

УДК 536.24

Сравнительный анализ эффективности тепловой завесы за поясками веерных и цилиндрических отверстий в широком диапазоне изменений угла и параметра вдува *

Е.Ю. Марчуков¹, А.В. Стародумов¹, А.В. Щукин², А.В. Ильинков²,
В.В. Такмовцев², И.А. Попов², А.М. Ермаков²

¹ОКБ им. А. Люльки — филиал ПАО «ОДК-УМПО», Москва

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

E-mail: a.v.shchukin@rambler.ru

Экспериментально получены относительные осредненные по длине однорядного пояaska отверстий значения эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве воздуха через веерные отверстия, отнесенные к их значениям с цилиндрическими отверстиями, в широком диапазоне изменений параметра вдува m (от 0,25 до 5,5) и угла вдува α (от 30° до 75°). Установлены области режимных и геометрических параметров систем пленочного охлаждения, в которых веерные отверстия обеспечивают более высокую эффективность тепловой завесы, чем цилиндрические. На примере угла вдува $\alpha = 30^\circ$ показано, что при очень высоких параметрах вдува ($m = 4,5 \div 5,5$) на начальном участке смещения ($x/d < 10$) с увеличением x/d значения $\bar{\eta}_{\text{веер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ снижаются с 1,7 до 1,05. На основном участке смещения ($x/d > 10$) величина $\bar{\eta}_{\text{веер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ возрастает от 1,05 до 1,6. По эффективности тепловой завесы при оптимальных и высоких параметрах вдува m и значении угла вдува $\alpha = 45^\circ$ веерные отверстия при прочих равных условиях имеют преимущество над цилиндрическими отверстиями как на начальном, так и на основном участках смещения. При угле вдува $\alpha = 75^\circ$ значения $\bar{\eta}_{\text{веер}}$ выше, чем $\bar{\eta}_{\text{цил}}$, во всем диапазоне изменения параметра вдува и относительного расстояния от сечения вдува. На начальном участке смещения ($x/d < 5$) значения $\bar{\eta}_{\text{веер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ снижаются по ходу потока от 4 до 1,5, а на основном участке ($x/d > 5$) во всем диапазоне изменения параметра вдува изменяются в диапазоне 1,5 ÷ 2,5.

Ключевые слова: физический эксперимент, пленочное охлаждение поверхности, эффективность тепловой завесы, начальный и основной участок, поясок отверстий, цилиндрические и веерные отверстия, параметр вдува, угол вдува.

Введение

При разработке и совершенствовании газотурбинных двигателей различного назначения следует учитывать такой фактор, как повышение температуры газа перед турбиной.

* Научные исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по соглашению 075-03-2020-051-3.

© Марчуков Е.Ю., Стародумов А.В., Щукин А.В., Ильинков А.В., Такмовцев В.В., Попов И.А., Ермаков А.М., 2021

Это дает возможность улучшить удельные параметры двигателей [1–3]. Однако в таком случае возникает необходимость разработки надежных и эффективных систем воздушного охлаждения и, прежде всего, турбины высокого давления, на сопловые и рабочие лопатки которой поступает горячий газ из камеры сгорания двигателя. По существу, именно возможности систем воздушного охлаждения турбинных лопаток во многом определяют прогресс в развитии газотурбинных двигателей и энергоустановок. Важным аспектом здесь является разработка эффективных и экономичных систем конвективно-пленочного охлаждения профильных и торцевых поверхностей турбинных лопаток [4]. Вдув охлаждающего воздуха на поверхность лопатки, обтекаемую высокотемпературным высокоскоростным потоком газа, приводит к значительному увеличению дополнительных термодинамических и газодинамических потерь энергии, связанных с охлаждением лопаток, особенно в турбине высокого давления. При этом в случае принятия неудачных инженерных решений по системам пленочного охлаждения можно свести на нет ожидаемый эффект от их внедрения.

Численные расчеты задач с пленочным охлаждением обычно выполняются в программных комплексах Ansys CFX. Физические и математические модели взаимодействия крупномасштабных вихревых структур основного и вторичного потоков за сечением вдува строятся на основе имеющихся данных из опубликованных материалов, положительно зарекомендовавших себя при решении инженерных задач, связанных с вихревыми течениями (см., например, [5–8]).

В настоящей статье представлены результаты сравнительного экспериментального исследования эффективности тепловой завесы, производимой вдувом воздуха через однорядные пояски веерных и цилиндрических отверстий, выполненных на плоской поверхности, в широком диапазоне изменения значений угла и параметра вдува. В работах [8–21] приводятся описания схем веерных отверстий различной формы и результаты их исследований. Наиболее широко для пленочного охлаждения применяются веерные отверстия, изображенные на рис. 1. Их форма существенно сложнее традиционных цилиндрических отверстий, что удорожает технологию изготовления. Однако полученные положительные результаты в сравнительном исследовании веерных и традиционных цилиндрических отверстий позволили успешно внедрить пояски веерных отверстий в системы конвективно-пленочного охлаждения лопаток турбины высокого давления.

Из литературных источников известно, что с увеличением параметра вдува отрывные явления за сечением вдува из цилиндрических отверстий интенсифицируются, что связано с образованием и развитием почкообразной парной вихревой структуры (см., например, [8]). Однако снижение скорости вторичного потока на диффузорном участке веерного отверстия противодействует процессу развития вихреобразования в почкообразной парной вихревой структуре, повышая эффективность пленочного охлаждения по сравнению с вдувом охлаждающего воздуха через цилиндрические отверстия.

Использование веерных отверстий, как будет показано ниже, в ряде случаев обеспечивает благоприятные условия взаимодействия потока горячего газа и охлаждающего воздуха ввиду безотрывного обтекания стенки пленкой воздуха, образовавшейся на охлаждаемой поверхности. При этом пленка воздуха за сечением вдува охватывает более широкую площадь охлаждаемой стенки по сравнению с цилиндрическими отверстиями, что дополнительно повышает эффективность тепловой завесы.

