ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСКОРЯЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ ПРИ ВДУВЕ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ВЕЕРНЫЕ ОТВЕРСТИЯ¹

© 2022 г. Е. Ю. Марчуков^{*a*}, А. В. Стародумов^{*a*}, А. В. Ильинков^{*b*}, А. В. Щукин^{*b*}, *, А. М. Ермаков^{*b*}, В. В. Такмовцев^{*b*}, **, И. А. Попов^{*b*}

^аОпытно-конструкторское бюро им. А. Люльки, ул. Касаткина, д. 13, Москва, 129301 Россия ^bКазанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111 Россия

> *e-mail: a.v.shchukin@rambler.ru **e-mail: vvt379@rambler.ru Поступила в редакцию 24.06.2021 г. После доработки 28.08.2021 г. Принята к публикации 22.09.2021 г.

В ускоряющемся потоке эффективность пленочного охлаждения вдувом воздуха через цилиндрические отверстия на начальном участке смешения возрастает по сравнению с безградиентным потоком. Связано это с уменьшением расстояния между вдуваемыми через отверстия струями воздуха и охлаждаемой стенкой. При удалении от сечения вдува эффективность охлаждения при вдуве через цилиндрические отверстия снижается по сравнению с безградиентным потоком. Причина состоит в интенсификации вращения крупномасштабных парных вихревых структур, называемых почкообразными вихрями. Сравнительные экспериментальные исследования эффективности пленочного охлаждения при влуве воздуха через веерные и цилиндрические отверстия в ускоряющемся потоке показали, что для обоих типов отверстий на начальном и основном участках смешения существуют различные механизмы взаимодействия вторичного и основного потоков. В проведенных экспериментах однорядные пояски обоих типов отверстий имели по пять отверстий в ряду. Для сравнительного анализа относительной эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве через веерные и цилиндрические отверстия использовали безразмерный комплекс эффективности пленочного охлаждения в ускоряющемся потоке. При углах вдува вторичного воздуха в основной поток $\alpha = 30^\circ$, 45° и 75° ускорение основного потока неодинаково влияет на относительное значение эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности $\overline{\eta}$ при вдуве через веерные и цилиндрические отверстия в условиях оптимальных (m = 0.5) и высоких (m = 2.5) параметров вдува воздуха. Так, на начальном участке смешения для m = 0.5 значение $\overline{\overline{\eta}}$ при $\alpha = 30^{\circ}$ составляет 0.3, но практически не влияет на нее при $\alpha = 45^{\circ}$ и 75°. Для m = 2.5 значения \overline{n} при $\alpha = 30^{\circ}$. 45° и 75° составляют, соответственно 1.35, 1.15 и 2.15. На основном участке смешения для m = 0.5 по мере увеличения угла вдува значение \overline{n} возрастает (1.0, 1.15 и 1.6), а для m = 2.5 снижается по сравнению с безградиентным значением от 1.6 при $\alpha = 30^{\circ}$ до 0.72–0.82 при $\alpha = 45^{\circ}$ и 75°.

Ключевые слова: физический эксперимент, пленочное охлаждение поверхности, поясок отверстий, цилиндрические и веерные отверстия, параметр вдува, угол вдува, ускорение потока **DOI:** 10.1134/S0040363622040038

Одно из важнейших направлений разработки и совершенствования газотурбинных установок (ГТУ) в теплоэнергетике связано с ростом температуры газа перед турбиной, обеспечивающим улучшение ее удельных параметров [1]. В связи с этим возникает проблема повышения эффективности охлаждения горячих деталей ГТУ воздухом при условии его экономного расходования. Поэтому при современном уровне температур газа перед турбиной, достигающих 2000 К, требуется использование рационально спроектированных систем конвективно-пленочного охлаждения участков газового тракта ГТУ, наиболее нагруженных по

¹ Иследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по соглашению 075-03-2020-051-3.

теплу [2, 3]. Для этого, во-первых, необходимо обосновать применение схем эффективных интенсификаторов конвективного охлаждения [2–5], позволяющих отвести тепло от профиля лопатки турбины еще до использования пленочного охлаждения, во-вторых, применить на профильной части турбинных лопаток такие пояски перфораций, которые наряду с обеспечением высокой эффективности пленочного охлаждения позволяют снизить дополнительные газодинамические потери от охлаждения.

В последние десятилетия интенсивно исследуются и разрабатываются методы расчета и проектирования систем пленочного охлаждения турбинных лопаток с поясками профилированных отверстий [6, 7]. Отсутствие аддитивности процессов воздействия массовых сил и продольного градиента давления осложняет изучение конвективного тепломассообмена в тепловых завесах [3]. Поэтому для понимания механизма взаимодействия между основным и вторичным (вдуваемым) потоками на поверхности профиля турбинной лопатки и разработки методов его расчета необходимо исследовать воздействующие факторы раздельно.

Продольный отрицательный градиент давления (ускорение потока) обеспечивает в проточной части газовой турбины один из важнейших рабочих процессов — преобразование потенциальной энергии горячего сжатого газа в кинетическую энергию высокоскоростного потока. Выполненный в работе [3] сравнительный анализ публикаций о влиянии ускорения основного потока на эффективность пленочного охлаждения поверхности с помощью воздуха, вдуваемого (далее вдув) через цилиндрические отверстия, свидетельствует о существенных различиях в представленных в этом обзоре результатах. Связано это с особенностями взаимодействия вдуваемого воздуха и основного потока за сечением вдува.

