

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ЗАВЕСЫ ПРИ ВДУВЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУХА (ОБЗОР)¹

© 2023 г. А. В. Щукин^a, *, А. В. Ильинков^a, В. В. Такмовцев^a, **,
И. А. Попов^a, А. Л. Тукмаков^a, А. В. Стародумов^b

^aКазанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
ул. Карла Маркса, д. 10, г. Казань, 420111 Россия

^bМосковский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993 Россия

*e-mail: a.v.shchukin@rambler.ru

**e-mail: vvi379@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

Выполнен аналитический обзор научных публикаций, содержащих результаты физического и численного моделирования влияния пульсирующего режима течения охлаждающего воздуха на эффективность тепловой завесы η , главным образом, профильной части турбинных лопаток. Испытания, проведенные в условиях, близких к натурным, показали, что наблюдается как положительное и переменное, так и отрицательное воздействие пульсаций на показатель эффективности тепловой завесы. Получено, что положительное или отрицательное влияние наложенных на вдуваемый поток воздуха пульсаций обусловлено механизмами переноса в системе пленочного охлаждения, реализуемыми при отсутствии пульсаций. При этом веерные отверстия дают более высокую локальную эффективность тепловой завесы по сравнению с классическими цилиндрическими отверстиями не только в стационарном, но и в пульсирующем режиме вдува. В стационарном режиме это происходит при параметре вдува $m = 1.0$, а в пульсирующем режиме – при $m = 1.5$ и 2.0 . Причина заключается в более равномерном покрытии пленкой газовой смеси охлаждаемой поверхности за сечением пульсирующего вдува. Причем при $m = 1.5$ для отверстий обеих форм пульсирующий поток охладителя обеспечивает большее значение поперечно осредненной эффективности тепловой завесы η , чем стационарный вдуваемый поток. Рассмотренные в обзоре методы прогнозирования влияния вдува в пульсирующем режиме на значение η требуют только знаний о стационарном потоке и позволяют оценить, в каких случаях пульсации оказывают положительное, а в каких отрицательное воздействие на эффективность тепловой завесы.

Ключевые слова: лопатка турбины, эффективность тепловой завесы, пульсирующий поток, цилиндрические и веерные отверстия вдува, теплоотдача, параметр вдува, режимные и геометрические параметры

DOI: 10.56304/S0040363623090060

Более 30 лет в авиадвигателестроении успешно эксплуатируются системы подвода пульсирующего охлаждающего воздуха к рабочим лопаткам турбин высокого давления [1, 2]. По сравнению с широко распространенной схемой подачи охлаждающего воздуха к рабочим лопаткам по щелевому каналу между вращающимся диском и дефлектором, указанный вариант имеет значительно более сложную конструкцию. Однако эта конструкция обладает важными преимуществами, поскольку позволяет в большой степени повысить уровень хладозапаса воздуха, подаваемого в охлаждающие

каналы рабочих лопаток, и обеспечить пульсирующий режим его течения. Разработки в этом направлении ведутся во многих странах, например в США компанией Pratt and Whitney и General Electric, в Великобритании – Rolls-Royce, в Германии – MTU и Daimler-Benz Aerospace, во Франции – объединением Snecma.

Анализ публикаций показал, что определенные схемы интенсификаторов внутреннего охлаждения в каналах при наложении на поток охладителя пульсаций дополнительно увеличивают теплоотдачу по сравнению с режимом без пульсаций. Большое влияние пульсирующий вторичный поток воздуха оказывает и на эффективность тепловой завесы за сечением вдува, когда pulsa-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00207).

ции охлаждающего воздуха существенно изменяют механизм взаимодействия основного и вторичного потоков и их контакта с охлаждаемой поверхностью.

Эффективность тепловой завесы выражается формулой

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

где $T_{\text{осн}}^*$ и $T_{\text{вт}}^*$ – температура основного газового и вторичного воздушного потока в сечении вдува соответственно; $T_{\text{пл}}^*$ – температура пленки (адиабатическая температура теплоизолированной стенки).

В задачах с тепловыми завесами большое влияние на значения η оказывают параметр вдува m , угол вдува α и другие параметры:

параметр вдува

$$m = (\rho_{\text{вт}} w_{\text{вт}}) / (\rho_{\text{осн}} w_{\text{осн}}),$$

где $\rho_{\text{вт}}$, $\rho_{\text{осн}}$ – плотности вторичного и основного потоков; $w_{\text{вт}}$, $w_{\text{осн}}$ – среднерасходные скорости вторичного и основного потоков;

коэффициент теплоотдачи

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

где q – плотность теплового потока; $T_{\text{ст}}$ – температура внешней поверхности стенки лопатки;

число Рейнольдса, определенное по параметрам вторичного потока воздуха и эквивалентной площади щели,

$$\text{Re}_{\text{вт}} = w_{\text{вт}} S_{\text{экв}} / \nu_{\text{вт}},$$

где $S_{\text{экв}} = \sum F_i / l_p$; F_i – выходная площадь одного отверстия; l_p – длина ряда отверстий вдува; $\nu_{\text{вт}}$ – кинематический коэффициент вязкости вторичного потока охладителя;

температурный фактор

$$\theta = T_{\text{вт}}^* / T_{\text{осн}}^* ;$$

x/d – относительное расстояние от сечения вдува до точки измерения температуры пленки, где d – диаметр отверстия вдува;

число Струхала

$$\text{Sh} = \frac{fl}{w_{\text{вт}}},$$

где f – частота пульсаций; l – характерный линейный размер;

число Стэнтона

$$\text{St} = \frac{\alpha_{\text{пл}}}{c_p \rho_{\text{осн}} w_{\text{вт}}},$$

где c_p – удельная теплоемкость среды при постоянном давлении;

рабочий цикл пульсаций (в иностранной литературе обозначается как DC. – Прим. ред.) – отношение времени активной фазы (струи включены), затраченного на процесс вдува воздуха, к сумме времени активной и пассивной (струи отключены) фаз рабочего цикла;

параметр “чистого” снижения теплового потока (в иностранной литературе обозначается как NHFR. – Прим. ред.), представляющий собой комбинацию эффективности тепловой завесы η и коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{пл}}$.

Выполнив обзор результатов исследований влияния пульсирующего вдува на эффективность тепловой завесы и коэффициент теплоотдачи, можно сделать вывод, что они зависят от тех или иных режимов вдува пульсирующего вторичного потока в основной поток неодинаково. Выявлены положительные, переменные и отрицательные эффекты пульсирующего вдуваемого потока на значение η при различных режимных параметрах экспериментов и геометрических характеристиках установок. Так, например, при больших значениях параметра вдува m наблюдается положительное влияние пульсаций – происходит подавление отрывных явлений у охлаждаемой поверхности или самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур типа почкообразных парных вихрей в тепловой завесе за сечением вдува. При малых значениях m пульсации приводят к негативным последствиям – они разрушают образовавшуюся за сечением вдува пленку тепловой завесы.

На эффективность тепловой завесы влияют конфигурация отверстия для вдува (цилиндрическое, веерное) [3], режимные условия на входе в отверстие, параметр рабочих циклов пульсаций DC, форма сигнала рабочего цикла пульсаций (прямоугольный или синусоидальный), тип участка профиля турбинной лопатки (входная и выходная кромки, спинка, корытце), относительная длина отверстия и гидродинамика вдуваемого потока воздуха внутри отверстия, геометрические параметры ряда отверстий и др.

Варьируя режим пульсаций, можно расширить диапазон вариантов управляющего воздействия на поле температур рабочей лопатки путем использования не только положительных, но и отрицательных эффектов пульсаций как для внутреннего конвективного, так и для внешнего пленочного ее охлаждения.