Как видно на рис. 1а, веерные отверстия для небольших, порядка 30° , углов вдува α выполняются с одномерным диффузорным участком, расположенным в плоскости вдува. Средние и большие углы вдува воздуха в основной поток требуют увеличения степени диффузорности отверстия для более эффективного противодействия почкообразному парному вихрю. С этой целью в вертикальной плоскости выполняется дополнительное расширение канала по ходу потока вторичного воздуха. Дополнительная диффузорность

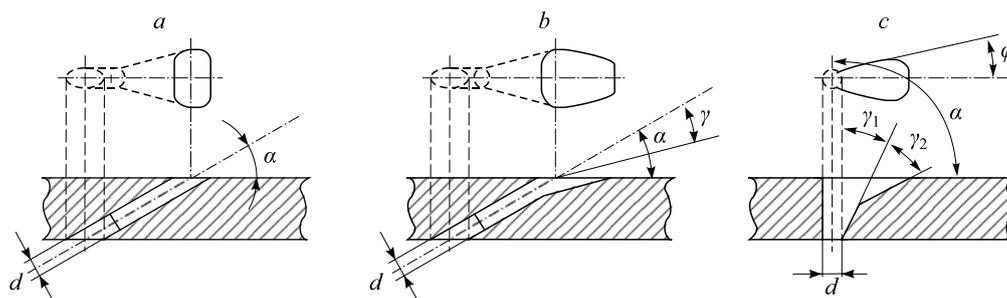


Рис. 1. Схемы веерных отверстий для малых (а), средних (б) и больших (с) углов вдува.

d — диаметр входного цилиндрического отверстия, α — угол вдува вторичного потока в основной поток, φ — угол полураствора плоского диффузора в плане, γ — угол подрезки задней кромки веерного отверстия.

веерного отверстия обеспечивается «подрезкой» выходной кромки отверстия на угол γ (рис. 1б, 1с).

Диффузорность веерного отверстия помимо снижения скорости вдува дополнительно формирует более широкие струи пленки в пояске отверстий, а диффузорность веерного отверстия в продольно-вертикальном сечении (γ_1, γ_2) дополнительно снижает опасность возникновения отрывных явлений при вдуве воздушных струй из отверстия в основной поток путем уменьшения угла вдува α .

Эффективность пленочного охлаждения записывается в виде

$$\eta_{\text{пл}} = (T_{\text{осн}}^* - T_{\text{пл}}^*) / (T_{\text{осн}}^* - T_{\text{вт}}^*),$$

где $T_{\text{осн}}^*$ и $T_{\text{вт}}^*$ — температуры основного и вторичного потоков в сечении вдува, $T_{\text{пл}}^*$ — температура пленки (адиабатной температуры стенки). При анализе результатов исследований с поясками веерных и цилиндрических отверстий параметр $\eta_{\text{пл}}$ обозначим соответственно как $\eta_{\text{всеп}}$ и $\eta_{\text{цил}}$.

Для случая охлаждения стенки горячим газом с внутренним конвективным охлаждением плотность теплового потока записывается в виде

$$q_{\text{г}} = \alpha_{\text{г}} (T_{\text{г}}^* - T_{\text{ст}}),$$

где $\alpha_{\text{г}}$ — коэффициент теплоотдачи от горячего газа к конвективно охлаждаемой стенке, $T_{\text{ст}}$ — температура стенки.

В условиях тепловой завесы тепловой поток рассчитывается по формуле

$$q_{\text{пл}} = \alpha_{\text{пл}} (T_{\text{пл}}^* - T_{\text{ст}}),$$

где $\alpha_{\text{пл}}$ — коэффициент теплоотдачи от пленки к охлаждаемой стенке.

Проблема исследования эффективности тепловых завес, создаваемых веерными отверстиями, не ограничивается только изучением охлаждения турбинных лопаток. Подобного рода задачи решаются, например, в противообледенительных системах крыла и для других поверхностей летательных аппаратов. Кроме этого, существуют и направления фундаментальных исследований в механике жидкости и газа, где тоже необходимы надежные экспериментальные данные для верификации соответствующих математических моделей. Таким образом, для расчета температурного состояния охлаждаемых конвективно-пленочным способом поверхностей актуальным является надежное определение температуры пленки $T_{\text{пл}}^*$. В связи с этим эффективность тепловой завесы исследуется в фундаментальной постановке и в рамках технических приложений, обусловленных, например, необходимостью разработки эффективных и экономичных конвективно-пленочных систем воздушного охлаждения лопаток газовых турбин [8].

В настоящей работе используются следующие параметры пленочного охлаждения поверхности: число Рейнольдса, определенное по параметрам воздуха, вдуваемого в основную поток, и по эквивалентной высоте щели:

$$Re_{BT} = W_{BT} S_{ЭКВ} / \nu_{BT},$$

параметр вдува

$$m = (\rho_{BT} W_{BT}) / (\rho_{ОСН} W_{ОСН}),$$

угол вдува α . Здесь $W_{ОСН}$ и W_{BT} — среднерасходные скорости основного и вторичного (вдуваемого) потоков, $\rho_{ОСН}$ и ρ_{BT} — плотность основного и вторичного потоков, $S_{ЭКВ}$ — эквивалентная высота щели пояска отверстий, ν_{BT} — кинематический коэффициент вязкости вторичного потока воздуха.

Отметим, что при обработке опытных данных исследования систем пленочного охлаждения формулы для расчета чисел Рейнольдса могут базироваться на параметрах вторичного или основного потоков (см., например, [3]). В данной работе принят первый подход.