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Пленочное охлаждение поверхности характеризуют следующие основные параметры:

угол вдува вторичного воздуха в основной поток α (далее угол вдува), т.е. угол между осью отверстия для вдува и ее проекцией на охлаждаемую поверхность;

число Рейнольдса, определяемое параметрами вторичного потока воздуха,

$$\operatorname{Re}_{\rm BT} = W_{\rm BT} S_{\rm 3KB} / v_{\rm BT},$$

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 4 2022

где $W_{\rm BT}$ — среднерасходная скорость вторичного потока; $v_{\rm BT}$ — кинематический коэффициент вязкости вдуваемого воздуха; $S_{\rm экв}$ — эквивалентная условная высота щели для вдува вторичного воздуха, которую рассчитывают как отношение суммарной площади отверстий в пояске, деленной на его длину;

параметр вдува воздуха *т* (далее параметр вдува)

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

где $\rho_{\rm BT},\,\rho_{\rm och}-$ плотность вторичного и основного потоков; $W_{\rm och}-$ среднерасходная скорость основного потока;

число Рейнольдса, определяемое параметрами основного потока,

$$\operatorname{Re}_{\operatorname{och}} = W_{\operatorname{och}} D_{\operatorname{skB}} / v_{\operatorname{och}},$$

где $D_{_{3KB}} = F/\Pi$ — эквивалентный диаметр проточной части опытного участка (здесь *F* — площадь поперечного сечения проточной части участка; Π — его периметр).

Эффективность пленочного охлаждения η_{nn} может быть рассчитана по формуле

$$\eta_{\Pi\Pi} = \left(T_{\text{och}}^* - T_{\Pi\Pi}^*\right) / \left(T_{\text{och}}^* - T_{\text{bt}}^*\right),$$

где $T_{\text{осн}}^*$, $T_{\text{вт}}^*$, $T_{\text{пл}}^*$ – температуры торможения основного и вторичного потоков в сечении вдува и пленки.

При использовании пояска отверстий для вдува воздуха дискретная эффективность пленочного охлаждения заменяется на среднюю $\overline{\eta}_{nn}$, которую вычисляют по формуле

$$\overline{\eta}_{n\pi} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \eta_{n\pi i}}{n},$$

где n – количество точек замера $T_{пл}^*$.

При анализе результатов исследований параметр $\overline{\eta}_{nn}$ выражают в виде $\overline{\eta}_{веер}$ для веерных и $\overline{\eta}_{цил}$ для цилиндрических отверстий.

При $\alpha = 30^{\circ}$, m = 0.35 - 1.20 и параметре ускорения потока $K = 2.62 \times 10^{-6}$ на начальном участке смешения при вдуве воздуха через цилиндрические отверстия ускорение основного потока (увеличение его скорости) способствует повышению значения $\eta_{\pi\pi}$ по сравнению с безградиентным потоком [8]. Это связано с приближением струй вторичного воздуха к обтекаемой поверхности, а также с повышением равномерности распределения пленки охладителя поперек основного потока. Выражение для параметра ускорения потока имеет следующий вид:

$$K = \frac{v_{\rm och}}{W_{\rm och}^2} \frac{\mathrm{d}W_{\rm och}}{\mathrm{d}x},$$

где *х* – продольная координата.

При $K = 2 \times 10^{-6}$ и вдуве воздуха под углом $\alpha = 45^{\circ}$ [9] на начальном участке смешения ускорение основного потока приводит к более медленному переходу ламинарного режима течения в турбулентный и ухудшает поперечное (вдоль оси *z*) распределение значений η_{nn} по сравнению с безградиентным течением.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ЗАВЕСЫ

Из публикаций [8–10] следует, что ускорение основного потока приводит к уменьшению продольных размеров области отрыва струи воздуха от охлаждаемой стенки после его вдува через цилиндрические отверстия в основной поток. Вследствие этого происходит более раннее присоединение вдуваемого воздуха к основному потоку, что приводит к увеличению эффективности тепловой завесы по сравнению с безградиентным потоком. На основном участке смешения по данным [11] из-за ускорения потока эффективность пленочного охлаждения снижается.

Различие в распределении эффективности тепловой завесы за поясками веерных и цилиндрических отверстий во многом предопределено возникновением и развитием парных почкообразных вихревых структур. Наиболее характерные картины образования этих вихрей за цилиндрическими отверстиями наблюдаются при небольших углах вдува ($\alpha = 30^\circ$). На рис. 1 показана упрощенная схема образования почкообразного крупномасштабного парного вихря [12].

Многочисленные эксперименты свидетельствуют о том, что за цилиндрическими отверстиями эти вихри значительно более интенсивны, нежели за веерными отверстиями. Причина заключается в том, что поток воздуха, вдуваемого через веерные отверстия, имеет существенно меньшую кинетическую энергию, нежели при вдуве через цилиндрические отверстия. Эти почкообразные парные вихри образуются при перемещении воздуха в струе в непосредственной близости от поверхности стенки. В этом случае между струей и стенкой образуется разрежение, провоцирующее подсасывание (эжектирование) основного потока рабочего тела за счет кинетической энергии вдуваемых через отверстия струй.