Таким образом, с помощью комплекса управляющих режимных и геометрических параметров при заданном режиме пульсаций, общем для всех охлаждающих каналов, можно оптимизировать температурные поля и их градиенты по обводу профиля охлаждаемой рабочей лопатки турбины, выбрать управляющее воздействие с учетом имеющихся возможностей регулирования как его интенсивности, так и знака.

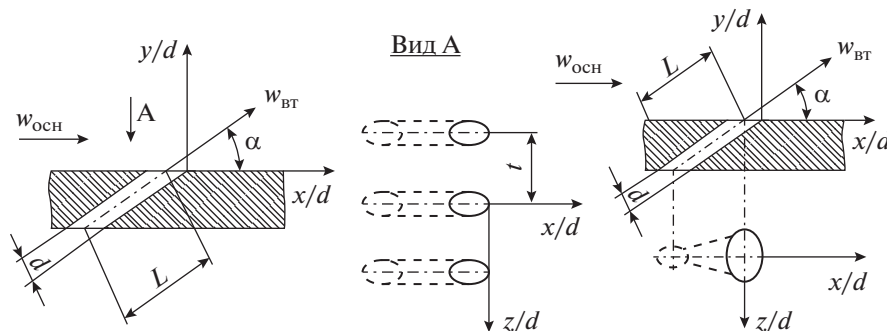


Рис. 1. Схема цилиндрических и веерных отверстий вдува для конвективно-пленочного охлаждения с основными обозначениями геометрических параметров. d , L – диаметр и длина отверстия; t , α – шаг между отверстиями в ряду и угол вдува

Анализ литературных источников [4–19] показал, что влияние пульсирующего вдува на η и $\alpha_{пл}$ исследовалось численно и экспериментально. Основные режимные и геометрические параметры в рассмотренных публикациях изменялись в следующих диапазонах: параметр вдува m от 0.25 до 2.50, угол вдува α равнялся 21.5, 30, 35 и 90° (рис. 1), частота пульсаций вдуваемого воздуха f составляла 5, 10 и 20 Гц; число Струхала Sh – от 0.004 до 1.0, рабочие циклы DC – от 25 до 100%, число Рейнольдса Re – от 25 000 до 60 000.

По ряду режимных параметров результаты исследований воздействия пульсирующего вдува на эффективность тепловой завесы и коэффициент теплоотдачи отсутствуют. Например, нет данных о влиянии на η и $\alpha_{пл}$ дискретности расположения отверстий в ряду, разных углов схода потока, низких значений (менее 0.25) параметра вдува, ускорения основного потока. Каждый из приведенных факторов снижает полноценность валидации программных пакетов, разрабатываемых для расчета, проектирования и оптимизации систем конвективно-пленочного охлаждения турбинных лопаток при пульсирующем режиме вдува охладителя.

ЭФФЕКТЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ВДУВА

Приведенный в статье обзор публикаций, в которых рассматриваются вопросы эффективности пульсирующего вдува в системах конвективно-пленочного охлаждения, дает возможность в

первом приближении обосновать принятые в инженерных теплогидравлических расчетах соответствующие поправочные коэффициенты и использовать представленные данные для верификации разрабатываемых расчетных моделей.

Положительный эффект пульсаций

Авторами работы [4] экспериментально исследовано влияние пульсаций струи охладителя, а также рабочего цикла и формы отверстий на эффективность тепловой завесы вдувом вторичного потока воздуха через отверстия на входной кромке модели турбинной лопатки. Рассмотрены цилиндрические и веерные отверстия, расположенные под углом вдува 21.5° к поверхности охлаждаемой стенки (рис. 2).

Осредненные по ширине канала значения $\bar{\eta}$ были определены на основе локальных значений для всех условий эксперимента при числе $Re = 60\,000$ и отношении плотностей основного и вторичного потоков, равном 1.11. Исследовались рабочие циклы при значениях $DC = 50, 75$ и 100% в непрерывном режиме работы. Частота пульсаций f струи охладителя составляла 5 и 10 Гц при параметрах вдува 0.75, 1.0, 1.5, 2.0. Рассматривались 40 различных комбинаций частоты пульсаций и рабочего цикла при одном и том же расходе охладителя для веерных и цилиндрических отверстий. В обоих случаях параметр вдува составлял $m = 1.5$.

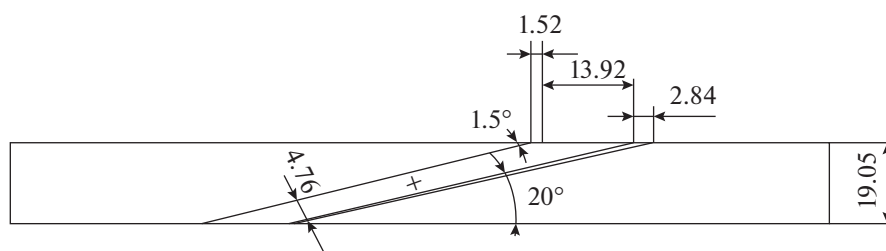


Рис. 2. Характеристики профилированного отверстия (размеры в миллиметрах) [4]

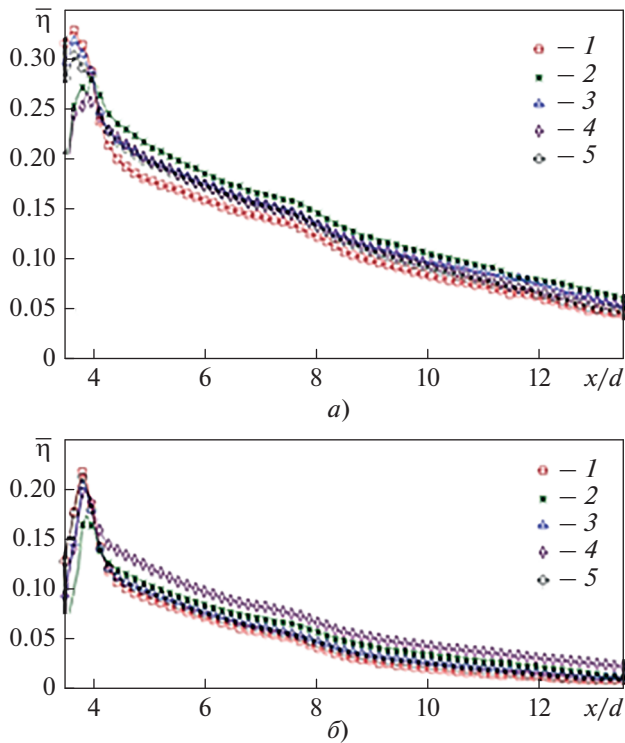


Рис. 3. Зависимость влияния частоты пульсаций охладителя f и рабочего цикла DC при параметре вдува $m = 1.5$ на поперечно осредненное распределение эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}$ для веерного (а) и цилиндрического (б) отверстия [4]. 1 – без пульсации; 2 – $f = 5$ Гц, DC = 50%; 3 – $f = 5$ Гц, DC = 75%; 4 – $f = 10$ Гц, DC = 50%; 5 – $f = 10$ Гц, DC = 75%

Как показали экспериментальные исследования [4], при стационарном вдуве веерные отверстия обеспечивают более высокую локальную эффективность тепловой завесы по сравнению с цилиндрическими отверстиями (рис. 3).

Высокая локальная эффективность веерных отверстий наблюдалась также и при пульсирующем вдуве с $m = 1.5$ и 2.0 из-за широкого растекания пленки (в направлении оси z). Пульсирующая струя охладителя эффективнее непрерывной на всей поверхности, за исключением небольшой области рядом с отверстием независимо от его геометрических размеров и параметра вдува (см. рис. 3). Веерные отверстия обеспечивают лучшее пленочное охлаждение, чем цилиндрические, при всех исследованных параметрах вдува [4]. Так, например, при вдуве с $m = 1.5$ через веерные отверстия с частотой пульсаций 5 Гц при $x/d = 5$ и DC = 50% значение η составило 0.22. При этих же параметрах, но при стационарном вдуве $\eta = 0.18$. Цилиндрические отверстия обеспечивают в этих условиях эффективность тепловой завесы 0.11 и 0.10 соответственно.