1. Экспериментальное оборудование и методика выполнения исследований

Схема экспериментальной установки для сравнительного исследования эффективности тепловой завесы на плоской поверхности в турбулентном потоке при вдуве воздуха через веерные и цилиндрические (базовые) отверстия изображена на рис. 2. Данная установка включает в себя рабочий участок, систему подачи основного и вторичного потоков воздуха и систему измерений. В установке реализовано обратное (по сравнению с натурными условиями) направление теплового потока. При проведении экспериментов и анализе полученных результатов применялся метод относительного соответствия [22].

Воздух в установку поступал от двух центробежных компрессоров: от ТВ 2–80.1.8 — для основного потока и от поршневого компрессора СО-7Б — для организации вторичного потока воздуха.

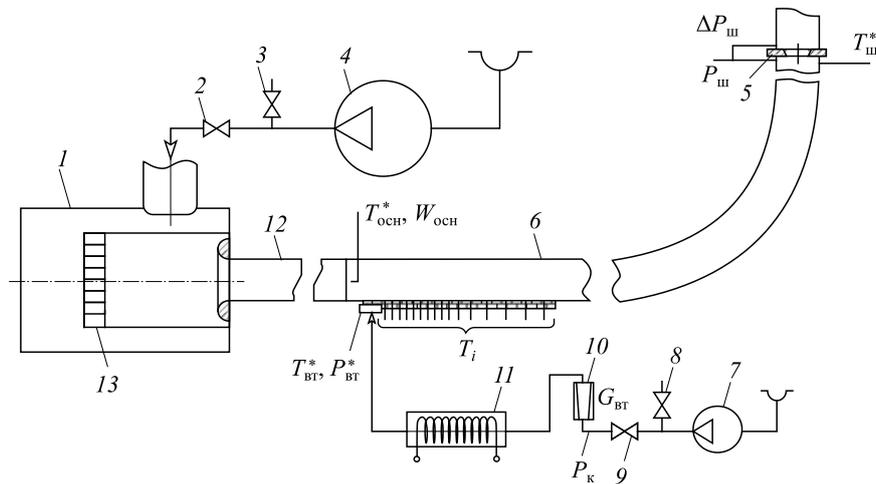


Рис. 2. Экспериментальная установка для сравнительного исследования эффективности тепловой завесы на плоской поверхности.

$P_{ш}$ и $\Delta P_{ш}$ — давление воздуха перед расходомерной шайбой и перепад давления на ней, верхний индекс «*» характеризует параметры торможения потока воздуха, нижний индекс «к» характеризует давление воздуха перед магистральным краном 9, G_{BT} — расход воздуха.

Описание схемы см. в тексте.

Автономное электропитание позволяло независимо регулировать расходы основного и вторичного потоков. Основной поток воздуха, нагнетаемый центробежным компрессором 4 (рис. 2), поступал через систему перепускной 3 и дроссельной 2 заслонки в ресивер 1 с хонейкомбом 13, обеспечивающим равномерное поле скоростей потока. После этого поток проходил предвключенный участок с плавным входом 12, откуда попадал в рабочий участок 6. Далее он проходил через диафрагменный расходомер (расходомерную шайбу) 5 и сбрасывался в атмосферу. Расход основного воздуха регулировался изменением частоты вращения ротора компрессора ТВ 2 – 80.1.8 и заслонкой перепуска. Поток вторичного воздуха генерировался поршневым компрессором 7, проходил через систему перепускной 8 и магистрального 9 кранов и через расходомерное устройство (ротаметр) 10. После этого он нагревался в электрическом нагревателе 11 и вдувался через поясик отверстий в рабочий участок 6. Расход вторичного воздуха регулировался магистральным краном 9 и краном перепуска 8. Электрический нагреватель обеспечивал требуемую разность температур между основным и вторичным потоками, которая составляла 300 К.

Рабочий участок представлял собой плоский канал с размерами поперечного сечения 140 мм × 100 мм и длиной 1000 мм. Нижняя его стенка была выполнена из текстолита для обеспечения условий теплоизоляции. В ней заподлицо с поверхностью была установлена адиабатная пластина из асбоцемента для исследования эффективности тепловой завесы $\eta_{пл}$. На верхней стенке рабочего участка закреплялся координатник 2 с комбинированным датчиком статического давления P , полного давления P^* и полной температуры T^* . Плоская адиабатная пластина имела следующие размеры: длина — 410 мм, ширина — 100 мм, толщина — 15 мм. Со стороны воздушного тракта канала она препарировалась вдоль продольной плоскости симметрии шестнадцатью хромель-алюмелевыми термопарами. Спаи асбоцементной пластины были установлены в гнезда с натягом, сфрезерованы до полусферы заподлицо с поверхностью и заполированы. Термопарные провода типа хромель-алюмель диаметром 0,2 мм отводились от места замера температур на боковые поверхности пластины. На участке от сечения вдува до середины длины пластины спаи термопар расположены чаще, так как здесь происходит более интенсивное изменение температуры по поверхности в продольном направлении. Перед пластиной, также заподлицо с обтекаемой поверхностью, размещался подвижный сменный текстолитовый вкладыш с расположенными в один ряд отверстиями различной формы для вдува воздуха в основной поток.

В качестве примера на рис. 3 приведены схемы двух текстолитовых вкладышей — с цилиндрическими и веерными отверстиями — для угла вдува $\alpha = 30^\circ$. В каждом вкладыше выполнено по пять отверстий диаметром 5 мм в ряду с шагом для цилиндрических отверстий 10 мм, для веерных — 12 мм. В установке предусмотрена возможность перемещения вкладыша ходовым винтом в поперечном направлении, что обеспечивает измерение параметров потока и адиабатной температуры стенки в двумерной постановке. Распределение значений $\eta_{всеп}$ поперек основного потока представлено на рис. 4.

