

УДК 536.24

Численное исследование влияния размещения выступов перед соплом на эффективность пленочного охлаждения с различными горизонтальными углами подачи охладителя*

Д. Чжэн^{1,2}, С. Ван¹, Ц. Юань¹

¹Университет Сиань Цзяотун, Сиань, Китай

²Университет Торонто, Торонто, Канада

E-mail: xinjun_wang@outlook.com

Проведено численное исследование метода улучшения эффективности пленочного охлаждения путем размещения выступа перед соплом с горизонтальным углом подачи охладителя. Исследовано восемь случаев с различной геометрией, включающих углы подачи 15°, 30° и 45° в горизонтальной плоскости, и варианты размещения выступов на расстояниях 5, 10 и 15 мм. Изучено влияние изменения угла подачи охладителя и расстояния до выступа на эффективность пленочного охлаждения. Также для сравнения представлены случаи пленочного охлаждения плоской пластины без модификаций — только с горизонтальным углом и только с выступом. Выполнена оценка эффективности пленочного охлаждения для отношения плотностей 0,97 и при значениях коэффициента вдува в интервале 1–2. Полученные результаты показали, что эффективность пленочного охлаждения через отверстия с ненулевым горизонтальным углом к основному потоку существенно улучшается благодаря размещению выступа выше по течению, особенно для области, расположенной ниже отверстий. Для этой геометрии наблюдаются захват потока охладителя и наличие парных вихрей со встречным вращением. Эффективность пленочного охлаждения существенно улучшается благодаря совместному эффекту захвата охладителя и вращающихся парных вихрей. Кроме того, эффективность пленочного охлаждения зависит от угла подачи охладителя и от расстояния до выступа. При увеличении угла подачи повышается эффективность пленочного охлаждения в поперечном потоке направлении. Увеличение расстояния от сопла до выступающего выступа понижает адиабатическую эффективность охлаждения.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, выступы выше по течению, сложные углы, адиабатическая эффективность охлаждения.

Введение

Одним из подходов к повышению эффективности газовых турбин является увеличение температуры газового потока на входе в турбину. Как правило, рабочая температура газовой турбины выше, чем способен выдержать материал, из которого она изготовлена. Для борьбы с воздействием высокой температуры газа применяются различные методы охлаждения, среди которых можно отметить теплозащитное покрытие, внутреннее охлаждение элементов турбины, пленочное охлаждение, инжекционное охлаждение.

* Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку со стороны Совета Китая по Стипендиям (CSC).

Для защиты рабочей лопатки первой ступени от воздействия горячего потока широко применяется метод организации пленочного охлаждения. В связи с этим в последние годы возрос интерес к повышению его эффективности.

При пленочном охлаждении хладагент истекает из компрессора и вытекает через специальные отверстия, расположенные на защищаемой поверхности. Часть охладителя неизбежно попадает в основной поток, и происходит интенсивное перемешивание охладителя с основным потоком. В работе [1] отмечалось, что при интенсивном перемешивании этих потоков возникают четыре вихря, что снижает результативность охлаждения. В работе [2] детально изучалась проблема влияния вихревых структур на эффективность пленочного охлаждения. Было продемонстрировано, что простое изменение формы отверстий для подачи охладителя может понизить генерацию парных вихрей со встречным вращением (ПВВВ; в англоязычной литературе — kidney vortices (из-за характерной формы)), что в результате повышает эффективность пленочного охлаждения. В работе [3] было проведено численное моделирование характеристик потока при пленочном охлаждении через отверстия с пятью различными формами. Были рассмотрены отверстия цилиндрической формы, отверстия с расширением спереди, с боковым расширением, с особой геометрией на входе, а также отверстия параболической формы. Моделирование показало, что структуры типа ПВВВ, отрицательно влияющие на пленочное охлаждение, ослаблялись для случая отверстий с увеличенной выходной площадью.