Очевидно, что подобные вихревые структуры значительно снижают эффективность тепловых завес. Существенное уменьшение значения η_{nn} с увеличением параметра вдува при использовании цилиндрических отверстий объясняется интенсивным перемешиванием воздуха с потоком горячего газа на удалении от охлаждаемой стенки. В связи с этим в определенных режимах работы системы охлаждения более привлекательными являются пояски веерных отверстий.

В [13] рассмотрены результаты исследований эффективности тепловой завесы при вдуве воздуха как через веерные, так и через цилиндрические отверстия, расположенные на спинке рабочей лопатки одноступенчатой турбины. Представленные в этой статье результаты экспериментов показали, что по сравнению с цилиндрическими аналогами поясок веерных отверстий имеет лучшие



Рис. 1. Схема образования почкообразного парного вихря при вдуве воздуха в основной поток через наклонное цилиндрическое отверстие [12]

характеристики пленочного охлаждения в большинстве исследованных режимов. Авторы статьи [14] выполнили многоцелевую численную оптимизацию веерного отверстия пленочного охлаждения на выпуклой поверхности лопатки турбины.

В опубликованных источниках имеются различные, нередко противоречивые сведения о влиянии ускорения основного потока на эффективность пленочного охлаждения стенки с помощью вдува воздуха через традиционные цилиндрические отверстия [8-14]. Поэтому вопрос сравнительного опытного исследования эффективности тепловых завес в ускоряющемся потоке является актуальным и находится на стадии накопления опытных данных в целях построения физических моделей и выработки рекомендаций по расчету и проектированию систем конвективно-пленочного охлаждения с помощью вдува через веерные отверстия. Такие тепловые завесы могут быть полезными не только для охлаждаемых турбинных лопаток. Подобного рода устройства представляют интерес, например, для противообледенительных систем крыла и других поверхностей летательных аппаратов, где производится вдув горячего воздуха в холодный основной поток. Кроме этого, в фундаментальных исследованиях при математическом моделировании происходящих в системах пленочного охлажления процессах также необходимы экспериментальные данные для верификации соответствующих математических моделей. В связи с этим для расчета температурного состояния охлаждаемых конвективно-пленочным способом поверхностей и других задач актуальной является надежность определения температуры пленки.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования эффективности тепловой завесы при воздействии ускоряющегося потока были выполнены на опытном участке, схема которого показана на рис. 2. В качестве рабочего тела основного и вторичного потоков использовали воздух.

К верхней стенке канала *I* прямоугольного поперечного сечения прикреплена вставка *2*, ширина которой равна ширине канала. В продольном сечении вставка представляет собой конфузорный участок для ускорения основного потока. Площадь проходного сечения конфузорного участка *3* канала *I* уменьшается в направлении движения ускоряющегося основного потока. Размеры поперечного сечения на входе в конфузор составляют 140 × 100 мм, на выходе из него 140 × 20 мм. Среднерасходная скорость основного потока в выходном сечении конфузора равна 225 м/с, температура – около 300 К. Электрический нагреватель позволяет обеспечить температурный фактор $T_{\rm вт}^*/T_{\rm осн}^* \approx 2.0$.

Энергетические мощности экспериментальной базы часто не позволяют обеспечить требуемое значение $T_{\rm \tiny BT}^*/T_{\rm och}^*$ для выдерживания условий физического моделирования исследуемых процессов в проточной части турбины, особенно турбины высокого давления. Эти проблемы не один десяток лет решаются использованием "обратного" направления теплового потока, когда в холодный основной поток вдувается горячий вторичный поток воздуха. В системах охлаждения газотурбин-





I — экспериментальный канал с основным потоком; 2 — вставка для ускорения потока; 3 — конфузорный участок канала; 4 — экспериментальная пластина с термопарами для измерения температуры пленки $T^*_{\Pi \Pi I}$; 5 — вкладыш для вдува воздуха на поверхность пластины; $p^*_{\text{осн}}$, $p_{\text{осн}}$ — полное и статическое давление основного потока на входе в экспериментальный участок; p^*_i , p_i — полное и статическое давление основного потока в сечении вдува

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 4 2022



Рис. 3. Схемы цилиндрических (*a*) и веерных (*б*) отверстий. *d* = 5 мм – диаметр отверстия; *t*_{цил} = 10 мм, *t*_{веер} = 12 мм – шаг между цилиндрическими и веерными отверстиями

ного двигателя $T_{\rm BT}^*/T_{\rm och}^* \approx 0.5$, при моделировании процессов с тепловым потоком "обратного" направления $T_{\rm BT}^*/T_{\rm och}^* > 1.0$ [15].