Среднее значение эффективности охлаждения в поперечном направлении для шести точек, расположенных на участке между двумя отверстиями, было получено осреднением его локальных значений по формуле

$$\bar{\eta}_{пл} = \sum_{i=1}^n \eta_{пл i} / n.$$

Степень турбулентности набегающего потока Tu измерялась в сечении вдува ($x/d = 0$) и составляла в ядре потока 3÷5 % в зависимости от числа $Re_{осн}$. Толщина вытеснения рассчитывалась по профилю скорости, также измеренному в сечении вдува, и составляла $\delta^*/\delta \approx 0,26$. Значение безразмерной длины подводящего канала основного потока после

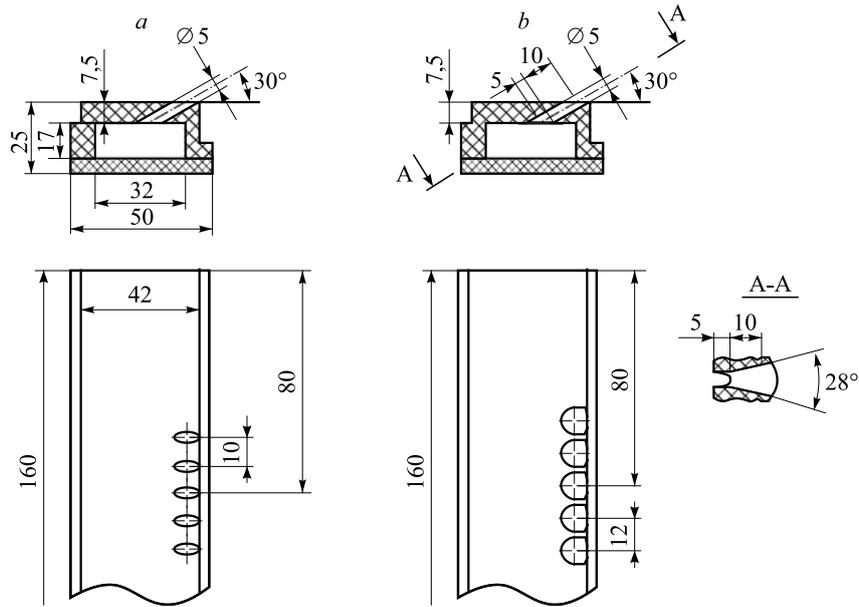


Рис. 3. Схемы текстолитовых вкладышей с углом вдува $\alpha = 30^\circ$.
 a и b — вкладыши с цилиндрическими и веерными отверстиями соответственно.

выхода из ресивера $L/D_{\text{эвк}} = 10$, безразмерная длина подводящего канала вторичного потока $L_{\text{цил}}/d = 1$.

Основные результаты оценки степени неопределенности полученных экспериментальных данных представлены в таблице.

2. Результаты исследования и обсуждение

Рассмотрены особенности пленочного охлаждения поверхности при малых и больших параметрах вдува, достигающих значений $m = 5$. Проанализированы возможности использования веерных отверстий при больших углах вдува (75°).

Опыты проводились в диапазоне изменения числа Рейнольдса $Re_{\text{вт}} = (4 \div 76 \cdot 10^3)$, угол вдува α принимал значения 30, 45 и 75° , угол полураствора диффузорной части веерного отверстия

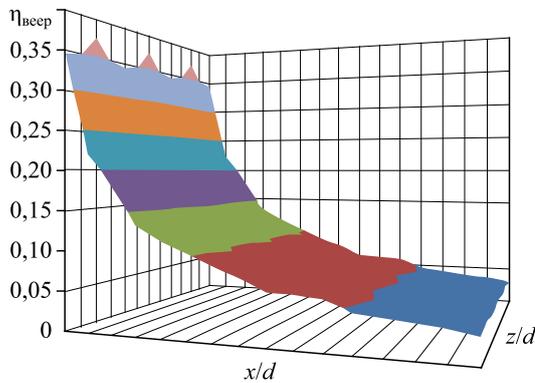


Рис. 4. Распределение локальной эффективности пленочного охлаждения при угле вдува $\alpha = 45^\circ$, параметре вдува $m = 0,5$, числе Рейнольдса $Re_{\text{вт}} = 4000$.

Таблица

| Параметры | Доверительная вероятность | Доверительный интервал, % |
|---|---------------------------|---------------------------|
| Скорость потока W | 0,95 | $\pm 0,67$ |
| Число Рейнольдса Re | 0,95 | $\pm 3,2$ |
| Эффективность пленочного охлаждения η | 0,95 | $\pm 8,2$ |
| Температуры: $T_{\text{осц}}^*$, $T_{\text{вт}}^*$, $T_{\text{пл}}^*$ | 0,95 | $\pm 3,9$ |

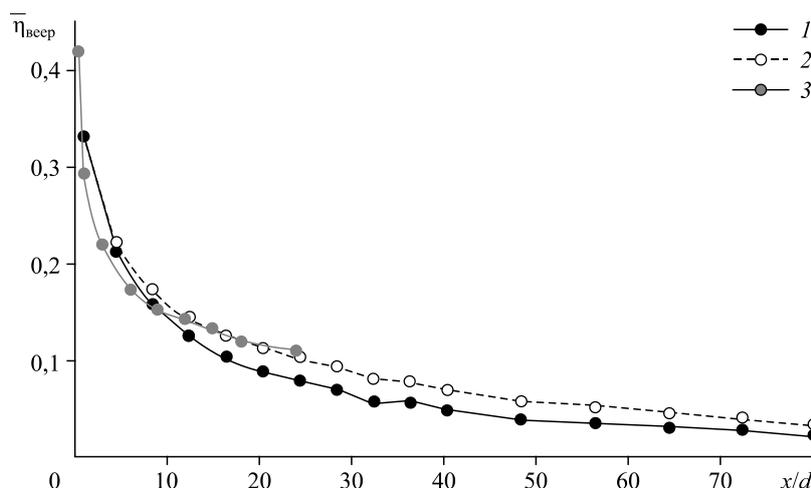


Рис. 5. Результаты тестовых экспериментов: осреднение по ширине канала (z/d) местных значений $\bar{\eta}_{\text{всеп}}$ пояaska всерных отверстий

и их сопоставление с опытными данными [16].