Располагая знанием о связи формы отверстий с эффективностью пленочного охлаждения, многие исследователи пытались достичь результата за счет выбора геометрии отверстий [4, 5]. В работе [6] были представлены результаты измерений для трех увеличенных масштабных моделей поверхности с пленочным охлаждением с различными типами отверстий для подачи охладителя: простой цилиндрической формы, секторной геометрией (веерообразная форма) и секторной геометрией с уклоном назад. Авторы отметили, что охлаждение для поверхности ниже по течению от отверстий существенно улучшается для вариантов отверстий с расширением (особенно при высоком коэффициенте вдува). Модельные отверстия с секторной геометрией и уклоном назад обеспечивают лучшее охлаждение, чем отверстия с секторной геометрией. Это проявляется в повышении эффективности пленочного охлаждения, усредненной в поперечном направлении. Авторы публикаций [7, 8] разработали инновационную геометрию отверстий, известную как конфузурная щель (converging slot hole). Исследования показали, что тепловая эффективность отверстий такого класса близка к эффективности охлаждающих отверстий с секторной геометрией, но при этом аэродинамическое трение снижается. Позже эти результаты были подтверждены численным моделированием [9]. Кроме того, в ряде статей описывалось охлаждение с помощью однорядных отверстий и вихрегенераторов, расположенных выше по течению [10–14]. Такие конфигурации также направлены на уменьшение отрицательного эффекта структур ПВВВ на пленочное охлаждение.

Кроме модификации геометрии отверстий для улучшения пленочного охлаждения используется концепция применения сопел с ненулевыми горизонтальными углами подачи охладителя по отношению к направлению основного потока. В работе [15] экспериментально изучалась эффективность пленочного охлаждения для круглых отверстий и отверстий с расширяющимся выходом при горизонтальных углах, равных 60° , на тестовой плоской пластине. Исследования показали, что все геометрические модели обеспечивают близкую максимальную эффективность (усредненную по площади) при низком отношении импульсов двух потоков. Однако отверстия с простой геометрией или с расширенным выходом и с ненулевыми горизонтальными углами подачи охладителя обеспечивают существенно более высокую эффективность охлаждения при высоком

отношении импульсов. В работе [16] измерялся коэффициент теплопереноса для случая одиночного ряда отверстий для вариантов круглых отверстий и отверстий с расширением при горизонтальном угле 60° . Результаты исследований показали, что сопла с большим углом подачи оказывают слабое воздействие на скорость теплообмена при низком относительном импульсе струи, но при высоком относительном импульсе такие отверстия существенно влияют на теплообмен. В работе [17] выполнялись эксперименты по нахождению двумерных распределений поля температур в области ниже по течению от набора сопел горизонтальными углами подачи (для случая подачи от внутреннего поперечного течения). Показано, что для струй охладителя, которые создаются поперечным потоком, имеет место лучшее поперечное распространение вследствие формирования восходящего потока в области ниже сопла.

Хотя применение сопел с горизонтальным углом способствует эффективности пленочного охлаждения, однако выигрыш по продольному растеканию и однородности струи получается довольно ограниченный. Для улучшения последних факторов многие исследователи применяли способ размещения выступа выше по течению от отверстия. Эта инновационная концепция впервые была предложена в публикации [18]. Впоследствии для этой геометрии были проведены эксперименты [19, 20] по измерению аэродинамического сопротивления и эффективности адиабатического охлаждения. Полученные результаты продемонстрировали, что такие выступы могут улучшить адиабатическую эффективность охлаждения за счет улучшения растекания струи охладителя, но при этом неизбежно возрастает аэродинамическое сопротивление. В работе [21] проводилось численное моделирование по оценке воздействия неоднородного по высоте поперечного выступа на эффективность пленочного охлаждения. Исследование показало, что в этом случае продольное растекание охлаждающей струи уменьшается из-за ее отрыва. Кроме того, высота препятствия, расположенного выше по течению, имеет сильное влияние на эффективность охлаждения. В работах [22, 23] проводилось численное моделирование влияния выступов различной формы на эффективность пленочного охлаждения. Моделирование показало, что наименьшее аэродинамическое сопротивление характерно для выступа волнообразной формы, а эффективность охлаждения была наивысшей для выступа негладкой формы. В работе [24] была предложена инновационная геометрия выступа, расположенного выше по течению от сопла секторной формы. Данная геометрия благодаря градиентам давления, возникающим из-за особой геометрии выступов, улучшила продольное растекание охлаждающей струи. В работе [25] изучалось влияние выступа на эффективность пленочного охлаждения. Было показано, что выступы меньшей ширины повышают эффективность охлаждения.

