

Эффективность пленочного охлаждения выпуклой и плоской поверхностей при пульсирующем вдуве через веерные и цилиндрические отверстия

А.В. ИЛЬИНКОВ,
канд. техн. наук,
А.В. ЩУКИН,
д-р техн. наук,
В.В. ТАКМОВЦЕВ,
канд. техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань),
А.В. СТАРОДУМОВ
(МАИ, Москва)
a.v.shchukin@rambler.ru

Рассмотрено влияние пульсирующего вдува на эффективность пленочного охлаждения цилиндрическими и веерными отверстиями выпуклой и плоской поверхностей. Проанализированы углы вдува 30, 45, 75°. Для анализа полученных результатов используются факторы воздействия центробежных массовых сил на выпуклой поверхности, диффузорные эффекты в веерных выемках и анализ кинетической энергии тепловой завесы за сечением вдува. Получено, что в зависимости от исследуемых условий наложенные на вторичный поток пульсации могут увеличивать или уменьшать эффективность тепловой завесы на охлаждаемой поверхности.

Пленочное охлаждение, пульсирующий и стационарный вдув, плоская и выпуклая поверхности, веерные и цилиндрические отверстия

Усложнение схем и конструкций воздушных систем конвективно-пленочного охлаждения турбины высокого давления газотурбинных двигателей и установок связано с необходимостью повышения их экономичности и энергоэффективности [1, 2]. Например, получены хорошие результаты при использовании веерных отверстий, так как в определенных режимных условиях значительно увеличилась эффективность пленочного охлаждения турбинных лопаток [3–5].

В связи с этим возникают ситуации, когда применение какого-либо известного положительного фактора для повышения эффективности охлаждения приводит к отрицательному результату. Подобное происходит в случае наложенных на поток охлаждающего воздуха регулярных пульсаций, положительный эффект от применения которых наблюдался во внутренних охлаждающих каналах турбинных лопаток. В то же время в конвективно-пленочной системе воздушного охлаждения турбинных лопаток, в которую поступает пульсирующий охладитель, нередко происходит снижение эффективности пленочного охлаждения по сравнению со стационарным вдувом.

Действительно, использование пульсирующего воздуха для внутреннего воздушного охлаждения позволяет значительно повысить интенсивность охлаждения Θ турбинных лопаток разрушением пограничного слоя в потоке охлаждающего воздуха и интенсификацией конвективного теплопереноса в пристенных течениях воздушных трактов. Однако при анализе публикаций по этой теме [6–10] выявлено, что в системах пленочного воздушного охлаждения с отверстиями в стенках турбинных лопаток для организации тепловых завес не всегда наблюдается положительный эффект от использования вторичного потока пульсирующего воздуха. Дело в том что при организации тепловых завес требуется стабильность образующейся за сечением вдува пленки. Такие факторы, как турбулентность основного или вторичного потока, угол вдува вторичного воздуха, параметр вдува и т. д., могут в ряде случаев значительно снижать эффективность пленочного охлаждения.

В настоящей статье обсуждаются результаты опытного сравнительного исследования эффективности пленочного охлаждения с пульсирующим вдувом на плоскую и выпуклую поверхности при варьировании угла вдува, параметра вдува и типа отверстий (веерных и цилиндрических).

Относительная кривизна выпуклой поверхности оценивалась симплексом $s_{\text{экр}}/R$, численное значение которого равно 0,00552. Здесь $s_{\text{экр}}$ – эквивалентная высота щели, определенная по пояску исследуемых отверстий; R – радиус кривизны охлаждаемой выпуклой поверхности.

Приведем диапазоны изменения основных геометрических и режимных параметров в экспериментах: числа Рейнольдса вторичного (вдуваемого) $Re_{\text{вт}} = (4 \dots 76 \cdot 10^3)$ и основного $Re_{\text{осн}} = 260 \cdot 10^3$ потоков воздуха; частота наложенных пульсаций вторичного потока воздуха $f = 14$ Гц; число Струхала $Sh = fd/w = 0,1 \dots 1$.

Эффективность пленочного охлаждения η записывается формулой

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

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

В задачах с тепловыми завесами определяющее влияние на значения η оказывают угол вдува α (рис. 1, в, з) и параметр вдува m :

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

где $\rho_{\text{вт}}$, $\rho_{\text{осн}}$ – плотность вторичного и основного потоков; $W_{\text{вт}}$, $W_{\text{осн}}$ – среднерасходные скорости вторичного и основного потоков; параметры вторичного потока определялись по входным сечениям отверстий.