Экспериментальная асбоцементная пластина 4 длиной 410 мм, шириной 100 мм и толщиной 15 мм для определения адиабатной температуры стенки $T^*_{\rm ag.cr}$ (температуры пленки $T^*_{\rm nn}$) установлена заподлицо с нижней рабочей поверхностью стенки канала 1 непосредственно за размещенным поперек канала вкладышем 5 с пояском из пяти отверстий. Спаи термопар типа хромель-алюмель диаметром 0.2 мм установлены на продольной плоскости асбоцементной пластины 4 с шагом 20 мм от сечения вдува до середины пластины и далее с шагом 40 мм. Более мелкий шаг на начальном участке обусловлен повышенной интенсивностью изменения температуры на поверхности пластины в продольном направлении по ходу движения основного потока. Адиабатная температура стенки измеряется в 16 точках за сечением вдува.

Схемы цилиндрических и веерных отверстий, выполненных во вкладышах 5, показаны на рис. 3.

Экспериментальное сравнительное исследование эффективности тепловой завесы при вдуве через веерные и цилиндрические отверстия в условиях ускорения основного потока было проведено с использованием параметра ускорения, характерного для межлопаточного канала сопловой турбинной решетки, $K \approx 6.0 \times 10^{-6}$. Варьируемыми параметрами в эксперименте являлись $\text{Re}_{\text{осн}} = (3-15) \times 10^5$, $\alpha = 30^\circ$, 45° и 75° , m = 0.5-3.0.

Информация по гидродинамическим процессам, происходящим в веерных отверстиях при вдуве через них воздуха на охлаждаемую поверхность, приведена в [1] и других работах. Эти процессы позволяют снизить значения параметра вдува *m* к сечению вдува (x/d = 0) по длине отверстия до оптимальных. Для достижения этой цели передние по ходу охлаждающего воздуха участки отверстия были выполнены в виде цилиндра (см. рис. 3), следующие участки отверстия — в виде плоского диффузора. Диффузор имеет такое соотношение площадей выходного и входного поперечных сечений канала, чтобы обеспечить в выходном сечении отверстия скорость охлаждающего воздуха, близкую к оптимальной.

Нужно иметь в виду, что при m = 2.0 и выше в веерном отверстии возникает такой же, как и в цилиндрическом отверстии, почкообразный вихрь, особенности которого рассмотрены ранее. Причина его образования состоит в неустойчивости пристенного течения на участке расширяющейся части отверстия. Эта крупномасштабная вихревая структура при m = 2.0 имеет примерно такую же интенсивность, какую имеет цилиндрическое отверстие при m = 1.0.

Щелевой канал на выходе из диффузорного участка веерного отверстия формирует тонкую, расширяющуюся по ходу потока пленку охладителя [1]. Такая форма выходного участка отверстия предохраняет вдуваемый через веерное отверстие в газовый поток воздух от образования отрывных течений у поверхности охлаждаемой стенки и этим способствует повышению эффективности пленочного охлаждения поверхности.



Рис. 4. Тестирование экспериментальной установки с использованием осредненных по ширине канала (x/d) значений $\overline{\eta}_{\text{веер}}$ по опытным данным [16].

m: 1 - 0.42; 2 - 0.64; 3 - 0.51

При вычислении параметра ускорения потока использовали следующие выражения для скорости основного потока:

во входном сечении в опытный участок

$$W_{\rm och} = \sqrt{\frac{2\left(p_{\rm och}^* - p_{\rm och}\right)}{\rho_{\rm och}}};$$

в сечении вдува

$$W_{\rm och} = \sqrt{\frac{2\left(p_i^* - p_i\right)}{\rho_{\rm och}}}$$

в выходном сечении конфузорного канала W_{κ}

$$W_{\rm k} = W_{\rm och} \frac{F_{\rm och}}{F_{\rm k}},$$

где $F_{\text{осн}}$, $F_{\text{к}}$ — площадь поперечного сечения во входном сечении рабочего участка и на выходе из конфузора.

Для сравнительного анализа относительной эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве через веерные $\overline{\eta}_{вееp}$ и цилиндрические $\overline{\eta}_{цил}$ отверстия в ускоряющемся потоке использовали безразмерный комплекс $\overline{\overline{\eta}}$

$$\overline{\overline{\eta}} = \left[\left(\overline{\eta}_{\text{Beep}} / \overline{\eta}_{\text{цил}} \right)_{dp/dx < 0} \right] / \left[\left(\overline{\eta}_{\text{Beep}} / \overline{\eta}_{\text{цил}} \right)_{dp/dx = 0} \right]$$

В этом комплексе числитель определяется по относительным значениям $(\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}})_{dp/dx<0}$ в условиях ускоряющегося основного потока, а знаменатель — по тем же параметрам, но в безградиентном потоке $(\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}})_{dp/dx=0}$ (базовый вариант).

Поскольку при проведении экспериментов не было установлено влияние числа Re_{осн} на результаты исследований, далее представлены опытные данные, полученные при $\text{Re}_{\text{осн}} = 3.0 \times 10^5$.