Все вышеуказанные работы были направлены на улучшение эффективности пленочного охлаждения при минимальном расходе охладителя. Усилия многих исследователей были направлены на разработку модификаций отверстия для охладителя (изменение его геометрии) с целью повышения эффективности пленочного охлаждения с учетом уменьшения импульса струи охладителя в вертикальном направлении. Однако в процитированных работах не рассматривалась возможность совместного использования подачи охладителя под горизонтальным углом и размещения выступа выше сопла для улучшения характеристик пленочного охлаждения. В настоящей работе рассматривается проблема пленочного охлаждения через сопла с горизонтальными углами. Для улучшения пленочного охлаждения применены и ненулевые горизонтальные углы подачи и выступы выше по течению. Цель работы — изучение эффективности совместного применения этих двух приемов для улучшения эффективности пленочного охлаждения и механизма этого эффекта. В работе проводилось численное моделирование для разных величин углов и расстояний от выступов.

1. Схема расчета и численный метод

1.1. Схема расчета

В целях демонстрации преимуществ новой геометрии охлаждаемой поверхности рассмотрим для сравнения случаи пленочного охлаждения на плоской пластине (вариант 1), на пластине с горизонтальным углом (вариант 2) и случай охлаждения пластины с выступами, расположенными выше по течению (вариант 3). На рис. 1 показан вид расчетной области. На рис. 2 приведена схема отверстия с горизонтальным углом подачи охладителя. Как видно из рис. 1, охладитель, выходящий из накопительной камеры, инжектируется в основной поток через круглое отверстие с горизонтальным углом. Начало координат привязано к переднему краю выхода отверстия. Диаметр D сопла охладителя составляет 10 мм, отношение длины к диаметру отверстия — 3,5. Сопло имеет наклон 30° к направлению основного потока в плоскости $x-z$ и горизонтальный угол к основному течению в плоскости $x-y$. Расстояние между центрами соседних отверстий составляет $3D$, что соответствует ширине расчетной области. Были протестированы восемь геометрических параметров для различных выступов и величин горизонтальных углов (см. табл. 1). Хотя расстояния до выступов были различны для всех восьми вариантов, форма и размеры этих выступов оставались неизменными. Их сечение составляло $2 \times 3 \text{ мм}^2$ и длина — 30 мм в поперечном направлении.

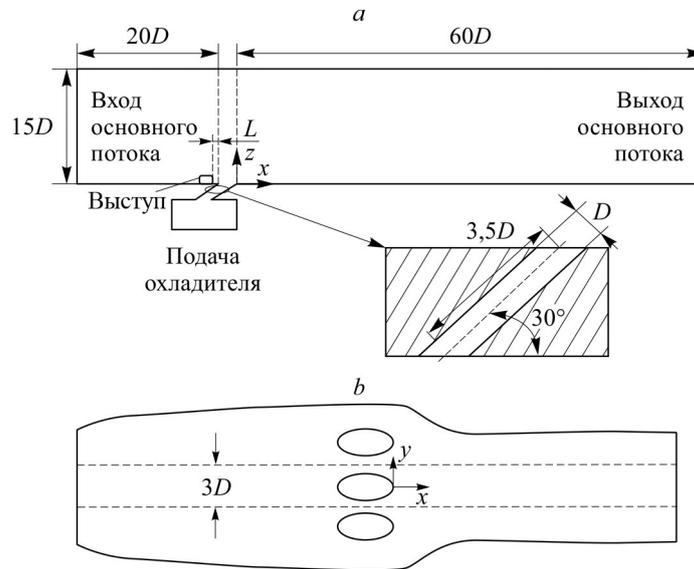


Рис. 1. Расчетная область.
Вид сбоку (a) и сверху (b).

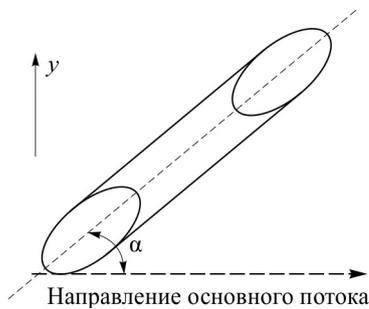


Рис. 2. Схема сопла с горизонтальным углом.