Сравнительные опытные исследования влияния формы отверстий вдува на пленочное охлаждение плоской и выпуклой поверхностей при пульсирующем и стационарном режимах проводились на экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в работе [11]. При проведении опытов использовалось обратное (по сравнению с натурными условиями) направление теплового потока. Температура пленки определялась с помощью экспериментального метода с применением адиабатной пластины, на поверхности которой измерялась адиабатная температура стенки. Эффективность пленочного охлаждения на стационарном режиме вдува для цилиндрических и веерных отверстий обозначалась η_0 , в случае пульсирующего режима – η_f . Отличительной особенностью экспериментальной установки являлась возможность замены рабочих участков.

Схема плоского рабочего участка приведена на рис. 1, а, схема выпуклого постоянной кривизны рабочего участка – на рис. 1, б. Здесь: 1 – нижняя стенка; 2 – объект исследования; 3 – адиабатная пластина; 4 – тепловая завеса; 5 – верхняя стенка. Также показаны схемы цилиндрического (см. рис. 1, в) и веерного (см. рис. 1, з) отверстий. На рис. 1 приняты следующие обозначения: α – угол вдува вторичного потока воздуха в основной поток; $d = 5$ мм – диаметр отверстия; $t_{\text{цил}} = 10$ мм, $t_{\text{веер}} = 12$ мм – шаг между цилиндрическими и веерными отверстиями.