Данные тестовых экспериментов при $m = 0,42$ (1), $0,64$ (2) и данные работы [16] для $m = 0,5$ (3).

в плане составлял $\varphi = 14^\circ$, относительный шаг отверстий в ряду для $\alpha = 30, 45^\circ$ составлял $t/d = 2$, а для $\alpha = 75^\circ$ — $t/d = 3$.

В ходе сравнительных исследований установлены геометрические и режимные параметры, при которых всерные отверстия обеспечивают более высокую эффективность пленочного охлаждения, нежели цилиндрические при прочих равных условиях. Тестирование экспериментальной установки для сравнительного исследования эффективности пленочного охлаждения в плоском прямоугольном канале проводилось по опытными данным, опубликованным в работе [16] (см. рис. 5), в диапазоне изменения относительного расстояния от сечения вдува $x/d = 1 \div 24$. Как видно, распределения осредненных вдоль пояaska перфораций опытных значений эффективности пленочного охлаждения $\bar{\eta}_{\text{всеп}}$ вполне удовлетворительно соответствует опытными данным [16].

2.1. Вдув через цилиндрические и всерные отверстия под углом $\alpha = 30^\circ$

Перейдем к сравнительному анализу опытных данных по эффективности пленочного охлаждения, полученных на плоской пластине при угле вдува $\alpha = 30^\circ$ через цилиндрические и всерные отверстия. Представим тепловую завесу, развивающуюся в направлении основного потока, условно двумя участками: начальным и основным. Первый из них отсчитывается от сечения вдува и характеризуется отрывными явлениями различной интенсивности в зависимости от значений угла, параметра вдува и характера взаимодействия основного и вторичного потоков в условиях образования парных почкообразных крупномасштабных вихрей. Наиболее значимо эти явления проявляются при вдуве воздуха через цилиндрические отверстия. Всерные отверстия в виду указанных выше причин имеют на начальном участке значительно менее интенсивные процессы смешения этих потоков и более равномерное распределение $\eta_{\text{пл}}$ в поперечном потоке направлении. На основном участке смешения, следующем за начальным, происходит выравнивание полей скорости и температуры пристенного течения со снижением интенсивности турбулентности и вихревых структур.

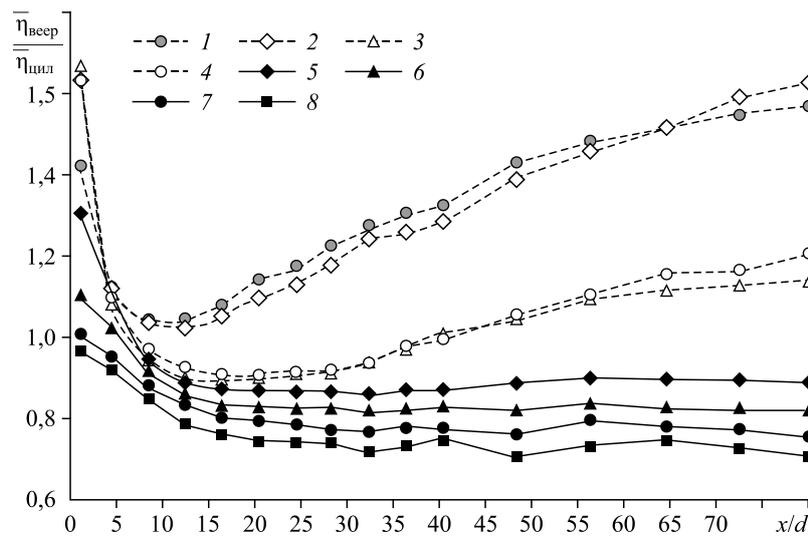


Рис. 6. Относительные значения эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ при вдуве воздуха через веерные и цилиндрические отверстия с $\alpha = 30^\circ$.
 $t/d = 2, \varphi = 14^\circ, \text{Re}_{\text{вт}} = 4 \div 76 \cdot 10^3$;
 $m = 5,5$ (1), $4,5$ (2), 3 (3), $2,5$ (4), $1,5$ (5), 1 (6), $0,7$ (7), $0,5$ (8).

На рис. 6 представлены относительные значения эффективности пленочного охлаждения $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ для угла вдува $\alpha = 30^\circ$, различных значений параметра вдува m и относительного расстояния x/d от сечения вдува. На начальном участке смешения $0 < x/d < (10 \div 15)$ при оптимальном значении параметра вдува $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ снижается от 1 до 0,8. При высоких параметрах вдува ($m = 4,5 \div 5,5$) характер зависимости $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}} = f(x/d)$ сохраняется таким же, как и при $m \approx 0,5$ снижаясь по ходу основного потока от 1,65 до 1,05. На основном участке смешения $10 \div 15 < x/d < 80$ при $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ стабилизируется на уровне значений $0,7 \div 0,8$. Однако на основном участке смешения при высоких параметрах вдува ($m = 4,5 \div 5,5$) характер этой зависимости качественно меняется. Так, начиная со значений $x/d \approx 10 \div 15$, и вплоть до $x/d \approx 80$, значения относительной эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ возрастают примерно по линейной зависимости от 1,05 до 1,6.

Увеличение относительных значений $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ при высоких параметрах вдува на основном участке смешения связано с неодинаковой интенсивностью процессов смешения вдуваемого из веерных и цилиндрических отверстий воздуха с основным его потоком. В случае вдува через цилиндрические отверстия почкообразный парный вихрь значительно более интенсивен, чем за веерными отверстиями [8]. В результате более медленного снижения вниз по потоку величины $\bar{\eta}_{\text{всер}}$ по сравнению со значением $\bar{\eta}_{\text{цил}}$ на графике значения $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ вниз по потоку при $m = 4,5 \div 5,5$ возрастают.