Таблица 1
Параметры для различных вариантов моделирования

Вариант	Горизонтальный угол сопла (α), град	L , м
1	0	Нет выступа
2	30	Нет выступа
3	0	10
4	30	10
5	30	5
6	30	15
7	15	10
8	45	10

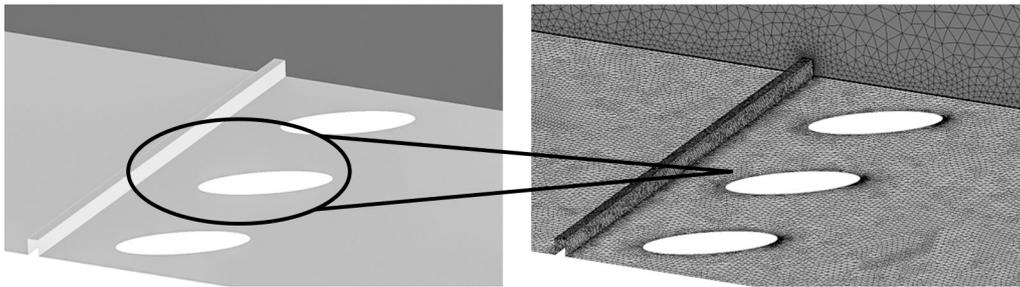


Рис. 3. Схема для отдельной части вычислительной сетки.

В табл. 1 приведены параметры, используемые для различных вариантов моделирования. Для вариантов 1–3 моделировалось пленочное охлаждение соответственно для плоской пластины, для геометрии с горизонтальным углом подачи 30° и геометрии с выступом выше по течению от отверстия. В варианте 4 реализовано пленочное охлаждение с выступом и углом 30° . Варианты 5 и 6 имеют похожие геометрии с вариантом 4. Разница в вариантах 4–6 заключается только в величине расстояния до выступа L . Различия между вариантами 7, 8 и вариантом 4 только в величине горизонтального угла отверстий. Другие размеры для описания области моделирования можно видеть на рис. 1, 2 и в табл. 1. Общая схема области моделирования и часть вычислительной сетки для отверстия по варианту 4 показаны на рис. 3. Для вычислительной области были применены неструктурированные сетки из ячеек в виде тетраэдров. Ячейки сетки уменьшаются вблизи стенки, выступа и возле отверстий. Кроме того, сетки были протестированы с помощью проверочного расчета, приводимого ниже.

1.2. Граничные условия

Результаты моделирования являются стационарными решениями, полученными с помощью коммерческой программы CFX. Для разрешения членов уравнения, отражающих конвекцию и турбулентность, применялась дискретизация высокого порядка. Для всех переменных среднеквадратичные невязки поддерживались ниже чем 10^{-6} . Для уверенности в сходимости вычислительного процесса отслеживалась температура для различных мест в зоне охлаждения. Условия для границ вычислений приведены в табл. 2. Рабочее тело основного потока выбрано в виде идеального газа (воздуха) при температуре T_m , равной 298,15 К, и при скорости u_m , равной 15 м/с. Охладитель — также идеальный газ (воздух) при температуре T_c , равной 318,15 К. Начальная интенсивность турбулентности потока была задана на уровне 2 %. Отношение плотности охладителя (DR) к основному течению принято равным 0,97. На входе в сопло пленочного охлаждения задается массовый расход, который обеспечивает коэффициент вдува M равным 1, 1,5 и 2. Условие на выходе — атмосферное давление. На двух боковых стенках отверстия для подачи охладителя в поперечном направлении заданы граничные условия симметрии. Другие стенки предполагались адиабатическими поверхностями с условием прилипания.

Таблица 2

Граничные условия

Температура основного течения на входе, К	298,15
Скорость основного течения на входе, м/с,	15
Турбулентность основного течения на входе, %	2
Статическое давление основного течения на выходе, атм	1
Температура охладителя на входе, К	318,15
Отношение плотности вторичного потока к основному	0,97
Коэффициент вдува	1, 1,5, 2

1.3. Представление данных

Все приведенные ниже уравнения необходимы для вычисления эффективности пленочного охлаждения. Обычная адиабатическая эффективность охлаждения задается выражением

$$\eta = (T_{aw} - T_m) / (T_c - T_m), \quad (1)$$

где T_{aw} , T_m и T_c — температуры адиабатической стенки, основного течения и охладителя соответственно.

Коэффициент полных потерь давления может быть записан как

$$C_p = \frac{p - p_1}{\rho_1 \cdot u_1^2 / 2}, \quad (2)$$

где p и p_1 — локальное статическое давление и статическое давление на выходе, ρ_1 и u_1 — плотность и скорость на выходе.