При $x/d = 6$ и прочих равных условиях при подаче охлаждающего воздуха через веерные отверстия $\eta = 0.18$ и 0.16, а через цилиндрические $\eta = 0.09$ и 0.06 соответственно.

В работе [5] путем прямого численного моделирования исследовано влияние пульсирующих струй пленочного охлаждения на эффективность тепловой завесы. В принятой модели цилиндрическая струя вдувалась под углом $\alpha = 30^\circ$. Варьировались число Струхала Sh от 0.004 до 0.320 и режим рабочего цикла DC. Выявлено, что оба параметра: и частота, и рабочий цикл – существенно влияют на эффективность пленочного охлаждения. Показано, что при максимальном значении параметра вдува $m = 1.5$ пульсации, соответствующие числу Струхала Sh = 0.320, при рабочем цикле DC = 50% снижают интенсивность уноса вдуваемой струи и тем самым увеличивают значение η на центральной линии и поперечно осредненную по ширине канала эффективность $\bar{\eta}$ по сравнению с непрерывной подачей при том же значении параметра вдува.

Если сравнивать со стационарным вдувом при таком же расходе охладителя, то относительные пульсации при рабочем цикле 50% будут иметь сопоставимую эффективность, а эффективность пульсаций при рабочем цикле 25% приведет к неравенству $\eta_0 > \eta_f$, где η_0 и η_f – эффективность тепловой завесы при стационарном и пульсирующем вторичном потоке соответственно.

В статье [6] приведены результаты экспериментального исследования влияния пульсаций струи и рабочего цикла на η для модели входной кромки турбинной лопатки с пленочным охлаждением наружной поверхности. Отверстие цилиндрической формы для вдува охладителя в основной поток располагалось на полукруглой входной кромке плохо обтекаемого тела под углом 22° к передней критической точке входной кромки. Опыты проводились при частотах пульсаций струи $f = 5, 10$ и 20 Гц, значениях рабочих циклов DC = 10, 25, 50 и 75% и параметрах вдува m от 0.25 до 2.00. Согласно результатам испытаний [6], более высокая эффективность η и низкий коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пл}$ могут быть получены при пониженных параметрах вдува и малых значениях рабочего цикла.

Установлено, что влияние изменения частоты пульсаций в диапазоне от 5 до 20 Гц не выходит за пределы погрешности эксперимента. Параметр вдува m при уменьшении параметра рабочего цикла DC играет важную роль в комбинации с пульсациями, способствуя высокой эффективности тепловой завесы при более низких коэффициентах теплоотдачи.

Пульсации струи обеспечивают большее значение η и немного более низкий коэффициент теплоотдачи по сравнению с непрерывной струей.

ей. При пульсирующей подаче и разных значениях ДС формируются струи с пониженным средним импульсом относительно основного потока. В результате процесс отрыва струи от охлаждаемой поверхности становится менее интенсивным, а растекание струи по поверхности (по оси z) происходит на большей ее площади. Это указывает на более высокое значение η и уменьшенную тепловую нагрузку.

Авторами [6] указано, что в пульсирующей струе частота пульсаций не играет роли. Однако существует такой рабочий цикл, при котором расход охладителя уже настолько снижается, что эффект от вдува вообще исчезает.

В статье [7] обсуждаются результаты выполненного ее авторами прямого численного моделирования в целях изучения влияния пульсирующих струй охладителя на значение η . В работе варьировались значения рабочего цикла ДС и числа Струхала, а при расчетах применялись граничные условия, использованные в [5]. Авторами [7] подтверждены результаты, полученные в [5] и свидетельствующие о том, что общая эффективность тепловой завесы повышается при пульсирующем потоке по сравнению со стационарным при одном и том же максимальном значении параметра вдува ($m = 1.5$). В работе исследован диапазон частоты пульсаций, соответствующий значениям числа Струхала $Sh = 0.004–0.320$. Наилучшие результаты получены при $Sh = 0.320$. Рассмотрена цилиндрическая струя, вдуваемая под углом $\alpha = 30^\circ$.

Авторами работы [8] представлены результаты экспериментального исследования эффективности тепловой завесы, а также коэффициента теплоотдачи по “чистому” снижению теплового потока (снижение теплового потока в охлаждаемую стенку при суммарном воздействии конвективного теплообмена и тепловой завесы). В этой работе при стационарном вдуве значение η было наибольшим при параметре $m = 0.65$, а коэффициент теплоотдачи – при $m = 1.25$. При наложении пульсаций на поток вдуваемого охлаждающего воздуха при параметре вдува $m = 0.65$ значение η постепенно снижалось, в то время как $\alpha_{пл}$ существенно не изменялся.

Общая эффективность охлаждения при $m = 0.65$, которая характеризуется NHFR, также уменьшалась при наложении пульсаций с различными значениями числа Sh . Так, при $m = 1.00$ и $Sh = 0.2$ параметры η и $\alpha_{пл}$ существенно ухудшились относительно других режимов. При $m = 1.25$ повышение эффективности тепловой завесы и коэффициента теплоотдачи наблюдалось при $Sh = 0.2$ и 0.3 по сравнению с $Sh = 0$ и 0.5 . Таким образом, процесс “чистого” снижения теплового потока при $m = 1.25$ интенсифицируется при всех параметрах пульсирующего вдува, в отличие от стационарного.

Переменный эффект пульсаций

В некоторых работах при изменении основных параметров было получено как повышение, так и снижение эффективности тепловой завесы. Например, в [9] исследовались синусоидальные пульсации, наложенные на вдуваемую круглую струю. Основные режимные и геометрические параметры в опытах поддерживались постоянными. Параметр вдува m принимал значения 0.65, 1.0 и 1.25, температурный фактор $\theta = 2$, а число Струхала $Sh = 0, 0.2, 0.3$ и 0.5 .

Авторами [9] установлено, что если при стационарном вдуве через цилиндрическое отверстие для струи характерно безотрывное обтекание поверхности, то при наложении пульсаций значение η в некоторых случаях снижается. Важным фактором всех исследованных в [9] режимов с параметром вдува $m = 0.65$ являются осредненные значения эффективности тепловой завесы и коэффициента теплоотдачи при пульсирующей струе. Показано, что при параметре вдува $m = 1$ значение $\bar{\eta}$ и коэффициент теплоотдачи практически стабилизируются при числе Струхала $Sh = 0.2$, а при $Sh = 0.3$ наблюдается лишь некоторое повышение осредненной эффективности. При стационарном вдуве с более выраженным отрывом струи ($m = 1.25$) низкочастотные пульсации способствуют повышению $\bar{\eta}$ вследствие более низкого расхода охладителя в течение длительного временного интервала соответствующего периода пульсаций. Положительное воздействие пульсаций наблюдается при $Sh = 0.2$ и 0.3 .

В [10] путем численных расчетов получено, что пульсации воздуха, вдуваемого в основной поток через цилиндрические отверстия, повышают эффективность тепловой завесы. Гидродинамика пульсирующих струй в значительной мере зависит от формы отверстия и параметра вдува m . В исследованных режимах, а также при стационарном вдуве вторичного потока с безотрывными струями, пульсации во много раз снижают значение η . При стационарном потоке, но при отрыве струи (например, при более высоких параметрах вдува) пульсации способствуют повышению эффективности.

В данной статье авторами представлены результаты исследований при оптимальном параметре вдува $m = 0.5$ и всех указанных значениях частоты пульсаций f . Численное моделирование показало, что при пульсирующей струе значение η более низкое, чем при стационарной. Эти выводы объясняются тем фактом, что стационарная струя обеспечивает высококачественное покрытие поверхности в течение всего режима вдува. Однако, когда вдув прекращается, в отверстия может всасываться горячий основной поток.