Данные по эффективности пленочного охлаждения, определенные на экспериментальном участке, хорошо согласуются с результатами при x/d = 1-24, опубликованными в [16] (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что распределение осредненных вдоль пояска отверстий опытных значений эффективности пленочного охлаждения $\overline{\eta}_{\text{всер}}$ удовлетворительно согласуется с опытными данными [16]. Повышению достоверности получаемых результатов в экспериментальном исследовании авторов способствовал метод относительного соответствия [17]. Для этого в настоящей статье все экспериментальные данные представляются в относительном виде ($\overline{\eta}_{\text{всер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$) при соблюдении идентичности условий проведения эксперимента для поясков веерных и цилиндрических отверстий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При щелевом тангенциальном вдуве в основной поток гидродинамику и распределение адиабатной температуры стенки за сечением вдува традиционно анализируют на начальном, переходном и основном участках смешения [15]. При анализе распределения значений эффективности тепловой завесы за сечением вдува $\eta_{nn} = f(x/d)$ через отверстия с углами вдува 30° и более рассматриваются только начальный и основной участки.

Начальный участок смешения отсчитывается от сечения вдува и характеризуется отрывными явлениями различной интенсивности. При угле вдува 30° и выше образующиеся во вдуваемой воздушной

струе крупномасштабные вихревые структуры способствуют отрыву вдуваемого потока воздуха от защищаемой стенки. В зависимости от значений параметров α , *m* и характера взаимодействия основного и вторичного потоков возникают условия для образования парных почкообразных крупномасштабных вихрей. Наиболее значимо эти процессы проявляются при вдуве воздуха через цилиндрические отверстия. При применении веерных отверстий на начальном участке происходят существенно менее интенсивные процессы смешения потоков и образования почкообразных вихрей, а также более равномерное распределение значений $\eta_{nл}$ в поперечном потоку направлении.

На основном участке смешения, следующем за начальным, происходит выравнивание полей скорости и температуры пристенного течения со снижением интенсивности турбулентности и вихревых структур. Здесь, по сравнению с начальным участком, интенсивность уменьшения значений $\eta_{пл}$ по мере увеличения x/d существенно снижается.

Результаты проведенных экспериментов показали, что при $\alpha = 30-75^{\circ}$ отрицательный градиент давления неоднозначно влияет на относительные значения эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве через веерные отверстия при оптимальных (m = 0.5) и высоких (m = 2.5) параметрах вдува.

На рис. 5 показана зависимость относительного значения эффективности тепловой завесы от относительного расстояния x/d в ускоряющемся потоке. Протяженность начального участка смешения при $\alpha = 30^{\circ}$ составляет x/d = 0-8.4. Данные экспериментов на рис. 5, а показывают, что при параметрах вдува, близких к оптимальным ($m \approx 0.5$), в условиях ускоряющегося основного потока поясок веерных отверстий на всем протяжении исследованной тепловой завесы 1.4 < x/d < 40.4 не имеет преимуществ по эффективности охлаждения над пояском цилиндрических отверстий. Действительно, на начальном участке смешения (при 1.4 < x/d < 8.4) значение $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ находится в интервале 0.15-0.45. Это происходит вследствие ухудшения защитных свойств тепловой завесы, образующейся при вдуве через веерные отверстия, при пониженной скорости воздуха, вдуваемого в основной поток.

При проведении эксперимента авторами статьи в безградиентном основном потоке при m = 0.5-1.0 и 1.0 < x/d < 8.4 значение $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ составило 1.0-1.3, а ниже по потоку $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}} \approx 0.7-0.8$ при 8.4 < x/d < 40.4.

При высоких параметрах вдува (m = 2.8) на начальном участке смешения наблюдается бо-

лее высокая относительная эффективность охлаждения при вдуве через веерные отверстия $(\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}} \approx 1.4-1.8)$, что связано с отрывными явлениями за сечением вдува у цилиндрических отверстий, снижающими значение $\eta_{\text{цил}}$. Причем при воздействии отрицательного продольного градиента давления отрыв от плоской поверхности вдуваемых струй через цилиндрические отверстия затягивается. Так, при m = 2.8 и $\alpha = 30^{\circ}$ отрыв перемещается из точки x/d = 1.4 (dp/dx = 0, в статье не приведено) в точку x/d = 4.4 (dp/dx < 0, $K = 6.0 \times 10^{-6}$, см. рис. 5, *a*). На основном участке смешения (x/d = 8.4-40.4) значение $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ составляет 1.55.

Таким образом, при высоких параметрах вдува (m = 2.8) и $\alpha = 30^{\circ}$ наблюдается стабильное полуторакратное превышение эффективности тепловой завесы, образующейся при вдуве через веерные отверстия, по сравнению с цилиндрическими аналогами. Причины этого — последействие отрывных явлений за пояском с цилиндрическими отверстиями и интенсификация почкообразных вихрей в этой области в ускоряющемся основном потоке. Оба этих фактора снижают значение $\eta_{цил}$.

Как следует из [3], при $\alpha = 30^{\circ}$ в условиях ускорения основного потока при вдуве через цилиндрические отверстия эффективность тепловой завесы на начальном участке смешения возрастает по сравнению с безградиентным обтеканием охлаждаемой стенки примерно в 1.1-1.7 раза. Это связано с тем, что ускоряющийся поток содействует приближению вдуваемой через цилиндрическое отверстие струи воздуха к охлаждаемой стенке. Кроме этого, по данным [3] на начальном участке развития тепловой завесы в условиях отрицательного градиента давления происходит подавление процессов отрыва от охлаждаемой поверхности струй вдуваемого через цилиндрические отверстия воздуха. Согласно сказанному выше, при небольших значениях т пояски веерных отверстий уступают по эффективности пленочного охлаждения пояскам цилиндрических отверстий.