1.4. Чувствительность к разрешению сетки и верификация

В работе проводилось исследование сходимости по сетке. Результаты численного моделирования для варианта 4 на четырех сетках с различным числом ячеек приведены на рис. 4. Показано, что по достижении числа ячеек 5,5 миллионов дальнейшее увеличение их количества ничего не меняет. Таким образом, была выбрана сетка из 5,5 миллионов ячеек для моделирования по варианту 4. Для остальных геометрий были выбраны похожие условия, но соответствующие им числа не отражены на графиках. Число ячеек для вариантов расчетов 1–8 соответственно равнялось 5,06, 5,19, 5,31, 5,50, 5,45, 5,61, 5,62 и 5,47 миллионов.

Для проверки адекватности численного моделирования был проведен тестовый расчет. В качестве проверочного теста выполнялось моделирование пленочного охлаждения на плоской пластине и пластине с выступом. На рис. 5 и 6 представлены результаты моделирования для этих вариантов в сравнении с результатами работы [26]. На рис. 5 показаны экспериментальные данные по адиабатической эффективности охлаждения (на центральной линии) и результаты численного моделирования по четырем моделям турбулентности, включая модели $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, $k-\omega$ и SST (Shear Stress Transport). Отметим, что все модели турбулентности правильно предсказывают тенденцию и характер изменения эффективности охлаждения в направлении по потоку. Кроме того, результаты, полученные с применением $k-\varepsilon$ модели турбулентности, лучше согласуются с экспериментальными данными в предсказании адиабатической эффективности охлаждения по сравнению с другими моделями турбулентности. На рис. 6 показаны экспериментальные данные по эффективности охлаждения в направлении по течению и результаты вычислений по $k-\varepsilon$ модели турбулентности при $M = 0,5$. Как видно из кривых на рис. 6, $k-\varepsilon$ модель турбулентности хорошо описывает распределение адиабатического коэффициента охлаждения в направлении по потоку. Кроме того, проверка пленочного охлаждения в геометрии с выступом, проведенная в работе [22], подтверждает, что $k-\varepsilon$ модель турбулентности вполне подходит для вычисления пленочного охлаждения

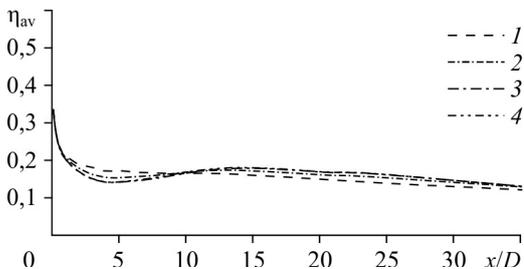


Рис. 4. Сравнение адиабатической эффективности охлаждения для четырех размеров сеток. Количество ячеек: 3890000 (1), 4650000 (2), 5500000 (3), 6010000 (4).

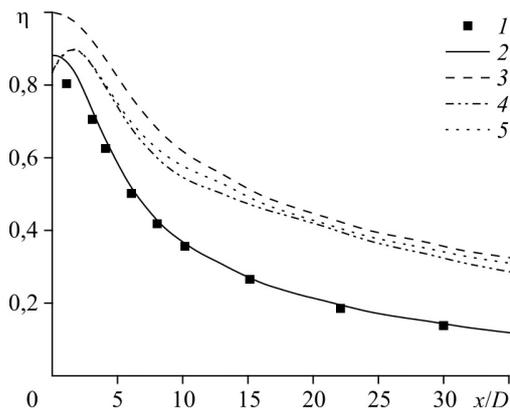


Рис. 5. Сравнение данных компьютерного моделирования с экспериментальными данными [26] для различных моделей турбулентности при параметре вдува $M = 0,5$. Экспериментальные данные [26] (1) и результаты расчета по моделям турбулентности $k-\varepsilon$ (2), RNG $k-\varepsilon$ (3), $k-\omega$ (4) и SST (5).