Важно отметить, что при параметре вдува $m \leq 1$ и значении угла вдува $\alpha = 30^\circ$ поры веерных отверстий не имеют преимуществ по эффективности пленочного охлаждения перед цилиндрическими аналогами на всем протяжении тепловой завесы. Причина заключается, во-первых, в отсутствии отрывных явлений за цилиндрическими отверстиями, а во-вторых, в ухудшении защитных свойств воздушной завесы за веерными отверстиями вследствие пониженных значений скорости вторичного потока.

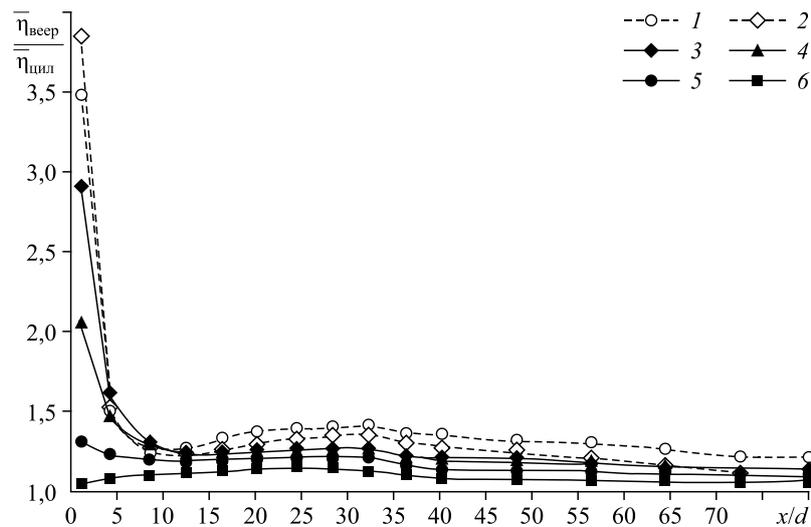


Рис. 7. Относительные значения эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве воздуха через веерные и цилиндрические отверстия с $\alpha = 45^\circ$.

$t/d = 2$, $\varphi = 14^\circ$, $Re_{вт} = 7 \div 48 \cdot 10^3$; $m = 3,5$ (1), 2,5 (2), 1,5 (3), 1 (4), 0,7 (5), 0,5 (6).

Как было указано выше, при очень больших параметрах вдува ($m = 4,5 \div 5,5$) на участке тепловой завесы $15 \leq x/d \leq 80$ установлено преимущество поясков веерных отверстий над цилиндрическими. Однако это преимущество незначительно, поскольку абсолютные численные значения $\bar{\eta}_{вееp}$ на большом удалении от сечения вдува не превышают 0,1.

2.2. Вдув через цилиндрические и веерные отверстия под углом 45°

При вдуве воздуха под углом $\alpha = 45^\circ$ зависимость $\bar{\eta}_{вееp} / \bar{\eta}_{цилл} = f(x/d)$ демонстрирует однозначное преимущество веерных отверстий над цилиндрическими (см. рис. 7). Как следует из этого рисунка, на начальном участке смещения $0 < x/d < 10$ при оптимальном значении параметра вдува $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{вееp} / \bar{\eta}_{цилл}$ изменяется в пределах $1,1 \div 1,2$. При высоком значении параметра вдува ($m = 3,5$) величина $\bar{\eta}_{вееp} / \bar{\eta}_{цилл}$ составляет около 3,9. На основном участке смещения $10 < x/d < 80$ при оптимальном значении параметра вдува $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{вееp} / \bar{\eta}_{цилл}$ изменяется так же, как и на начальном участке — в пределах $1,1 \div 1,2$. При высоких параметрах вдува ($m = 3,5$) значение $\bar{\eta}_{вееp} / \bar{\eta}_{цилл} \approx 1,25 \div 1,4$.

Выполненный сравнительный анализ вдува воздуха из веерных и цилиндрических отверстий показал, что, как и следовало ожидать, при увеличении угла вдува с 30° до 45° отрывные явления, связанные с почкообразными парными вихревыми структурами за сечением вдува, интенсифицируются за цилиндрическими отверстиями на более высоком уровне, нежели за веерными отверстиями. Полученные результаты подтверждают, что по эффективности тепловой завесы при больших параметрах вдува m и значении угла вдува $\alpha = 45^\circ$ веерные отверстия при прочих равных условиях имеют преимущество над цилиндрическими отверстиями как на начальном, так и на основном участках смещения.

В результате сравнительных экспериментальных исследований эффективности тепловой завесы для варианта вдува $\alpha = 45^\circ$ авторами предложена схема подрезки выходной кромки веерного отверстия, позволяющая получить наиболее высокую эффективность тепловой завесы вдувом воздуха через веерные отверстия.

2.3. Вдув через цилиндрические и веерные отверстия под углом 75°

Известно, что в области входной кромки турбинной лопатки углы вдува охлаждающего воздуха в поток горячего газа могут достигать больших значений. Применительно к этому участку охлаждаемой поверхности турбинной лопатки рассмотрена эффективность тепловой завесы при значении угла вдува $\alpha = 75^\circ$.

Формирование воздушной завесы при вдуве вторичного потока воздуха под большими углами однозначно приводит к развитию отрыву струи, что подтверждается многочисленными исследованиями (см., например, [4]). Эффективность тепловой завесы в рассматриваемом случае может быть повышена за счет применения веерных отверстий двумерной диффузорности (рис. 1с). Для случая $\alpha = 75^\circ$ степень диффузорности отверстия для вдува воздуха в основной поток обеспечивается не только расширением отверстия в плане, но и в вертикальном продольном сечении, что увеличивает суммарную степень диффузорности веерного отверстия. На рис. 8 приведены схемы выходных сечений в плане отверстий различной формы: цилиндрической, веерной с плоским диффузором в плане и веерной с двумерной диффузорностью веерного отверстия.