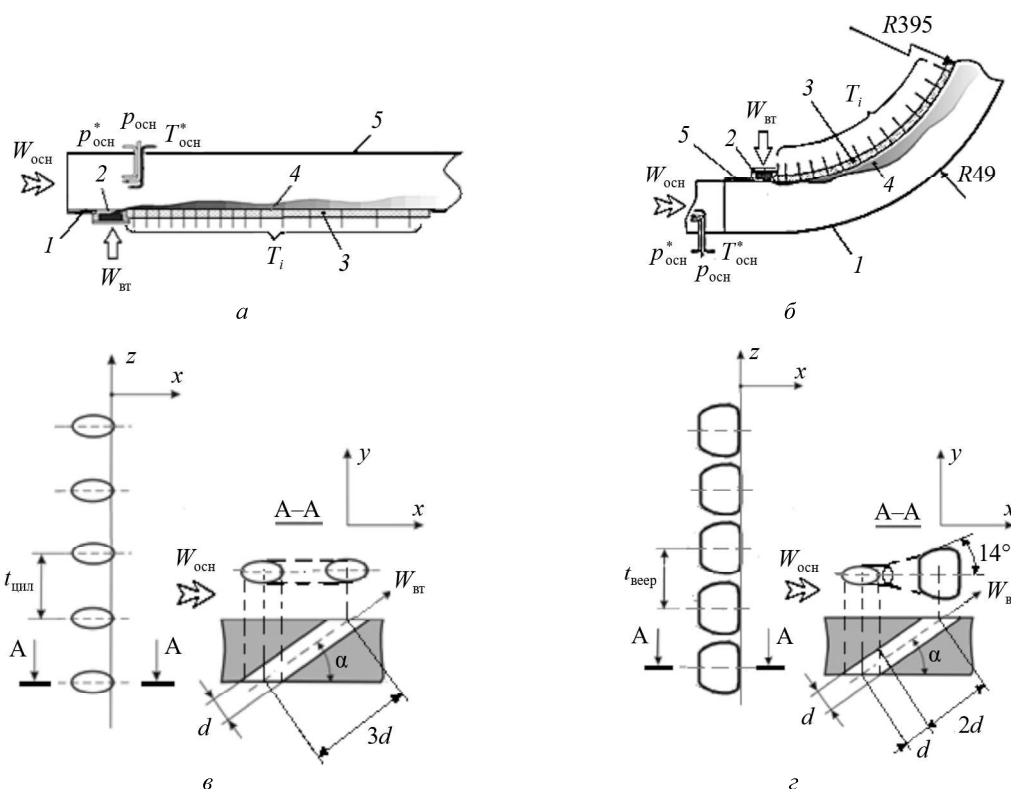


Рис. 1

При проведении экспериментов на обоих рабочих участках использовались одни и те же объекты исследования (см. рис. 1, а, б), выполненные в виде текстолитовых вкладышей, установленных перпендикулярно направлению движения основного потока воздуха и размещенных заподлицо с расположенной за ним адиабатной пластиной, которая препарировалась вдоль продольной плоскости симметрии шестнадцатью хромель-алюмелевыми термопарами. Использовалась плоская адиабатная пластина (см. рис. 1, а), которая устанавливалась на нижней стенке рабочего участка, и выпуклая постоянной кривизны (см. рис. 1, б) – на верхней стенке рабочего участка. Всего было исследовано три объекта с однорядным пояском цилиндрических (см. рис. 1, в) и три объекта с однорядным пояском веерных отверстий (см. рис. 1, г). В обоих случаях исследовались углы вдува $\alpha = 30; 45; 75^\circ$. При этом изменялись параметры вдува от оптимальной величины $m = 0,5$ до $m = 2,5$. Замеры параметров основного потока ($p_{\text{осн}}$, $p_{\text{осн}}^*$, $T_{\text{осн}}^*$) выполнялись с использованием трехканального пневмометрического прибора. Для сбора и обработки информации экспериментальная установка была оснащена современной системой измерений температуры, давления и расхода.

При анализе полученных результатов была использована традиционная терминология с названием характерных участков развития тепловой завесы за сечением вдува (начальный, переходный, основной). Эта терминология была принята при анализе результатов исследования щелевого вдува. При щелевом вдуве на начальном участке смешения значение $\eta = 1$, так как только вдуваемый вторичный поток охлаждающего воздуха в этом случае непосредственно за сечением вдува соприкасается с охлаждаемой поверхностью. На переходном участке по мере удаления от сечения вдува происходит характерная деформация профиля скорости. По мере удаления от сечения вдува профиль скорости изменяется: ступенчатый переходит к s-образному, в определенной мере – к стандартному. На основном участке смешения по мере увеличения относительного расстояния от сечения вдува x/s происходит дальнейшая стабилизация формы профиля – до стандартного. Характер переходного и основного участков смешения различен, в частности, по наклону графических зависимостей $\eta = f(x/d)$.

По результатам многочисленных экспериментов, при вдуве под малым углом ($\alpha = 30^\circ$) через ряд отверстий начальный участок для принятого в экспериментах относительного шага отверстий в ряду t/d отсутствует, поскольку отсутствуют условия для его формирования. Так, поскольку эффективность пленочного охлаждения характеризуется осредненными в ряду отверстий значениями η , то даже непосредственно за сечением вдува $\eta < 1$.

Согласно публикациям [6–10] наложение пульсаций на вдуваемый поток воздуха снижает эффективность тепловой завесы.

Рис. 2 иллюстрирует относительную эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности η_f/η_0 веерными и цилиндрическими отверстиями при угле вдува $\alpha = 30^\circ$.