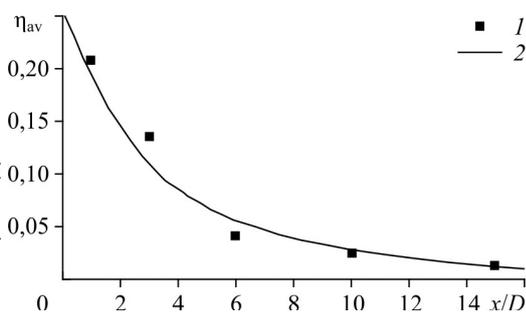


Рис. 6. Сравнение данных компьютерного моделирования с экспериментальными данными [26] при $M = 0,5$.

Экспериментальные данные [26] (1) и результаты вычислений по $k-\varepsilon$ модели турбулентности (2).

в конфигурации с выступами. Таким образом, благодаря способности к надежным предсказаниям $k-\varepsilon$ модель турбулентности была принята для данного численного моделирования.

2. Результаты и обсуждение

Цель настоящей работы — выявление механизма пленочного охлаждения для случаев с выступом выше по течению и с горизонтальным углом подачи охладителя. Впервые исследуется совместное влияние выступа и угла подачи на эффективность пленочного охлаждения.

2.1. Влияние выступов, расположенных выше по течению от отверстий

На рис. 7 показано взаимодействие между течением пограничного слоя и струями охладителя для вариантов 1–4 и при $M = 1,5$. Для вариантов 3 и 4 охладитель захватывается в области за выступом, в то время как наличие захвата для случаев 1 и 2 неочевидно.

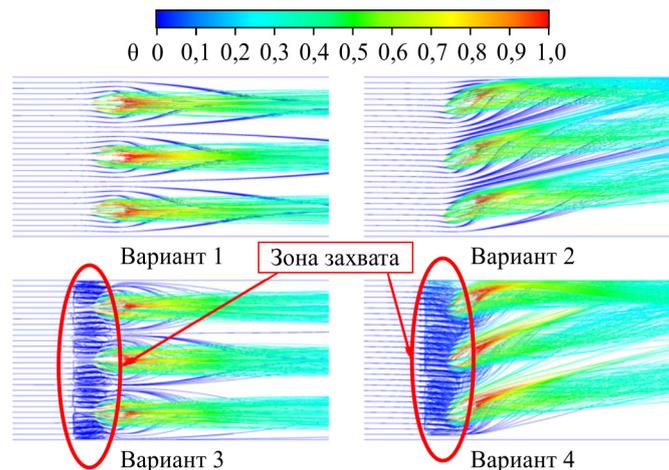


Рис. 7. Линии тока с градацией цветов по безразмерной температуре при $M = 1,5$.

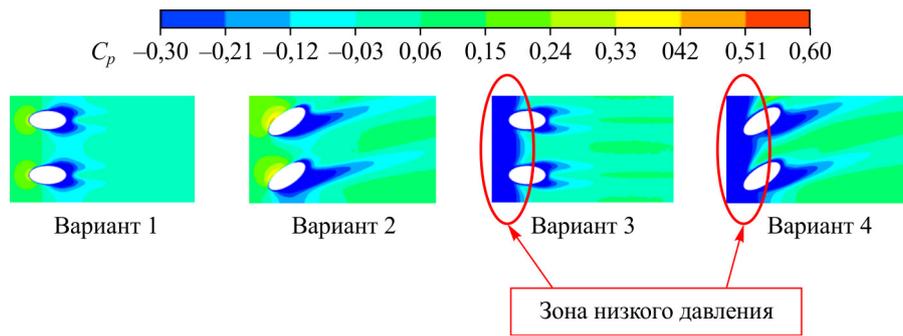


Рис. 8. Изолинии безразмерного коэффициента статического давления.

Это объясняется тем, что в вариантах 3 и 4 выступ приподнимает основное течение, в результате чего создается область низкого давления ниже по течению от выступа (см. рис. 8). Пониженное давление способствует затягиванию охладителя в эту область. Захват охладителя улучшает его продольное растекание, что существенно усиливает эффективность пленочного охлаждения. В вариантах 1 и 2 основное течение протекает плавно, без отрыва от выступа. Оно занимает область выше от сопла подачи, что создает высокое давление в этой области, из-за которого в нее попадает малое количество охладителя. На рис. 7 видно, что в варианте 4 больше охладителя затягивается в зону низкого давления, чем в варианте 3. Это объясняется тем, что наличие горизонтального угла уменьшает z -компоненту импульса потока охладителя, что облегчает затягивание охладителя в зону низкого давления.