Результаты экспериментов показали (см. рис. 9), что на начальном участке смешения $0 < x/d < 10$ при оптимальном значении параметра вдува $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{веер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ изменяется в диапазоне $1,4 \div 1,5$. При высоких параметрах вдува ($m = 1,5 \div 3,5$) за цилиндрическими отверстиями происходит отрыв вдуваемого потока воздуха. Веерные отверстия в определенной мере позволяют сохранить защитные свойства пленки: величина $\bar{\eta}_{\text{веер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ при $x/d = 1$ достигает значений $3 \div 4$. Ввиду образования мощных отрывных течений на основном участке смешения ($x/d > 10$) экспериментальные точки зависи-

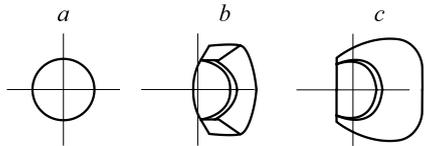


Рис. 8. Выходные сечения в плане отверстий различной формы: цилиндрической (а), веерной с одномерной диффузорностью (b), веерной с двумерной диффузорностью (с).

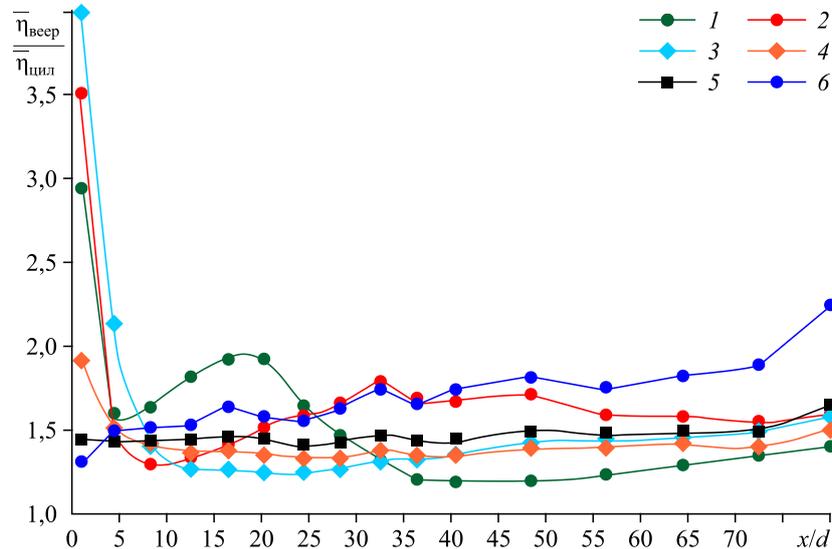


Рис. 9. Относительные значения эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве воздуха через веерные и цилиндрические отверстия с $\alpha = 75^\circ$.

$t/d = 3$, $\varphi = 14^\circ$, $Re_{\text{вт}} = 6 \div 52 \cdot 10^3$; $m = 3,5$ (1), $2,5$ (2), $1,5$ (3), $0,7$ (4), $0,5$ (5), $0,35$ (6).

мости $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}} = f(x/d)$ имеют значительный разброс по всей длине тепловой завесы $10 < x/d < 80$ в пределах значений $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ от 1,3 до 1,8. Особенности локального изменения относительного значения $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ при $m = 3,5$ на участке $x/d = 5 \div 35$ требует дополнительных исследований.

Сравнительные эксперименты показали, что при угле вдува $\alpha = 75^\circ$ веерные отверстия двумерной диффузорности (схема на рис. 8с) могут быть успешно использованы с целью повышения эффективности тепловых завес при больших параметрах вдува.

Заключение

Выполненное экспериментальное исследование позволило в широком диапазоне изменения угла и параметра вдува установить области режимов приоритетного использования веерных отверстий вместо цилиндрических аналогов для повышения эффективности тепловой завесы плоской поверхности. Сформулируем кратко их описание.

1. Получено, что при вдуве воздуха под углом 30° на начальном участке смешения $0 < x/d < 10 \div 15$ при оптимальном значении параметра вдува $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ снижается от 1 до 0,8. При высоких значениях параметра вдува ($m = 2,5 \div 5$) веерные отверстия имеют преимущество над цилиндрическими аналогами. При параметрах вдува $m = 4,5 \div 5,5$ характер зависимости $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}} = f(x/d)$ сохраняется таким же, как и при $m \approx 0,5$, снижаясь по ходу основного потока от 1,65 до 1,05.

2. На основном участке смешения $10 \div 15 < x/d < 80$ при вдуве воздуха под углом 30° и оптимальном параметре вдува $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ стабилизируется на уровне значений $0,7 \div 0,8$. В то же время на основном участке смешения при высоких параметрах вдува ($m = 4,5 \div 5,5$) характер этой зависимости качественно меняется. Так, начиная с относительного расстояния от сечения вдува $x/d \approx 10 \div 15$ и вплоть до $x/d \approx 80$ значения относительной эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ возрастают примерно по линейной зависимости от 1,05 до 1,6.

3. При $x/d = 30 \div 80$ сравнительно высокие значения относительной эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ представляют незначительный практический интерес, поскольку абсолютные численные значения $\bar{\eta}_{\text{всер}}$ на большом удалении от сечения вдува не превышают значений 0,1.

4. При оптимальных параметрах вдува $m \approx 0,5$ под углом $\alpha = 30^\circ$ веерные отверстия уступают цилиндрическим аналогам на всем протяжении тепловой завесы по причине ухудшения защитных свойств воздушной завесы вследствие пониженных значений скорости вторичного потока воздуха.