При высоких значениях *m* (1.5–2.8) эффективность тепловой завесы за веерными отверстиями, как и при безградиентном обтекании пластины, превышает эффективность охлаждения при вдуве через цилиндрические отверстия, за которыми на пленку оказывают разрушительное воздействие почкообразные вихри.

Для вдува под углом $\alpha = 45^{\circ}$ протяженность начального участка составляет x/d = 1.4 - 12.4 и x/d = 1.4 - 16.4 при $\alpha = 75^{\circ}$. Детальный анализ результатов сравнительного исследования эффективности



Рис. 5. Относительная эффективность тепловой завесы $\overline{\eta}_{\text{всер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ в ускоряющемся потоке при $\alpha = 30^{\circ}$ (*a*), $\alpha = 45^{\circ}$ (*b*), $\alpha = 75^{\circ}$ (*b*). *m*: *1*-0.5; *2*-0.7; *3*-1.0; *4*-1.5; *5*-2.8; *6*-3.0; 7-2.5

тепловой завесы для $\alpha = 45^{\circ}$ и 75° показал следующее.

При $\alpha = 45^{\circ}$ (см. рис. 5, δ) и оптимальном параметре вдува m = 0.5 на всем протяжении тепловой завесы $\overline{\eta}_{\text{всер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}} = 1.1-1.4$. При высоких параметрах вдува (m = 3.0) значение $\overline{\eta}_{\text{всер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ изменяется от 4.1 до 1.5.

При $\alpha = 75^{\circ}$ (см. рис. 5, *в*) на начальном участке смешения (x/d = 1.4-16.4) при оптимальном параметре вдува m = 0.5 значение $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ равно 1.2–1.8 и $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}} = 3.5–1.25$ при m = 2.5. На основном участке смешения (x/d = 16.4-40.4) относительные значения $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ составляют соответственно 1.2–2.75 при m = 0.5 и 1.25–1.35 при m = 2.5.

Более наглядно результаты сравнения эффективности тепловой завесы поясков веерных и цилиндрических отверстий в условиях ускоряюще-



Рис. 6. Зависимость $\overline{\eta}$ от угла вдува α при $K = 6.0 \times 10^{-6}$ в ускоряющемся потоке на начальном (*a*) и основном (*b*) участке смешения при m = 0.5 (*1*) и m = 2.5 (*2*)

гося основного потока для всех испытанных значений углов вдува воздуха в основной поток показаны на рис. 6. На этом рисунке опытные данные представлены в виде более общего безразмерного комплекса $\overline{\eta}$, характеризующего относительную эффективность пленочного охлаждения при вдуве через веерные отверстия по сравнению с относительной эффективностью тепловой завесы $\overline{\eta}_{вееp}/\overline{\eta}_{иил}$, показанной на рис. 5.

Приведенные на рис. 6 зависимости позволяют по данным, осредненным на начальном и основном участках, более наглядно представить полученные результаты и оценить тенденции и характер изменения относительных значений эффективности тепловой завесы в условиях отрицательного градиента давления основного потока.

Важно отметить, что начальный участок смешения в тепловой завесе как объект исследования более привлекателен, нежели основной участок, вследствие высокого значения η_{пл}.

Как следует из рис. 6, *a*, на начальном участке смешения (x/d = 1.4-8.4) при оптимальном для цилиндрических отверстий параметре вдува m = 0.5 безразмерный комплекс $\overline{\eta}$ при углах вдува 30°, 45° и 75° имеет численные значения, практически не

превышающие единицу: 0.3, 1.1 и 0.9 соответственно. Получается, что при больших углах вдува ($\alpha = 45^{\circ}$ и 75°) на начальном участке смешения влияние ускорения основного потока почти не изменяет относительного значения эффективности тепловой завесы. Однако при $\alpha = 30^{\circ}$ значение $\overline{\overline{\eta}}$ становится примерно в 3 раза меньше, чем в условиях безградиентного течения, где $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}} \approx 0.9$. Это дополнительное снижение относительной эффективности охлаждения $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ в ускоряющемся основном потоке объясняется результатами исследований в работе [3], где показано, что при $\alpha = 30^{\circ}$ ускорение основного потока способствует приближению вдуваемой через цилиндрические отверстия струи воздуха к защищаемой поверхности и повышению значения η_{шил}. Следствием этого является снижение значения $\overline{\overline{\eta}}$. Это свидетельствует о том, что для $\alpha = 30^{\circ}$ ускорение основного потока дополнительно к эффектам безградиентного течения понижает эффективность тепловой завесы вдувом через веерные отверстия по сравнению с цилиндрическими.

При высоких параметрах вдува (m = 2.5) на начальном участке смешения безразмерный комплекс $\overline{\eta}$ при $\alpha = 30^{\circ}$, 45° и 75° равен 1.35, 1.15 и 2.15 (см. рис. 6, δ). Отсюда следует, что в этой области тепловой завесы при высоких параметрах вдува и исследованных углах вдува применение пояска веерных отверстий в ускоряющемся основном потоке дополнительно повышает эффективность тепловой завесы по сравнению с цилиндрическими вариантами.