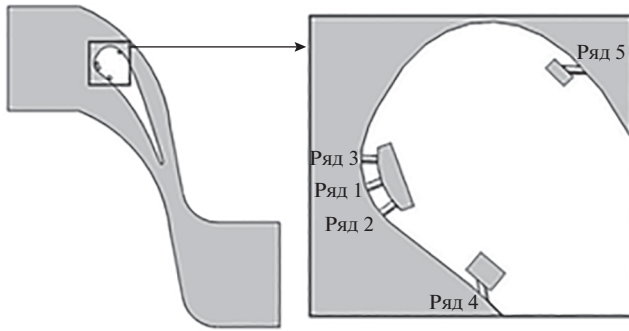


Рис. 4. Расчетная модель [12]

В режиме пленочного охлаждения при $m = 1.5$ при наличии пульсаций показатели существенно зависят от их частоты. Так, при низкой частоте пульсаций (например, при $Sh = 0.0119$) эффективность тепловой завесы была ниже, чем при стационарном вдуве, при всех значениях x/d . Причина в том, что из-за отрыва струи от стенки в процессе вдува струя не полностью покрывает охлаждаемую поверхность. В результате как при пульсирующей струе, так и при стационарном потоке при $m = 1.5$ значения эффективности тепловой завесы уменьшились на всех относительных расстояниях x/d .

В статье [10] были также выполнены расчеты осредненной эффективности $\bar{\eta}$, что позволило сравнить значения общей эффективности во всех исследованных режимах, из которых наилучшие результаты при рабочем цикле 50% были такими: общее снижение на 38.12% при $m = 0.5$ и общее повышение на 14.77% при $m = 1.5$.

Однако при стационарном вдуве и безотрывной струе пульсации охлаждающего воздуха существенно снижают эффективность тепловой завесы. При более высоких параметрах вдува пульсации способствуют повышению осредненной по времени и расстоянию эффективности при снижении расхода охлаждающего воздуха, разрушая возникающие при отрыве вдуваемой струи крупномасштабные вихревые структуры.

Таким образом, в работе [10] получено, что, несмотря на то что в общем пульсации не приносят положительного эффекта, в отдельных случаях они помогают повысить значение $\bar{\eta}$ по сравнению со стационарным режимом вдува.

В [10] выполнено численное моделирование пленочного охлаждения плоских пластин с цилиндрическими отверстиями. Использованы коммерческий пакет Fluent и модель турбулентности Realizable $k-\epsilon$. Для параметра вдува m были приняты значения 0.5 и 1.5, рабочий цикл DC составлял 50%, а число Струхала $Sh = 0.0119, 0.19, 0.38$ и 1.0. Часть опытных данных заимствована из [11]. В работе [10] обсуждались распределения

значений η по оси (вдоль центральной линии) отверстия.

В [12] проведено численное моделирование охлаждения модифицированной лопатки NASA СЗХ с помощью пульсирующего вдува. Рассмотренная модель лопатки оснащена пятью рядами цилиндрических отверстий для пленочного охлаждения (рис. 4): тремя рядами на участке входной кромки и по одному ряду со стороны вогнутой и выпуклой поверхностей.

Пульсации охлаждающего воздуха имели прямоугольный и синусоидальный профили. Эффективность тепловой завесы исследовалась при трех значениях параметра вдува m (0.5, 0.75 и 1.0) и четырех значениях числа Струхала Sh (0.0027, 0.0054, 0.0108 и 0.0216).

Расчеты показали, что наложение пульсаций на струи охлаждающего воздуха ведет к всасыванию основного потока в отверстия подачи воздуха, что вызывает колебания температуры в окрестности выхода струй из этих отверстий. В целом, эффективность тепловой завесы при пульсациях оказалась ниже, чем в стационарных условиях, для всех трех рассмотренных значений параметра вдува. При одинаковых режимных условиях на входной кромке и на вогнутой части профиля более высокому значению f соответствует более низкое значение η .

На выпуклой поверхности профиля лопатки ситуация обратная – большей частоте пульсаций соответствует более высокая эффективность. Так, например, при синусоидальном режиме пульсаций (рис. 5) на участке спинки профиля лопатки для $x/d = 34$ при $Sh = 0.0108$ эффективность тепловой завесы $\eta = 0.55$, а при $Sh = 0.02016$ получено $\eta = 0.58$.

Таким образом, выполненные в [12] численные расчеты показали, что эффект от пленочного охлаждения при наложенных на вдуваемый поток пульсациях будет разным в зависимости от того, на каком участке профиля лопатки его рассматривать. Поэтому полученные результаты весьма полезны для понимания эффектов охлаждения пульсирующей струей на всей поверхности турбинной лопатки, включая области входной кромки, вогнутой и выпуклой поверхностей ее профиля.

В работе [13] рассмотрено влияние изменения расхода струи через цилиндрическое отверстие при значении угла вдува $\alpha = 35^\circ$ в основной поток на плоской пластине. Использованы следующие методы исследования: визуализация на основе рассеяния, измерение расхода с высоким временным разрешением и моделирование методом крупных вихрей (Large eddy simulation – LES). Изучено пленочное охлаждение пульсирующими струями при двух небольших значениях m (0.3 и 0.4) и двух наложенных режимах пульсаций. Значения частоты пульсаций характеризовались чис-

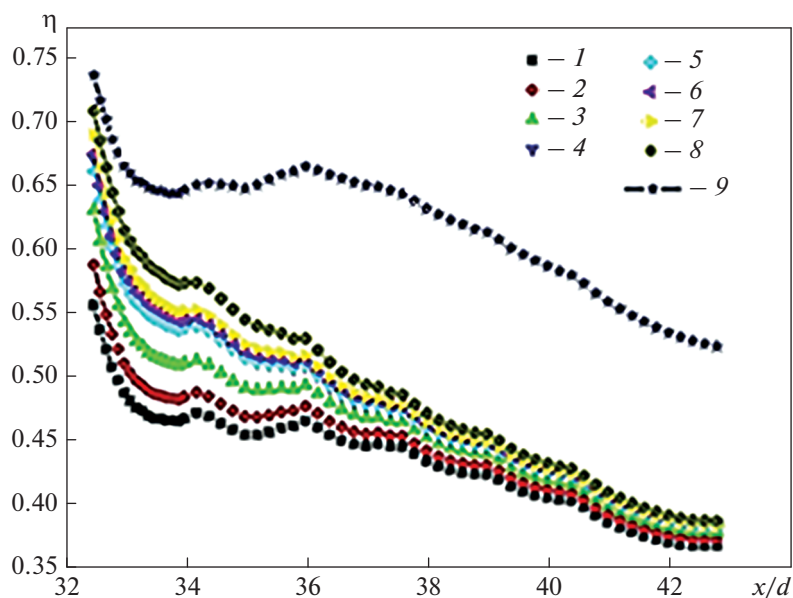


Рис. 5. Зависимость распределения поперечно осредненной эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}$ ниже по потоку за рядом 5 относительного расстояния от сечения вдува до точки измерения температуры при различных числах Струхала Sh при параметре вдува $m = 1.0$ [12].

1–4 – волна квадратного профиля; 5–8 – синусоидальная волна; 9 – стационарный поток.
Число Sh : 1, 5 – 0.0027; 2, 6 – 0.0054; 3, 7 – 0.0108; 4, 8 – 0.0216

лами Струхала $Sh = 0.016$ и 0.159 . Рабочий цикл имел равные по длительности активную и пассивную фазы ($DC = 50\%$). На основе измерений расхода с высоким временным разрешением определялись мгновенные значения параметров вдува и соответствующие граничные условия на входе для LES. Динамика вихревых структур, генерируемых на переходных этапах цикла пульсаций, а также их влияние на пленочное охлаждение исследовались в зависимости от параметров принятых в расчетах воздействий.