5. При вдуве воздуха под углом $\alpha = 45^\circ$ на начальном участке смешения $0 < x/d < 10$ при оптимальном значении параметра вдува $m \approx 0,5$ значение $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ изменяется в пределах $1,1 \div 1,2$. При высоком значении параметра вдува ($m = 3,5$) величина $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ составляет около 3,9.

6. На основном участке смешения $10 < x/d < 80$ при оптимальном значении параметра вдува $m \approx 0,5$ величина $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}}$ изменяется так же, как и на начальном участке — в пределах $1,1 \div 1,2$. При высоких параметрах вдува ($m = 3,5$) значение $\bar{\eta}_{\text{всер}}/\bar{\eta}_{\text{цил}} \approx 1,25 \div 1,4$.

7. Установлено, что в условиях высоких параметров вдува ($m = 1 \div 3,5$) через поясок веерных отверстий под углом $\alpha = 45^\circ$ эффективность тепловой завесы при прочих равных условиях выше, чем при вдуве через цилиндрические отверстия на всем протяжении тепловой завесы ($x/d = 1 \div 80$).

8. При угле вдува $\alpha = 75^\circ$ осредненные по длине пояaska отверстий значения $\bar{\eta}_{\text{всеп}}$ выше чем $\bar{\eta}_{\text{цил}}$ во всем диапазоне изменения параметра вдува, включая и области отрыва вдуваемого в основной поток вторичного воздуха. При этом угле вдува всерные отверстия двумерной диффузорности рекомендуются в области значений параметра вдува $m < 3,5$.

Список литературы

1. Бакулев В.И., Голубев В.А., Крылов Б.А., Сосунов В.А. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / Под ред. В.А. Сосунова, В.М. Чепкина. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МАИ, 2003. 687 с.
2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. Т. 2. 368 с.
3. Локай В.И., Бодунов М.Н., Жуйков В.В., Щукин А.В. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей / Под ред. В.И. Локай. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 288 с.
4. Чжэн Д., Ван С., Юань Ц. Численное исследование влияния формы вихрегенератора на эффективность пленочного охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 491–496.
5. Леонтьев А.И., Волчков Э.П., Коротеев А.А., Кузм-Кичта Ю.А., Дзюбенко Б.В., Драгунов Ю.Г. и др. Вихревые технологии для энергетики. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 350 с.
6. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках / Под ред. В.И. Терехова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 247 с.
7. Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Varanov P.A., Gulcova M.E. Numerical simulation of the turbulent air flow in the narrow channel with a heated wall and a spherical dimple placed on it for vortex heat transfer enhancement depending on the dimple depth // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 94. P. 426–448.
8. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Резник С.Б. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Киев: НТУУ «КПИ», Изд-во «Политехника», 2016. Т. 10: Перспективные схемы пленочного охлаждения. 238 с.
9. Тихонов А.С., Самохвалов Н.Ю. Анализ использования профилированных отверстий перфорации для повышения качества пленочного охлаждения спинки сопловых лопаток турбин // Вестн. Уфимского гос. авиационного техн. ун-та. 2012. Т. 16, № 5. С. 20–27.
10. Pat. 5683600 US. Gas turbine engine component with compound cooling holes and method for making the same. Kelley J.G., Rockstroh T.J.; filed on 17.03.1993; published 04.11.1997. 7 p.
11. Несгеренко В.Г., Матушкин А.А. Конструктивные методы совершенствования системы пленочного охлаждения рабочих лопаток ВРД // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 39. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=14813> (дата обращения: 23.03.2021).
12. Пахонов М.А., Терехов В.И., Халатов А.А., Борисов И.И. Тепловая эффективность пристенной газовой завесы при ее вдуве через круглые отверстия в траншее // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 343–352.
13. Colban W.F., Thole K.A., Bogard D. A film cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface // J. of Turbomachinery. 2011. Vol. 133, No. 1. P. 011002-1–011002-11.
14. Kampe T., Sämel S., Völker S., Haneka C., Ladisch H., Schulz A., Bauer H.J. Experimental and numerical investigation of flow field and downstream surface temperatures of cylindrical and diffuser shaped film cooling holes // Proceeding of ASME Turbo Expo. 2011. GT2011-45106.
15. Laveau B., Abhari R.S. Influence of flow structure on shaped hole film cooling performance // ASME Paper. 2010. GT2010-23032.
16. Wright L.M., McClain S.T. PIV investigation of the effect of freestream turbulence intensity on film cooling from fanshaped holes // Proceedings of ASME Turbo Expo. 2011. GT2011-46127.
17. Виноградов К.А. Повышение эффективности газовой турбины путем структурно-параметрической оптимизации обводов переходного канала и формы отверстий пленочного охлаждения / дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2015. 168 с.
18. Li X.C., Subbuswamy G., Zhou J. Performance of gas turbine film cooling with backward injection // Energy and Power Engng. 2013. No. 5. P. 132–137.
19. Saumveber C., Schulz A., Wittig S. Free-stream turbulence effects on film cooling with shaped holes // J. of Turbomachinery. 2003. Vol. 125, No. 1. P. 65–73.
20. Bunker R.S. A review of turbine shaped film-cooling technology // J. of Heat Transfer. 2005. Vol. 127. P. 441–453.
21. Щукин А.В., Ильников А.В., Такмовцев В.В., Ильникова Т.А., Хабибуллин И.И. и др. Теплофизика рабочих процессов в охлаждаемых лопатках газовых турбин / Под общ. ред. А.В. Щукина. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 392 с.
22. Мотулевич В.П. Метод относительного соответствия и его применение в задачах тепло- и массообмена // Инж.-физ. журн. 1968. Т. 14, № 1. С. 8–16.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2021 г.,
после доработки — 28 июня 2021 г.,
принята к публикации 30 июля 2021 г.