При вдуве через цилиндрические отверстия происходит дополнительное увеличение за сечением вдува интенсивности парных почкообразных вихревых структур, что уменьшает значение η_{иил}.

Как было указано ранее, сопоставление эффективности тепловой завесы при вдуве через веерные и цилиндрические отверстия в виде относительных значений $\overline{\eta}_{вееp}/\overline{\eta}_{цил}$ на основном участке смешения не следует переоценивать, поскольку их абсолютные значения невелики. При x/d = 8.4-41.8 и оптимальном для цилиндрических отверстий параметре вдува m = 0.5 зависимость $\overline{\overline{\eta}} = f(\alpha)$ показывает, что при $\alpha = 30$, 45 и 75° безразмерный комплекс $\overline{\overline{\eta}}$ равен 1.0, 1.15 и 1.6 соответственно (см. рис. 6, δ).

Видно, что в условиях влияния ускорения основного потока с увеличением угла вдува происходит повышение положительного эффекта от использования пояска веерных отверстий. Повидимому, как это указано в [3], на основном участке смешения при $\alpha = 45^{\circ}$ и 75° сказывается провоцируемая ускорением потока дополнительная интенсификация почкообразных вихрей при вдуве воздуха через цилиндрические отверстия, что снижает значение $\eta_{\text{цил}}$. Кроме этого, дополнительный положительный эффект повышения $\overline{\eta}_{\text{веер}}/\overline{\eta}_{\text{цил}}$ может возникнуть и от подрезки выходной кромки веерных отверстий при $\alpha = 75^{\circ}$, снижающей фактический угол вдува воздуха через веерное отверстие до 50°.

При высоком параметре вдува (m = 2.5) на основном участке смешения значение $\overline{\eta}$ составляет 1.62, 0.72 и 0.82 соответственно при $\alpha = 30^{\circ}$, 45° и 75°. Можно полагать, что при $\alpha = 30^{\circ}$ более чем полуторакратное превышение эффективности тепловой завесы $\overline{\eta}$ при вдуве через веерные отверстия связано с тем, что при вдуве через цилиндрические отверстия увеличивается влияние почкообразного вихря [3].

выводы

1. Различие в эффективности пленочного охлаждения плоской поверхности при вдуве воздуха через веерные и цилиндрические отверстия на начальном и основном участках смешения при различных углах вдува в ускоряющийся основной поток обусловлено неодинаковыми механизмами взаимодействия потоков на этих участках.

2. На начальном участке смешения при оптимальном для цилиндрических отверстий параметре вдува, равном 0.5, и угле вдува 30° эффективность пленочного охлаждения стенки при использовании веерных отверстий дополнительно снижается примерно в 3 раза в сравнении с безградиентным потоком.

3. При углах вдува 45° и 75° и параметре вдува 0.5 воздействие ускорения основного потока на начальном участке смешения при исследованном значении параметра ускорения $K \approx 6.0 \times 10^{-6}$ практически не изменяет относительного значения эффективности пленочного охлаждения по сравнению со стандартным.

4. При высоком параметре вдува, равном 2.5, наблюдается преимущество в относительном значении эффективности тепловой завесы при вдуве через веерные отверстия по сравнению с цилиндрическими отверстиями.

5. На основном участке смешения при оптимальном параметре вдува 0.5 ускорение основного потока приводит, по мере увеличения угла вдува от 30° до 75°, к повышению значения относительной эффективности (комплекса $\overline{\eta}$) от 1.0 до 1.5.

6. При высоких параметрах вдува более чем полуторакратное увеличение $\overline{\overline{\eta}}$ по сравнению с

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 4 2022

безградиентным основным потоком наблюдается только при угле вдува 30°, при более высоких углах вдува оно составляет примерно 0.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Теория**, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В.И. Бакулев, В.А. Голубев, Б.А. Крылов, Е.Ю. Марчуков, Ю.Н. Нечаев, И.И. Онищик; под ред. В.А. Сосунова, В.М. Чепкина. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МАИ, 2003.
- 2. Викулин А.В., Ярославцев Н.Л., Земляная В.А. Исследование транспирационного охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин // Теплоэнергетика. 2019. № 6. С. 27–32. https://doi.org/10.1134/S0040363619060092
- Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 10: Перспективные схемы пленочного охлаждения / А.А. Халатов, И.И. Борисов, Ю.А. Дашевский, С.Б. Резник. Киев: Политехника, 2016.
- Теплофизика рабочих процессов в охлаждаемых лопатках газовых турбин / А.В. Шукин, А.В. Ильинков, В.В. Такмовцев, Т.А. Ильинкова, И.И. Хабибуллин. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020.
- Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков, Б.В. Дзюбенко, Ю.Г. Драгунов, С.А. Исаев, А.А. Коротеев, Ю.А. Кузьма-Кичта, И.А. Попов, В.И. Терехов; под общ. ред. акад. А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017.
- 6. Pat. US № 5683600. Gas turbine engine component with compound cooling holes and method for making the same / J.G. Kelley, T.J. Rockstroh. 04.11.1997. http://www.pat2pdf.org/patents/pat5683600.pdf.
- Pat. US № 8317473. Turbine blade with leading edge cooling / G. Liang. 23.09.2009. http://www.pat2pdf.org/patents/pat8317473.pdf
- Teekaram A.J.H., Forth C.J.P., Jones T.V. Film cooling in the presence of mainstream pressure gradients // J. Turbomachinery. 1991. V. 113. № 3. P. 484–492. https://doi.org/10.1115/1.2927900
- 9. Launder B.E., York J. Discrete-hole cooling in the presence of free stream turbulence and strong favourable pressure gradient // Int. J. Heat Mass Transfer. 1974. V. 17. № 11. P. 1403–1409. https://doi.org/10.1016/0017-9310(74)90141-0
- York W.D., Leylek J.H. Numerical prediction of mainstream pressure gradient effects in film cooling // Proc. of ASME Turbo Expo-1999. 99-GT-166. http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/
- Schmidt D.L., Bogard D.G. Pressure gradient effects on film cooling // Proc. of ASME Turbo Expo-1995. 95-GT-18. https://www.netl.doe.gov
- Heidmann J.D. A numerical study of anti-vortex film cooling designs at high blowing ratio // Proc. of ASME Turbo Expo-2008. GT2008-50845. https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings-abstract/ GT2008/43147/789/325750
- 13. **The characteristics** and divergence of fan-shaped and cylindrical holes on the suction side of a turbine blade