В результате эксперимента и численного расчета выявлено формирование мощных когерентных вихревых структур на начальном участке смешения в обоих случаях при заданных значениях m и Sh . Наблюдалось всасывание части основного потока в отверстия для вдува при переходе от большого к малому значению m . Оба фактора негативно влияли на эффективность тепловой завесы.

В [13] указано также, что во всех исследованных режимах эффективность тепловой завесы ухудшалась независимо от параметров пульсаций вдуваемого потока по сравнению с их отсутствием при фиксированном массовом расходе. Сопоставляя воздействие пульсирующей и стационарной струй при одинаково высоком m , установили, что при наличии пульсаций эффективность тепловой завесы немного повышается вследствие разрушения возникающих крупномасштабных вихревых структур.

Осредненные по времени результаты измерений образующейся за сечением вдува пленки и

эффективности тепловой завесы показали, что благодаря воздействию пульсирующих струй более обширная площадь поверхности может быть покрыта охлаждаемой пленкой, чем при вдуве потока стационарными струями, например, при высоком параметре m .

Осредненные по фазе значения эффективности тепловой завесы подтвердили, что низкая эффективность тепловой завесы и малая теплоотдача обусловлены, в основном, переходом от больших значений параметра вдува к меньшим. В целом, при высоких частотах пульсаций параметры охлаждения ухудшаются из-за преобладания переходных процессов в более коротком цикле пульсаций.

Отрицательный эффект пульсаций

Авторы [14] провели экспериментальное исследование эффективности тепловой завесы и коэффициента теплоотдачи при пульсирующем вдуве охлаждающего воздуха в основной поток. Объектом изучения являлся один ряд цилиндрических отверстий, имевших угол вдува относительно поверхности плоской пластины 35° . Принимали следующие значения параметра вдува: $m = 0.25, 0.5, 1.0$ и 1.5 при различных частотах пульсаций и рабочих циклах $DC = 25, 50, 75$ и 100% .

Характер изменения числа Стэнтона St на охлаждаемой поверхности свидетельствует о структуре потока: при пульсациях значение St растет с увеличением как частоты пульсаций, так

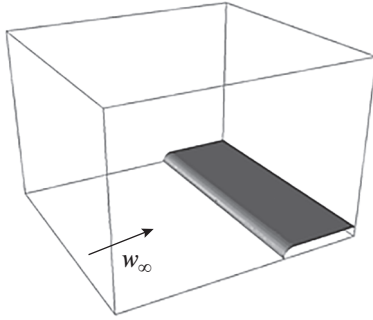


Рис. 6. Расчетная область

и значения DC. Соотношение пульсирующего и стационарного тепловых потоков показывает, что пульсации оказывают негативное влияние на η и $\alpha_{пл}$ с некоторыми исключениями на самых высоких частотах пульсаций.

Следует отметить, что характер изменения чисел St позволяет понять, как при пленочном охлаждении повышается интенсивность теплообмена. Области высоких значений $\alpha_{пл}$, расположенные непосредственно за отверстиями вдува, подтверждают существование почкообразных вихрей, взаимодействующих с охлаждающими струями. Согласно [14], отношение St/St_0 (St_0 – число Стэнтона во вторичном стационарном потоке) за каждым отверстием показывает влияние вихрей в пределах охлаждающих струй и полученные зависимости симметрично расположены относительно оси отверстия. В режиме без вдува при наименьших значениях соотношения St/St_0 наблюдаются наибольшие значения η . Пульсации увеличивают числа St , а высокие частоты и большие значения DC усиливают этот эффект.

Таким образом, на значение η в большей степени влияет соотношение тепловых потоков при пульсирующем и стационарном режимах. Поскольку пульсации снижают эффективность тепловой завесы и увеличивают коэффициент теплоотдачи, то “чистый” эффект при использовании этого способа охлаждения, как правило, заключается в повышении теплового потока, однако при высоких частотах пульсаций и больших значениях параметра вдува такого эффекта не наблюдается. В [14] отмечено, что наибольшее значение η соответствует стационарным струям при оптимальном значении параметра $m = 0.5$.

В [15] численно исследовалось, как пульсации потока охладителя влияют на эффективность тепловой завесы входной кромки турбинной лопатки, которая моделировалась как цилиндрическая входная кромка с плоской хвостовой частью (рис. 6). В этой работе показано, что в отсутствие пульсаций “чистое” снижение теплового потока было примерно одинаковым при параметрах вдува $m = 0.25$ и 0.50 . Следует отметить, что при оптимальном значении $m = 0.50$ поперечно осредненное значение эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}$ немного выше, чем при $m = 0.25$, однако более высокий коэффициент теплоотдачи в этом случае привел к практически одинаковому “чистому” снижению теплового потока при $m = 0.50$ и 0.25 .

В [15] было получено (рис. 7), что “чистый” тепловой поток повышается благодаря пульсациям пленки охладителя. Однако по мере нарастания амплитуд пульсаций относительно среднего значения параметра вдува наблюдается снижение эффективности тепловой завесы. Анализ полученных с высокой точностью значений η и $\alpha_{пл}$ показал, что “чистый” тепловой поток увеличи-

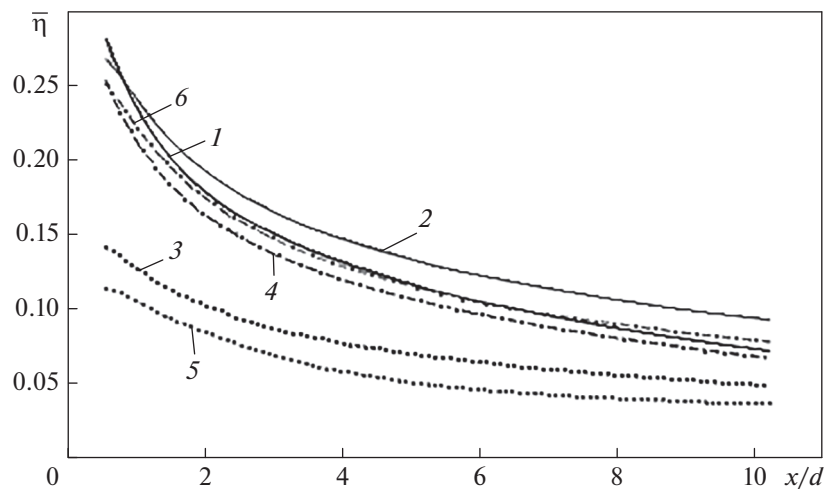


Рис. 7. Поперечно (по оси z) осредненное изменение эффективности тепловой завесы $\bar{\eta}$ по длине охлаждаемой поверхности при стационарном (1, 2) и пульсирующем (3–6) вдуве через одиночное отверстие [15]. Значение параметра вдува m : при стационарном режиме: 1 – 0.25; 2 – 0.5; при пульсирующем режиме: 3 – 0.5, 0; 4 – 0.35, 0.15; 5 – 1; 6 – 0.75, 0.25

вается при пульсирующем потоке охладителя с параметрами $f = 0.151$ и $DC = 50\%$.

Эффективность тепловой завесы зависит от среднего значения параметра вдува и амплитуды колебаний. Так, низкая эффективность наблюдается при более высокой амплитуде пульсаций (см. рис. 7). При относительном расстоянии от сечения вдува $x/d = 2$ и $m = 0.25$ в режиме стационарного вдува потока эффективность тепловой завесы составляет 0.18. При пульсирующем вдуве с более высокой амплитудой пульсаций значение $\eta = 0.1$, а при организации пульсаций с пониженной амплитудой ($m = 0.35$ и 0.15) значение $\eta = 0.16$. Для $m = 0.50$ с тем же отношением $x/d = 2$ при стационарном вдуве эффективность тепловой завесы равна 0.19. При пульсирующем вдуве с высокой амплитудой пульсаций ($m = 1$) $\eta = 0.08$. В более узком диапазоне пульсаций ($m = 0.75-0.25$) значение $\eta = 0.18$.