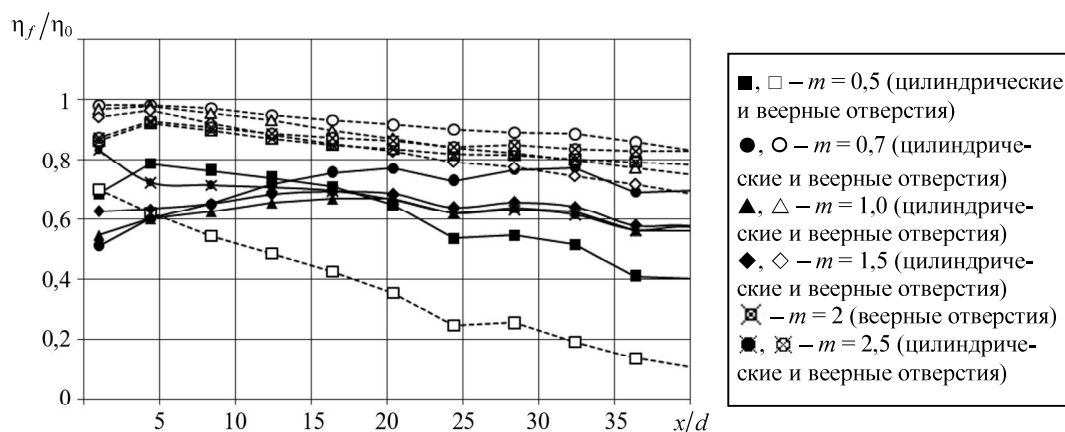


Рис. 2

Согласно графикам (см. рис. 2) вследствие пульсирующего вдува воздуха под углом 30° через веерные отверстия (за исключением параметра вдува $m=0,5$) на всем протяжении тепловой завесы снижается относительное значение эффективности пленочного охлаждения η_f/η_0 плоской поверхности (в диапазоне $0,88...0,95$ при $x/d=1$ и диапазоне $0,7...0,88$ при $x/d=37$), а при вдуве через цилиндрические отверстия – в диапазоне $0,5...0,82$ при $x/d=1$ и в диапазоне $0,4...0,7$ при $x/d=37$. Как видно, более значительное снижение эффективности тепловой завесы от наложенных на вторичный поток пульсаций наблюдается при вдуве через цилиндрические отверстия. Это объясняется тем, что при использовании данного типа отверстий увеличивается интенсивность массообмена между основным и вторичным потоками за сечением вдува. У цилиндрических отверстий кинетическая энергия вторичного потока за сечением вдува более высокая, чем у веерных, поэтому за цилиндрическими отверстиями массообмен между основным и вторичным потоками более интенсивен, чем за веерными отверстиями.

Представляют интерес данные о более интенсивном снижении относительного значения η_f/η_0 при пульсирующем вдуве вторичного потока на плоскую поверхность через веерные отверстия с параметром вдува $m=0,5$, где значение η_f/η_0 по мере удаления от сечения вдува снижается в диапазоне $0,7...0,15$. Это возможно объяснить очень низкими значениями кинетической энергии вторичного потока воздуха за диффузорным участком веерного отверстия при самом низком значении параметра вдува из исследованных в данной статье. В этих условиях, поскольку расход охлаждающего воздуха минимален, возможно полное разрушение образующейся за сечением вдува пленки.

При пленочном охлаждении выпуклой охлаждаемой поверхности (рис. 3) в одинаковых с плоской пластиной условиях проведения эксперимента при наложенных на вторичный поток пульсациях фиксируются на всем протяжении тепловой завесы более высокие значения η_f/η_0 при вдуве ($\alpha = 30^\circ$) через цилиндрические отверстия. Можно полагать, что в этом случае при высоких значениях кинетической энергии вдуваемого через цилиндрические отверстия вторичного потока проявляются консервативные свойства выпуклой поверхности, которые снижают интенсивность наложенных на поток пульсаций.

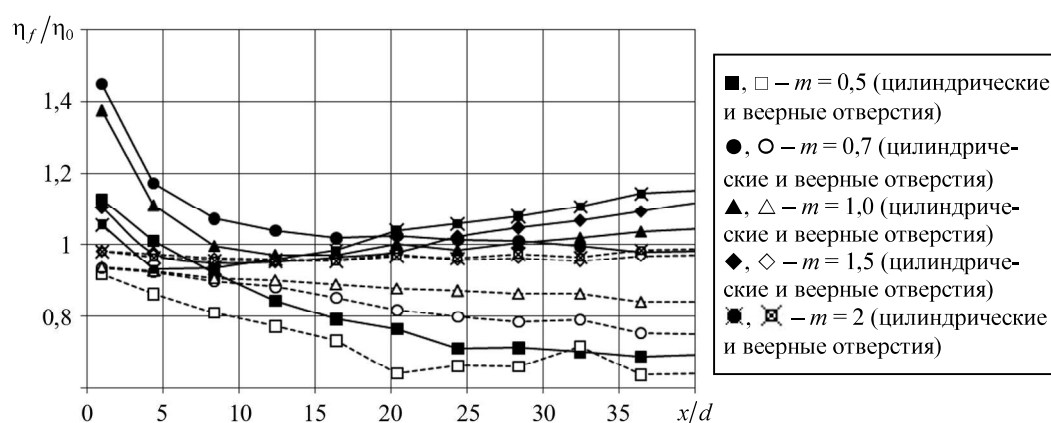


Рис. 3

При вдуве через веерные отверстия на выпуклую поверхность низкая кинетическая энергия вторичного потока за сечением вдува не способствует проявлению консервативного воздействия центробежных массовых сил выпуклой поверхности. Это приводит к незначительному снижению η_f/η_0 до $0,7...0,8$ и расположению опытных точек с веерными отверстиями ниже, чем при вдуве на выпуклую поверхность через цилиндрические отверстия.

