическими отверстиями.

Установлено, что на выпуклой поверхности для относительного значения ее кривизны $s_{экр} / R = 0,00552$ при вдуве воздуха под углом $\alpha = 30^\circ$ и параметре вдува $m = 0,5$ относительное значение $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил}$ на начальном участке смешения составляет по ходу потока 1,2...0,8, при $m = 2,5$ – около 1,25...1,15. На основном участке смешения при $m = 0,5$ значение $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил} = 0,8$, а на основном участке – 1,2...2,7.

При угле вдува $\alpha = 45^\circ$ и параметре вдува $m = 0,5$ тепловая завеса на выпуклой поверхности характеризуется на начальном участке значениями $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил} = 2,2 \dots 1,1$, а при $m = 2$ – значениями 4,5...1,6. В то же время на основном участке смешения при $m = 0,5$ значение $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил} = 1,1 \dots 1,6$, а при высоком параметре вдува – 1,6...2,8.

На вогнутой поверхности при относительном значении ее кривизны $s_{экр} / R = 0,00574$ и $\alpha = 30^\circ$ на начальном участке смешения значение $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил}$ при $m = 0,5$ изменяется в диапазоне 1,6...1,15, а при $m = 2,5$ составляет 1,45...1,2. На основном участке смешения относительные значения эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил}$ составляют, соответственно, 1,15...1,5 и 1,2...1,1.

При $\alpha = 45^\circ$ и $m = 0,5$ и $m = 1,5$ на начальном участке вогнутой поверхности данные $\bar{\eta}_{всеп} / \bar{\eta}_{цил}$ имеют значения 2,2...1,35 и 3,95...2, а на основном участке, соответственно, 1,35...1 и 2,0...1.

Научные исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках исполнения обязательств по соглашению 075-03-2020-051-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халатов А.А. и др. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Киев: НТУУ «КПИ»: Изд-во «Политехника», 2016. Т. 10. 236 с.
2. Щукин А.В. и др. Теплофизика рабочих процессов в охлаждаемых лопатках газовых турбин. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 392 с.
3. Горелов Ю.Г., Тюльков К.В. 3D-сопряженные исследования эффективности пленочного охлаждения сопловых лопаток с «меридиональным поджатием» и профилированными отверстиями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 1. С. 51–56.
4. Ильинков А.В. и др. Особенности обтекания диффузорной безотрывной выемки турбулентным потоком // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 4. С. 39–42.
5. Wright L.M., McClain S.T., Clemenson M.D. PIV Investigation of the Effect of Freestream Turbulence Intensity on Film Cooling from Fanshaped Holes // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 6–10, 2011, Vancouver, Canada. P. 493–507.
6. Kercher D.M. Spanwise Fan Diffusion Hole Airfoil. US Patent 6287075. 9 p.
7. Coletti F., Elkins C.J., Eaton G.K. Three-Dimensional Velocity Measurements of Film Cooling Flow under Favorable Pressure Gradient // Proc. of the ASME Turbo Expo–2012, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. P. 1627–1638.
8. Launder B.E., York J. Discrete-Hole Cooling in the Presence of Free Stream Turbulence and Strong Favorable Pressure Gradient // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1974. Vol. 17. Iss. 11. P. 1403–1409.
9. York W.D., Leylek J.H. Numerical Prediction of Mainstream Pressure Gradient Effects in Film-Cooling // Proc. of the ASME 1999 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, June 7–10, 1999, Indianapolis, USA. 9 p.
10. Schmidt D.L., Bogard D.G. Pressure Gradient Effects on Film Cooling // Proc. of the ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, June 5–8, 1995, Houston, USA. 8 p.
11. Teekaram A.J.H., Forth C.J.P., Jones T.V. Film Cooling in the Presence of Mainstream Pressure Gradients // Journal of Turbomachinery. 1991. Vol. 113. Iss. 3. P. 484–492.
12. Ying Huang et al. Multi Objective Optimization of Laidback Fan-Shaped Film Cooling Hole on Turbine Vane Suction Surface // Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 55. P. 1181–1194.
13. Haichao Wang, Zhi Tao, Haiwang Li. A Tip Region Film Cooling Study of the Fan-Shaped Hole Using PSP // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 153. Article № 119378.
14. Haiwang Li et al. The Characteristics and Divergence of Fan-Shaped and Cylindrical Holes on the Suction Side of a Turbine Blade under Rotating Conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 139. P. 432–441.

Поступила в редакцию 21.02.21

После доработки 23.02.21

Принята к публикации 26.02.21

Efficiency of a Hot Air Curtain Provided by Fan-Shaped Holes for Anti-Icing Systems of Aircraft and Their Engines

E.YU. MARCHUKOV¹, A.V. STARODUMOV¹, A.V. IL'INKOV²,
A.V. SHCHUKIN², AND V.V. TAKMOVTSSEV²

¹ Lyul'ka Design Bureau, Moscow

² Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

The paper describes the experiments of study the comparative efficiency of air film heating of convex and concave surfaces using single-row belts with fan-shaped and cylindrical holes.

Physical experiment, air film heating, convex and concave surface, hot air curtain efficiency, blowing parameter, blowing angle, cylindrical and fan-shaped holes