В [16] рассмотрено одиночное цилиндрическое отверстие для подвода охладителя, расположенное под углами 21.5° к входной кромке и 20° к обтекаемой потоком поверхности. Отношение диаметра входной кромки к диаметру отверстия вдува составляло $D_{вх}/d = 18.7$. Для разных вариантов пульсаций было определено осредненное по времени “чистое” снижение теплового потока NHFR. Значение NHFR при пульсационном пленочном охлаждении сопоставлялось с таковым при охлаждении стационарной струей для одинакового среднего параметра вдува \bar{m} . Результаты, полученные для стационарной струи при средних значениях $\bar{m} = 0.25$ и 0.50 , сравнивались с данными для пульсирующей струи при частоте $f = 0.151$ и $DC = 50\%$. Моделирование выполнялось при числе Рейнольдса $Re = 60000$. Более подробно результаты работы [16] будут рассмотрены в разделе, посвященном оптимальному проектированию систем конвективно-пленочного охлаждения.

Детальное экспериментальное исследование эффективности тепловой завесы выполнено в [17] на модели цилиндрической входной кромки турбинной лопатки. Опыты проводились при стационарном и пульсирующем режимах вдува вторичного потока воздуха через цилиндрическое отверстие при параметрах вдува $m = 1.0$ и 2.0 , в пульсирующем режиме с $f = 10$ Гц и $DC = 50\%$. Как и в [15, 16], в [17] отверстие для вдува было смещено на 21.5° от оси и находилось под углом 20° к обтекаемой потоком поверхности.

В результате сравнения значений $\bar{\eta}$ при пульсирующем и стационарном вдуве отмечено, что при одном и том же среднем параметре вдува \bar{m} эффективность тепловой завесы в пульсирующем режиме снижается в 2 раза по сравнению со стационарным режимом. Аналогичные результаты были получены и в работе [15].

Измеренная в [17] температура $T_{пл}^*$ в течение одного периода пульсаций менялась незначительно. Вследствие высокой тепловой инерционности временной масштаб пульсаций почти не влияет на значение этой температуры. Такой вывод справедлив для двух рассмотренных значений параметра вдува 0.25 и 0.50.

Таким образом, результаты исследования [17] подтверждают, что во всех рассмотренных режимах пульсации потока снижают эффективность тепловой завесы по сравнению со стационарным вдувом пленки при том же значении параметра вдува, что согласуется с выводами авторов [15, 16]. Однако требуется проведение дальнейших исследований в этом направлении для преодоления несоответствия между данными, полученными разными авторами.

УПРАВЛЕНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ВДУВАЕМЫМ ПОТОКОМ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Результаты экспериментального исследования возможности управления процессом отрыва пограничного слоя с помощью струй, создаваемых вихревым генератором, представлены в [18]. Испытаниям была подвергнута высоконагруженная турбинная решетка, помещенная в аэродинамическую трубу, степень турбулентности основного потока была небольшой и составляла 0.6%. В полости турбинной лопатки высокого давления вихревым генератором создавался либо стационарный, либо пульсирующий поток, вдуваемый струями через цилиндрические отверстия на поверхность спинки профиля турбинной лопатки.

Числа Рейнольдса, рассчитанные по длине спинки лопатки и номинальной скорости потока на выходе из аэродинамической трубы, составляли 25000 и 50000. Варьировались частота пульсаций струи f и значение DC . Получено более высокое значение эффективности тепловой завесы для пульсирующего потока по сравнению со стационарным. Использование пульсирующих струй для управления потоком привело к 20%-ному росту окружного усилия на валу турбины и к 60%-ному снижению потерь полного давления по сравнению со стационарным потоком при том же значении числа Рейнольдса.

Авторами [18] получено, что при отсутствии управления потоком после отрыва пограничного слоя от поверхности лопатки и далее вниз по потоку он уже к ней не присоединялся. При наличии же пульсирующих струй, направляемых от вихревых генераторов, появлялась возможность управлять процессом отрыва пограничного слоя. При увеличении частоты пульсаций время, соответствующее началу отрыва, сокращается. Когда это время достаточно короткое, пограничный

слой всегда остается присоединенным к обтекаемой поверхности лопатки.

При высоких частотах пульсаций можно управлять отрывом даже при низких скоростях струи ($Re = 25000$) и $DC = 10\%$. В этих условиях при значении числа Струхала пульсирующей струи $Sh = 0.5$ наличие или отсутствие отрыва контролировалось в течение практически всего цикла пульсаций.

В [18] установлено, что при $Re = 50000$ отрывной пузырь растет медленнее, чем при $Re = 25000$, поэтому значение числа Струхала $Sh = 0.3$ является достаточным для получения положительного эффекта, т.е. достижения безотрывного течения, кроме того, появляется возможность увеличить рабочий цикл до 50%. Однако при достижении больших частот дальнейшее уменьшение числа Струхала невозможно и генерируемые пульсации практически не приносят преимуществ.

Как отмечено в [18], самые эффективные возмущения для управления отрывом пограничного слоя создаются тогда, когда струи от вихревого генератора включаются и выключаются, а рабочий цикл увеличен до 50%, т.е. процессы активной и пассивной фаз разделены во времени поровну. В этих условиях возможность управления потоком увеличивается: можно менять частоту пульсаций струй и частоту их включения и выключения при разных значениях DC .

Осредненные по фазе включения/выключения струй профили скорости и спектры импульсов скорости показали, что возмущения от струй вихревых генераторов приводят к присоединению пограничного слоя. Однако затем он может опять оторваться в промежутке между рабочими циклами пульсаций. Когда частота возмущений высока, время на отрыв сокращается, поэтому отрывной пузырь остается всегда замкнутым.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ КОНВЕКТИВНО-ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ ВДУВОМ

Как указано в [16], система пленочного охлаждения в газовом тракте газотурбинного двигателя может защитить детали от воздействия высокотемпературного основного потока, но в общем случае этот способ охлаждения увеличивает коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пл}$, при этом преимущество от снижения адиабатической температуры стенки частично нивелируется. В связи с этим практический интерес представляют исследования эффективности тепловой завесы η и коэффициента теплоотдачи $\alpha_{пл}$, рассмотренные в совокупности. “Чистое” снижение теплового потока принято в качестве целевой функции, зависящей от η и $\alpha_{пл}$, поскольку фактически характеризует температуру наружной поверхности и темпера-

турные градиенты в стенке охлаждаемой турбинной лопатки, которые минимизируются в процессе оптимального поиска.

В [16] эффект NHFR исследуется для некоторого диапазона стационарных и пульсационных условий вдува. В этой работе применена новая экспериментальная методика для анализа нестационарного режима пленочного охлаждения на полукруглом цилиндре, моделирующем входную кромку лопатки турбины. Авторами [16] получено, что при умеренных параметрах вдува на моделируемых значениях частот вращающейся рабочей лопатки стационарное пленочное охлаждение дает лучшие значения NHFR. Однако при более высоких расходах охладителя, превышающих оптимальное значение стационарного параметра вдува, пульсационное пленочное охлаждение может быть предпочтительным.

В [16] представлена методика прогнозирования пульсирующего вдува на частотах, соответствующих натурным режимам вращающейся рабочей лопатки. Для использования этой методики необходима информация только о параметрах стационарного вдува вторичного потока. Методика позволяет прогнозировать, в каких случаях пульсирующий вдув приводит к положительному, а в каких – к отрицательному эффекту.