Для цилиндрических отверстий параметр вдува $m=0,5$ в стационарных условиях является оптимальным, поэтому наложение на вторичный поток пульсаций в данном случае приводит к изменениям в гидродинамике тепловой завесы, снижающим значения η_f/η_0 .

При стационарном вдуве через цилиндрические отверстия под углом 45° (рис. 4) непосредственно за сечением вдува ($x/d \approx 1$) на плоской поверхности возникают отрывные явления с образованием крупномасштабных вихревых структур. В результате понижается значение η_0 . При взаимодействии со вторичным пульсирующим потоком снижается интенсивность этих самоорганизующихся вихрей. В результате понижается интенсивность массообмена между основным и вторичным потоками с соответствующим повышением значения η_f/η_0 . Так, относительное значение η_f/η_0 для цилиндрических отверстий и исследованного диапазона изменения параметра вдува при $x/d \approx 1$ изменяется в пределах $1,22 \dots 1,72$, а при $x/d \approx 3$ – в диапазоне $0,6 \dots 1,02$.

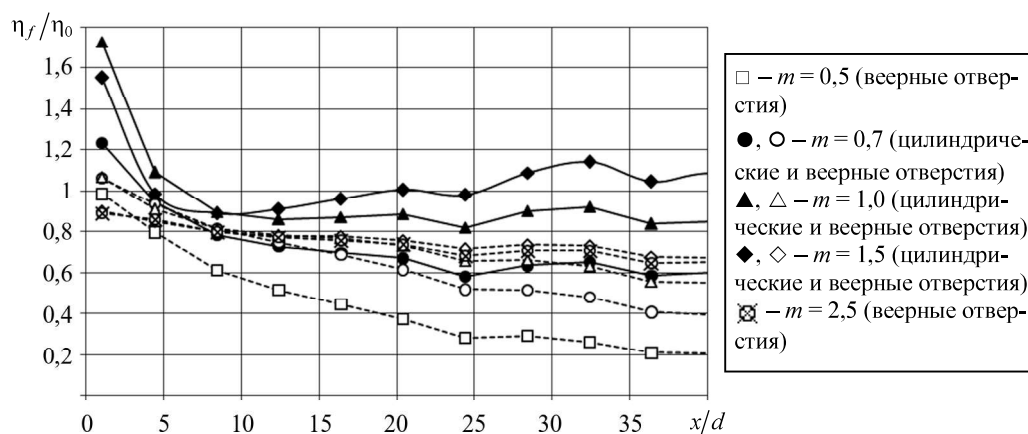


Рис. 4

В случае расположенных на плоской поверхности веерных отверстий (см. рис. 4) ввиду наличия у них диффузорных участков генерируются значительно менее интенсивные самоорганизующиеся крупномасштабные вихревые структуры, чем при использовании цилиндрических отверстий. Кроме этого, при пульсирующем вдуве под углом 45° кинетическая энергия пульсирующего вдува в диффузорном участке веерного отверстия также из-за диффузорных участков существенно ниже, чем за цилиндрическими отверстиями. По этим двум причинам при $x/d \approx 1$ (см. рис. 4) значения η_f/η_0 находятся в пределах $0,9 \dots 1,05$, а при $x/d = 3,7$ – в пределах $0,2 \dots 0,7$.

При пульсирующем вдуве под углом 45° через цилиндрические отверстия непосредственно за сечением вдува ($x/d \approx 1$) на выпуклую поверхность относительное значение η_f/η_0 изменяется в диапазоне $1,1 \dots 1,55$ (рис. 5), а при $x/d = 3,7$ – в диапазоне $1,88 \dots 1,95$. Для веерных отверстий при $x/d \approx 1$ значение η_f/η_0 изменяется в диапазоне $0,9 \dots 1,05$, а при $x/d = 3,7$ – в диапазоне $1,08 \dots 1,24$.