under rotating conditions / H. Li, G. Zhao, Z. Zhou, H. Wang, R. You // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 2. № 139. P. 432–441. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.045

- 14. Multi-objective optimization of laidback fan-shaped film cooling hole on turbine vane suction surface / Y. Huang, J.-Z. Zhang, C.-H. Wang, X.-D. Zhu // Heat Mass Transfer. 2019. V. 55. № 11. P. 1181–1194. https://doi.org/10.1007/s00231-018-2500-6
- Швец И.Т., Дыбан Е.П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. Киев: Наукова думка, 1974.
- Wright L.M., McClain S.T. PIV investigation of the effect of freestream turbulence intensity on film cooling from fanshaped holes // Proc. of ASME Turbo Expo-2011. GT2011-46127.
- Мотулевич В.П. Метод относительного соответствия и его применение в задачах тепло- и массообмена // ИФЖ. 1968. Т. 14. № 1. С. 8–16.

The Effectiveness of Film Cooling of a Flat Surface in an Accelerated Flow with Air Injection Through Fan-Shaped Holes

E. Yu. Marchukov^a, A. V. Starodumov^a, A. V. Il'inkov^b, A. V. Shchukin^{b, *},

A. M. Ermakov^b, V. V. Takmovtsev^b, **, and I. A. Popov^b ^a Lyulka Experimental Design Bureau, Moscow, 129301 Russia ^b Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan, 420111 Russia *e-mail: a.v.shchukin@rambler.ru **e-mail: vvt379@rambler.ru

Abstract—In an accelerating flow, the effectiveness of film cooling by injecting air through cylindrical holes at the initial mixing section increases in comparison with a zero-pressure-gradient flow. This is caused by a decrease in the separation of the air jets injected through the holes from the cooled wall. With distance from the injection section, the cooling effectiveness of coolant injection through cylindrical holes decreases in comparison with a zero-pressure-gradient flow. The cause is the enhancement of rotation of large-scale paired vortex structures called kidney vortices. Comparative experimental studies into the effectiveness of film cooling with air injection through fan-shaped or cylindrical holes in an accelerating flow have demonstrated that different mechanisms of interaction between the secondary and main flows exist in the entrance and main mixing sections in both cases. In the performed experiments, single-row belts of both types of holes had five holes in a row. A dimensionless complex of film-cooling effectiveness in an accelerating flow was used for a comparative analysis of the relative film-cooling effectiveness on a flat surface with injection through fan-shaped and cylindrical holes. At angles of secondary air injection into the main flow of $\alpha = 30^{\circ}$. 45°, and 75°, the acceleration of the main flow has a different effect on the relative value of the film-cooling effectiveness for a flat surface, $\overline{\overline{\eta}}$, with injection through fan-shaped or cylindrical holes at the best (m = 0.5) or high (m = 2.5) blowing ratio. Thus, for m = 0.5, the value of $\overline{\overline{\eta}}$ in the entrance mixing section at $\alpha = 30^{\circ}$ is 0.3, but the cooling effectiveness is hardly affected by it when $\alpha = 45^{\circ}$ and 75° . For m = 2.5, the values of $\overline{\eta}$ at $\alpha = 30^{\circ}$, 45°, and 75° are, respectively, 1.35, 1.15, and 2.15. In the main mixing section, for m = 0.5, the value of $\overline{\overline{n}}$ increases (1.0, 1.15, and 1.6) when the injection angle increases; for m = 2.5, it decreases in comparison to the zero-pressure-gradient value from 1.6 at $\alpha = 30^{\circ}$ to 0.72–0.82 at $\alpha = 45^{\circ}$ and 75°.

Keywords: physical experiment, surface film cooling, hole belt, cylindrical and fan-shaped holes, blowing ration, injection angle, flow acceleration