Полученные результаты показали, что оптимальный стационарный параметр вдува m для максимального осредненного по площади значения NHFR лежит в диапазоне между 0.25 и 0.50 в зависимости от параметров основного потока. Пульсационное пленочное охлаждение при низких параметрах вдува уступает стационарному вдуву по “чистому” снижению теплового потока. Однако при более высоких расходах охлаждающего воздуха (другими словами, при существенном превышении оптимального значения стационарного параметра вдува) пульсирующий вдув может быть предпочтительней. Максимальное преимущество от пульсирующего пленочного охлаждения наблюдается при $\bar{m} = 2.0$, что составляет 4.1%-ное улучшение значения NHFR в условиях турбулентного основного потока.

Оценить положительное и отрицательное воздействие пульсаций на эффективность тепловой завесы можно, рассматривая механизм стационарного пленочного охлаждения как квазистационарный процесс.

Отрицательное воздействие пульсаций отмечено в [15]. По мере нарастания амплитуд пульсаций пленки охладителя относительно среднего значения параметра вдува на полуцилиндрической модели входной кромки “чистый” тепловой поток повышается. Данные по эффективности тепловой завесы и коэффициенту теплоотдачи с установленной высокой точностью показывают, что “чистый” тепловой поток в целом повышает-

ся для пульсирующей пленки охладителя при $f = 0.151$ и рабочем цикле 50%.

В работе [5], как уже было сказано ранее, методом прямого численного моделирования проанализировано влияние пульсирующих струй пленочного охлаждения на эффективность тепловой завесы. При выполнении расчетов использовалась трехмерная схема наклонной струи в основном потоке при заданной скорости ее вдува и было выявлено, что и частота, и рабочий цикл влияют на эффективность тепловой завесы. Значение η на центральной линии и осредненная в поперечном направлении, по сравнению со стационарным случаем вдува при $m = 1.5$, увеличиваются. Так как в работе [5] численно исследовано ограниченное число пульсационных режимов, оптимизировать полученные результаты по параметрам воздействия авторам статьи не удалось.

В [19] рассмотрено влияние рабочего цикла и частоты пульсаций на эффективность тепловой завесы для струи, вдуваемой под углом $\alpha = 35^\circ$ к основному потоку. Проведены высокоточное моделирование рабочего процесса вдувания струи и построение поверхности отклика, применяемые для пленочного охлаждения турбинных лопаток с наложенными на вдуваемый поток воздуха пульсирующими воздействиями. Поверхность отклика строилась для η как функции рабочего цикла DC (в диапазоне от 0.05 до 1.0) и частоты пульсаций $Sh = 0.2-2.0$, параметр вдува m поддерживался на уровне $m = 1.5$.

В [19] представлена эффективная вычислительная стратегия движения трехмерной струи после ее вдува в основной поток, сочетающая в себе высокоточное моделирование и построение поверхности отклика в проектном пространстве для нахождения оптимальных параметров воздействия, обеспечивающих максимальную эффективность тепловой завесы.

Всего авторами [19] проведено 73 расчета методом прямого численного моделирования (Direct numerical simulation – DNS) с помощью метода спектральных элементов для оценки значения η в системе Кленшоу – Кертиса в проектном пространстве. Установлено, что в исследованном пространстве параметров существует глобальный оптимум. Изучены физические механизмы, обеспечивающие параметры глобального оптимума. Важное значение в этом процессе имеет всасывание основного потока в отверстие, через которое вдувается охладитель. В результате моделирования было получено, что оптимальные условия для эффективности тепловой завесы наблюдаются в нижнем левом квадранте пространства “рабочий цикл – период пульсаций” при коротких рабочих циклах (DC = 14%) и более высоких частотах ($Sh \approx 1$). В том же диапазоне DC и Sh были обнаружены еще четыре локальных оптимума.

Когда вдув вторичного потока отсутствует, основной поток вблизи отверстия вдува изменяет свое направление: он всасывается в отверстие для вдува. Далее этот поток распространяется по отверстию и выталкивает из него охладитель в область нижней кромки отверстия по потоку. Из этого следует, что охладитель продолжает поступать из отверстия даже в те периоды пульсаций, когда его подача отключена. В это время возникают двухъярусные вихри: верхний шпилькообразный вихрь расположен над вихревой парой почкообразных вихрей. Вертикальная скорость, вызванная каждой парой вихрей, незначительна, и поэтому охладитель не отрывается от поверхности.

Авторы [19] обнаружили несколько локальных оптимумов и предположили, что методы оптимизации, основанные на градиентах стратегии, не подходят для решения поставленной задачи.

В [8] определено влияние двух видов пульсирующего вдува на пленочное охлаждение при характерных частотах пульсаций для турбины. Установлен оптимальный диапазон чисел Sh при разных режимах вдува для повышения параметров пленочного охлаждения. Представлены результаты опытного исследования значений η и $\alpha_{пл}$ по “чистому” снижению теплового потока. Эффективность тепловой завесы стационарного потока была наибольшей при параметре вдува $m = 0.65$, а коэффициента теплоотдачи – при $m = 1.25$.

ВЫВОДЫ

1. Веерные отверстия для вдува потока воздуха обеспечивают более высокую эффективность тепловой завесы по сравнению с цилиндрическими отверстиями не только в стационарном режиме вдува струи под углом $\alpha = 30^\circ$ и $m = 1.0$, но и в пульсирующем режиме при $m = 1.5-2.0$. При $m = 1.5$ и числе Струхала $Sh = 0.32$ для обеих форм отверстий пульсирующий поток охладителя дает более высокую осредненную эффективность тепловой завесы, чем стационарный вдуваемый поток. В стационарном режиме вдува вторичного потока с безотрывными струями пульсации существенно снижают эффективность тепловой завесы.

2. При больших углах вдува (45° и выше) и значениях $m = 1.5-2.0$ в стационарном режиме за сечением вдува образуются рециркуляционные области или парные крупномасштабные почкообразные вихри. При наличии пульсаций они существенно уменьшаются по площади охлаждаемой поверхности, поэтому эффективность тепловой завесы при пульсирующем вдуве возрастает.

3. В стационарном режиме при низких параметрах вдува (0.25 и ниже) и небольших углах вдува $\alpha = 30^\circ$ эффективность тепловой завесы при

вдуве через цилиндрические отверстия такая же, как при вдуве через веерные отверстия, или превышает ее. Наложённые на поток пульсации дополнительно снижают значение η при отверстиях обеих форм.

4. Эффективность тепловой завесы при пульсирующем вдуве на профиле турбинной лопатки зависит от участка ее профиля. На входной кромке и на вогнутой части профиля более высокая частота пульсаций приводит к снижению значения η , а на спинке, наоборот, большая частота пульсаций способствует повышению эффективности тепловой завесы.

5. При пульсирующем вдуве струи процессы взаимодействия основного и вторичного потоков за сечением вдува находятся под влиянием одного из двух осредненных параметров вдува. Увеличение эффективности тепловой завесы зависит от среднего параметра вдува и амплитуды колебаний. Меньшее значение эффективности охлаждения отмечено при более высокой амплитуде пульсаций.

6. Пульсирующие струи при одинаковых условиях управления потоком более эффективны, чем стационарные. При повышении частоты пульсаций сокращается время до наступления отрыва потока. Если это время достаточно короткое, пограничный слой всегда остается присоединенным к обтекаемой поверхности лопатки. Увеличение частоты пульсаций вдуваемого потока практически не дает дальнейшего повышения эффективности тепловой завесы.

7. При пульсирующей подаче охлаждающего воздуха возможно проникновение горячих газов в отверстия и в полость его подвода.

8. В промышленных условиях для большинства систем охлаждения невозможно снизить значение параметра вдува до оптимального. Поэтому пульсации становятся единственным способом повышения эффективности тепловой завесы.