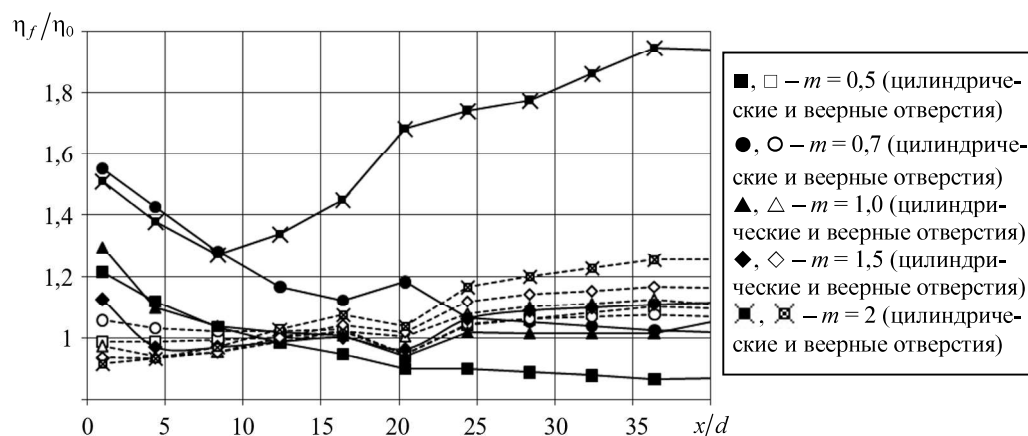


Рис. 5

Таким образом, при вдуве вторичного потока через цилиндрические отверстия, которым свойственна сравнительно высокая кинетическая энергия за сечением вдува, при практически оптимальном параметре вдува ($m = 0,7$) наблюдается положительное влияние наложенных на вторичный поток пульсаций. Это объясняется тем, что вторичный поток, имеющий в рассматриваемом случае высокий импульс, в определенной мере подавляет процессы организации и интенсификации крупномасштабных вихревых структур за сечением вдува. Благодаря этому положительному фактору снижается интенсивность массообмена и повышается значение η_f/η_0 .

На основном участке смешения при обтекании выпуклой поверхности ($8 > x/d > 37$) (см. рис. 5) при вдуве через веерные отверстия под углом 45° практически во всем исследованном диапазоне изменения параметра вдува значение η_f/η_0 изменяется в диапазоне $0,95 \dots 1,25$, в случае цилиндрических отверстий η_f/η_0 имеет значение $0,9 \dots 1,1$. В связи с этим можно полагать, что на основном участке смешения выпуклой поверхности консервативное воздействие выпуклой поверхности не проявляется.

При вдуве через цилиндрические отверстия (с высоким параметром вдува $m = 2$) согласно результатам экспериментов наблюдается значительное, практически двукратное ($1,95$) увеличение η_f/η_0 (см. рис. 5), что заметно отличается от массива полученных опытных данных с другими параметрами вдува через цилиндрические отверстия. Полагаем, что при высоких значениях параметра вдува и расхода охлаждающего воздуха может проявляться консервативное воздействие центробежных массовых сил, которые снижают интенсивность воздействия самоорганизующихся вихревых структур.

Как следует из рис. 4–7, при вдуве через цилиндрические отверстия под углами 45 и 75° непосредственно за сечением вдува возникают отрывные явления, способствующие образованию крупномасштабных вихревых структур, при этом на переходном участке тепловой завесы наблюдаются различия в значениях η_f/η_0 . Так, на переходном участке (по мере увеличения x/d в диапазоне $1 \dots 4$) на плоской охлаждаемой поверхности величина η_f/η_0 снижается при 45° в диапазоне $1,7 \dots 1,1$ в $1,5$ раза, а при 75° – в диапазоне $1,85 \dots 1,4$ в $1,3$ раза. В то же время на выпуклой поверхности при 45° значение η_f/η_0 на обоих характерных участках снижается в диапазоне $1,45 \dots 1,3$ в $1,1$ раза.

Проанализируем относительную эффективность пленочного охлаждения плоской (рис. 6) и выпуклой (рис. 7) поверхностей η_f/η_0 веерными и цилиндрическими отверстиями при угле вдува $\alpha = 75^\circ$.

По результатам выполненной визуализации тепловых завес при вдуве под углами 45 и 75° в исследованных диапазонах режимных параметров можно предположить, что выпуклая охлаждаемая поверхность практически не реагирует на исследованные «отрывные» углы вдува по причине значительного удаления траекторий вдуваемых струй от обтекаемой поверхности. Однако в ряде случаев следует учитывать консервативность центробежных массовых сил при пленочном охлаждении выпуклых поверхностей.