9. Для решения вопросов оптимального проектирования конвективно-плёночных систем охлаждения результаты исследований эффективности тепловой завесы η и коэффициента теплоотдачи $\alpha_{пл}$ в режиме пульсирующего вдува рассмотрены в виде комбинации, обозначенной термином “чистое” снижение теплового потока. При проведении численного моделирования с помощью такого подхода удалось установить, что максимальное преимущество от пульсирующего плёночного охлаждения достигается при $\bar{m} = 2.0$ и составляет 4.1%-ное улучшение значения NHFR в условиях турбулентности свободного потока.

10. Для реализации предложенных методов прогнозирования влияния пульсирующего вдува на эффективность тепловой завесы требуются только знания параметров стационарного пото-

ка, которые позволяют оценить, в каких случаях пульсации оказывают положительное, а в каких – отрицательное воздействие.

11. Приведенная стратегия оптимизации сочетает в себе высокоточное моделирование рабочего процесса и построение поверхности отклика, применяемые для плёночного охлаждения турбинных лопаток с наложенными на вдуваемый поток воздуха пульсирующими воздействиями. Анализ результатов экспериментального исследования эффективности тепловой завесы и коэффициента теплоотдачи по “чистому” снижению теплового потока выявил, что эффективность тепловой завесы была наибольшей при коэффициенте вдува $m = 0.65$, а коэффициент теплоотдачи – при $m = 1.25$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проектирование** авиационных газотурбинных двигателей / В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, Ю.Л. Ковылов, А.М. Постников, Д.Г. Федорченко, Ю.И. Цыбизов. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008.
2. **Диденко Р.А.** Повышение эффективности системы подвода охлаждающего воздуха к рабочей лопатке первой ступени турбины ГТД: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2022.
3. **Эффективность** плёночного охлаждения плоской поверхности в ускоряющемся потоке при вдуве воздуха через веерные отверстия / Е.Ю. Марчуков, А.В. Стародумов, А.В. Ильинков, А.В. Щукин, А.М. Ермаков, В.В. Такмовцев, И.А. Попов // Теплоэнергетика. 2022. № 4. С. 70–80. <https://doi.org/10.1134/S0040363622040038>
4. **Ou S., Rivir R.B.** Shaped-hole film cooling with pulsed secondary flow // ASME Turbo Expo: Power Land, Sea, Air. 2008. No. GT2006-90272. P. 259–269. <https://doi.org/10.1115/GT2006-90272>
5. **Muldoon F., Acharya S.** DNS study of pulsed film cooling for enhanced cooling effectiveness // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. No. 13–14. P. 3118–3127. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.01.030>
6. **Ekkad S.V., Ou S., Rivir R.B.** Effect of jet pulsation and duty cycle on film cooling from a single jet on a leading edge model // J. Turbomach. 2006. V. 128. P. 564–571.
7. **Muldoon F., Acharya S.** Computations of pulsed film-cooling // ASME Turbo Expo: Power Land, Sea, Air. 2009. No. GT2007-28156. P. 889–897. <https://doi.org/10.1115/GT2007-28156>
8. **Experimental** convective heat transfer characterization of pulsating jet in cross flow: Influence of Strouhal number excitation on film cooling effectiveness / G. Lalizel, Q. Sultan, M. Fenot, E. Dorignac // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 395. No. 1. P. 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/395/1/012043>
9. **Influence** of coolant jet pulsation on the convective film cooling of an adiabatic wall / Q. Sultan, G. Lalizel, M. Fenot, E. Dorignac // J. Heat Transfer. 2017. V. 139. No. 2. P. 022201. <https://doi.org/10.1115/1.4034773>

10. **Computational** simulation of cylindrical film hole with jet pulsation on flat plates / O. Kartuzova, D. Danila, M.B. Ibrahim, R.J. Valino // *J. Propul. Power*. 2009. V. 25. No. 6. P. 1249–1258.
<https://doi.org/10.2514/1.40299>
11. **Coulthard S.M., Volino R.J., Flack K.A.** Effect of jet pulsing on film cooling. Part I: Effectiveness and flow-field temperature results // *J. Turbomach.* 2007. V. 129. No. 2. P. 232–246.
<https://doi.org/10.1115/1.2437231>
12. **Ke Z., Wang J.** Numerical investigations of pulsed film cooling on an entire turbine vane // *Appl. Therm. Eng.* 2015. V. 87. P. 117–126.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.022>
13. **Bidan G., Vezier C., Nikitopoulos D.E.** Study of unforced and modulated film-cooling jets using proper orthogonal decomposition. Part II: Forced jets // *J. Turbomach.* 2012. V. 135. No. 2. P. 1517–1528.
<https://doi.org/10.1115/GT2011-45400>
14. **Coulthard S., Volino R., Flack K.** Effect of jet pulsing on film cooling. Part II: Heat transfer results // *J. Turbomach.* 2007. V. 129. No. 2. P. 247–257.
<https://doi.org/10.1115/1.2437230>
15. **Rutledge J.L., King P.I., Rivir R.** CFD predictions of pulsed film cooling heat flux on a turbine blade leading edge // *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.* 2008. No. IMECE2008-67276. P. 1139–1149.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2008-67276>
16. **Rutledge J.L., King P.I., Rivir R.B.** Influence of film cooling unsteadiness on turbine blade leading edge heat flux // *J. Eng. Gas Turb. Power.* 2012. V. 134. No. 7. P. 071901. <https://doi.org/10.1115/1.4005978>
17. **El-Gabry L.A., Rivir R.B.** Effect of pulsed film cooling on leading edge film effectiveness // *J. Turbomach.* 2012. V. 134. No. 4. P. 041005.
<https://doi.org/10.1115/1.4003653>
18. **Volino R.J., Ibrahim M.B.** Separation control on high lift low-pressure turbine airfoils using pulsed vortex generator jets // *Appl. Therm. Eng.* 2012. V. 49. P. 31–40.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.08.028>
19. **Babae H., Acharya S., Wan X.** Optimization of forcing parameters of film cooling effectiveness // *J. Turbomach.* 2014. V. 136. No. 6. P. 061016.
<https://doi.org/10.1115/1.4025732>

The Effectiveness of Film Cooling with Injection of Pulsating Air Flow (Review)

A. V. Shchukin^{a, *}, A. V. Il'inkov^a, V. V. Takmoltsev^{a, **}, I. A. Popov^a,
A. L. Tukmakov^a, and A. V. Starodumov^b

^a *Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan, 420111 Russia*

^b *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia*

*e-mail: a.v.shchukin@rambler.ru

**e-mail: vvt379@rambler.ru

Abstract—An analytical review is presented of scientific publications with the results of physical and numerical simulation of the effect of the pulsating cooling air flow on the effectiveness of thermal cooling, specifically on the airfoil part of turbine blades. The tests carried out under nearly full-scale conditions have revealed positive, variable, or negative effects of pulsations on the effectiveness of the film cooling. It has been found that a positive or negative effect of pulsations superimposed on the injected air flow is determined by the transport mechanisms in the film-cooling system, which are observed without pulsations. At the same time, fan-shaped holes give a higher local effectiveness of the film cooling compared to classical cylindrical holes not only in the steady-state case without changing the coolant flowrate but also in the case with pulsating flow injection. In the steady-state case, this occurs at a blowing ratio of $m = 1.0$, and that with the pulsating flow injection is at $m = 1.5$ and 2.0 . This is caused by the more uniform coverage by the gas-air mixture of the cooled surface downstream of the section with pulsating air flow injection. Moreover, at $m = 1.5$ for holes of both shapes, the pulsating coolant flow with $m = 1.5$ offers a higher spanwise averaged effectiveness of film cooling, $\bar{\eta}$, than the injected steady flow does. The examined methods for predicting the effect of pulsating flow injection on η require only knowledge of the steady flow behavior and enable us to assess when pulsing would be beneficial or detrimental for the effectiveness of film cooling.

Keywords: turbine blade, film-cooling effectiveness, pulsating flow, cylindrical or fan-shaped injection holes, heat transfer, blowing ratio, operating conditions, geometric parameters