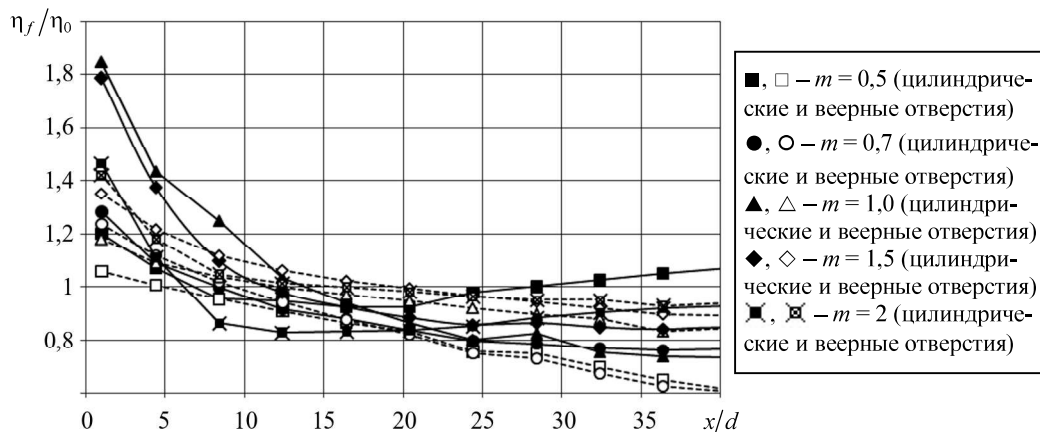


Рис. 6

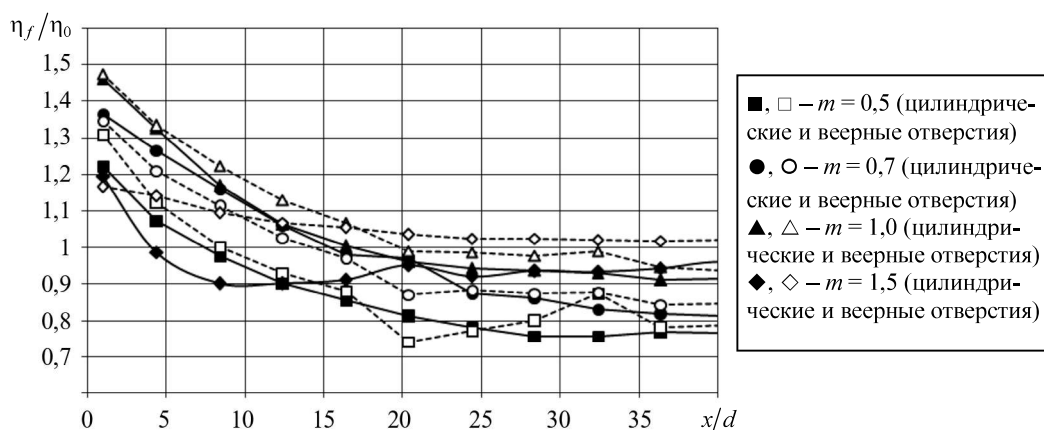


Рис. 7

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

При вдуве на плоскую пластину через веерные и цилиндрические отверстия под углом 30° значения эффективности пленочного охлаждения характеризуются неравенством $\eta_f/\eta_0 < 1$ на всем протяжении тепловой завесы. При этом опытные точки веерных отверстий, кроме $m = 0,5$, расположены выше точек с цилиндрическими отверстиями. Причина в уменьшении интенсивности наложенных на вторичный поток пульсаций при прохождении ими диффузорных участков веерных отверстий, что снижает за сечением вдува массообмен между основным и вторичным потоками. При использовании веерных отверстий при параметре вдува $m = 0,5$ снижаются значения η_f/η_0 до 0,15, что связано с очень низкой кинетической энергией вдуваемого потока, из-за чего разрушается образующаяся пленка.

При пленочном охлаждении выпуклой поверхности посредством наложенных на вторичный поток пульсаций, в отличие от плоской пластины, при вдуве под углом 30° на всем протяжении тепловой завесы обеспечиваются более высокие значения η_f/η_0 в случае вдува через цилиндрические отверстия. В отличие от плоской поверхности, благодаря консервативным свойствам выпуклой поверхности при сравнительно высоких значениях кинетической энергии вдуваемого потока повышается значение η_f/η_0 снижением интенсивности наложенных на поток пульсаций.

Наиболее интенсивное уменьшение относительного значения эффективности тепловой завесы η_f/η_0 при пульсирующем вдуве вторичного потока под углами вдува 30 и 45° на плоскую поверхность происходит через веерные отверстия с параметром вдува $m = 0,5$, где значение η_f/η_0 по мере удаления от сечения вдува снижается в диапазоне $0,7 \dots 0,15$ при 30° и в диапазоне $0,98 \dots 0,20$ при 45° .

При вдуве на выпуклую поверхность через цилиндрические отверстия с параметром вдува $m = 2$ при угле вдува $\alpha = 45^\circ$ в результате экспериментов получено существенное, практически двукратное (1,95) увеличение η_f/η_0 , что значительно отличается от массива полученных опытных данных с веерными и цилиндрическими отверстиями при других исследованных параметрах вдува.

При вдуве под углом 45 и 75° на переходном участке смешения от $x/d \approx 1$ до $x/d \approx 4$ интенсивность снижения значения η_f/η_0 зависит от формы охлаждаемой поверхности: на плоской поверхности величина η_f/η_0 снижается при 45° в 1,5 раза, а при 75° – в 1,3 раза. На выпуклой поверхности при 45 и 75° значение η_f/η_0 снижается всего в 1,1 раза. Стабильность значений η_f/η_0 на переходном участке смешения при охлаждении выпуклой поверхности связана с большим удалением от нее траекторий вдуваемых струй и с консервативным воздействием центробежных массовых сил на пристенное течение около выпуклой поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00207, <https://rscf.ru/project/22-19-00207/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иноземцев А.А. и др.* Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: в 5 т. М.: Директ-Медиа, 2022. Т. 2. 368 с.
2. *Данильченко В.П.* Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 620 с.
3. *Тихонов А.С., Самохвалов Н.Ю.* Анализ использования профилированных отверстий перфорации для повышения качества пленочного охлаждения спинки сопловых лопаток турбин // Вестник УГАТУ. 2012. № 5 (50). С. 20–27.
4. *Ou S., Rivir R.B.* Shaped-Hole Film Cooling with Pulsed Secondary Flow // Proc. of the ASME Turbo Expo: Power Land, Sea, Air, May 8–11, 2006, Barcelona, Spain. Article № GT2006-90272.
5. *Muldoon F., Acharya S.* DNS Study of Pulsed Film Cooling for Enhanced Cooling Effectiveness // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52. Iss. 13–14. P. 3118–3127.
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 // Journal of Turbomachinery. 2006. Vol. 128. Iss. 3. P. 564–571.
7. *Muldoon F., Acharya S.* Computations of Pulsed Film Cooling // Proc. of the ASME Turbo Expo: Power Land, Sea Air, May 14–17, 2007, Montreal, Canada. Article № GT2007-28156.
8. *Lalzel G., Sultan Q., Fenot M., Dorignac E.* Experimental Convective Heat Transfer Characterization of Pulsating Jet in Cross Flow: Influence of Strouhal Number Excitation on Film Cooling Effectiveness // Journal of Physics: Conference Series. 2012. Vol. 395. Article № 012043.
9. *Вятков В.В. и др.* Особенности пленочного охлаждения окрестности входных кромок соплового аппарата первой ступени в условиях входной неравномерности потока // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 2. С. 104–110.
10. *Ремизов А.Е. и др.* Совершенствование рабочего процесса в охлаждаемом сопловом аппарате турбины с несимметричными торцевыми поверхностями // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 119–124.
11. *Ильинков А.В. и др.* Эффективность тепловой завесы при вдуве пульсирующего потока воздуха через однорядные пояски отверстий // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 139–145.

Поступила в редакцию 2.05.24

После доработки 6.05.24

Принята к публикации 6.05.24

Film Cooling Efficiency on a Convex and Flat Surface in Conditions of Pulsed Blowing through Fan-Shaped and Cylindrical Holes

A.V. IL'INKOV¹, A.V. SHCHUKIN¹, V.V. TAKMOVTSSEV¹, AND A.V. STARODUMOV²

¹ Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

The study focuses on the effect of pulsed blowing on the film cooling effectiveness. Cylindrical and fan-shaped holes on a convex and flat surface are considered in this regard. The blowing angles of 30, 45, 75 deg are investigated. To analyze the obtained results, the action of centrifugal mass forces on a convex surface, diffuser-type effects in fan-shaped dimples, and kinetic energy of thermal shield behind the blowing coordinate are considered. Depending on the examined conditions, the forced pulsation superimposed on the secondary flow are shown to either increase or decrease the effectiveness of thermal shield on the cooled surface.

Film cooling, pulsed and stationary blowing, flat and convex surfaces, fan-shaped and cylindrical holes