На рис. 9 показаны изолинии безразмерной температуры и вектора скорости на плоскости $y-z$ при $x/D = 1,5$. Здесь видны структуры ПВВВ для вариантов 1 и 3. Центр такой структуры в варианте 3 находится ниже, чем для варианта 1, а профиль безразмерной температуры оказывается более однородным, чем для варианта 1. Охладитель затягивается в область низкого давления, что уменьшает z -компоненту импульса потока охладителя. Вследствие этого охладитель в варианте 3 распределяется более равномерно, чем в варианте 1, а центр ПВВВ-вихрей в варианте 3 находится ниже, чем в варианте 1. Сопоставление графиков на рис. 9 показывает, что по сравнению с вариантами 1 и 3 ПВВВ для вариантов 2 и 4 претерпевают изменения благодаря наличию в пластине сложных углов. Горизонтальный угол способствует изменению направления впрыска

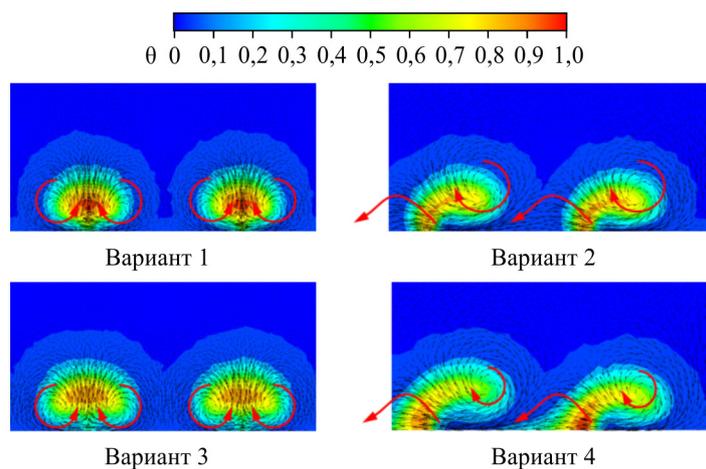


Рис. 9. Изолинии безразмерной температуры и вектора скорости на плоскости $y-z$ при $x/D = 1,5$.

Рис. 10. Распределение адиабатической эффективности охлаждения для варианта 4 при различных коэффициентах вдува.
 $M = 1$ (1), 1,5 (2), 2 (3).

охлаждителя, при этом вертикальная (z) компонента импульса струи уменьшается, а поперечная (y) компонента возрастает. Уменьшение z -компоненты приводит к падению интенсивности ПВВВ, а усиление y -компоненты импульса улучшает поперечное распространение потока охладителя, что приводит к более равномерному распределению охладителя в поперечном направлении. Кроме того, безразмерная температура в варианте 4 имеет более равномерное распределение, чем для варианта 2, что является следствием вклада выступа в улучшение поперечного распределения охладителя.

На рис. 10 изображено горизонтальное распределение адиабатической эффективности охлаждения для случая 4 при различных значениях коэффициентах вдува. Из графиков видно, что эффективность понижается с увеличением этого коэффициента. При его росте наблюдается увеличение импульса потока охладителя, вследствие чего повышается интенсивность структуры ВППП. При росте импульса потока охладителя поток хуже удерживается вблизи охлаждающего отверстия. Таким образом, отрыв охладителя от пластины возрастает и это снижает горизонтально-усредненную эффективность пленочного охлаждения при повышении коэффициента вдува.

На рис. 11 показана рассчитанная локальная адиабатическая эффективность охлаждения в продольном направлении, а также для плоскости y - z при $x/D = 3$ (для вариантов 1–4 при коэффициенте $M = 1,5$). Из приведенных графиков видно, что локальная эффективность охлаждения для варианта 4 выше, чем для других вариантов (за счет уменьшения z -компоненты импульса охладителя и увеличения y -компоненты). В этом случае изменение импульса способствует более равномерному распределению охладителя в поперечном направлении и меньшему отрыву охладителя от пластины, что в целом существенно повышает эффективность охлаждения. Кроме того, выступы, размещенные выше отверстий, также повышают адиабатическую эффективность охлаждения, осредненную в поперечном направлении.

На рис. 12 представлено распределение эффективности охлаждения для вариантов 1–4 при $M = 1,5$. Видно, что эффективность для варианта 3 выше, чем для варианта 1.

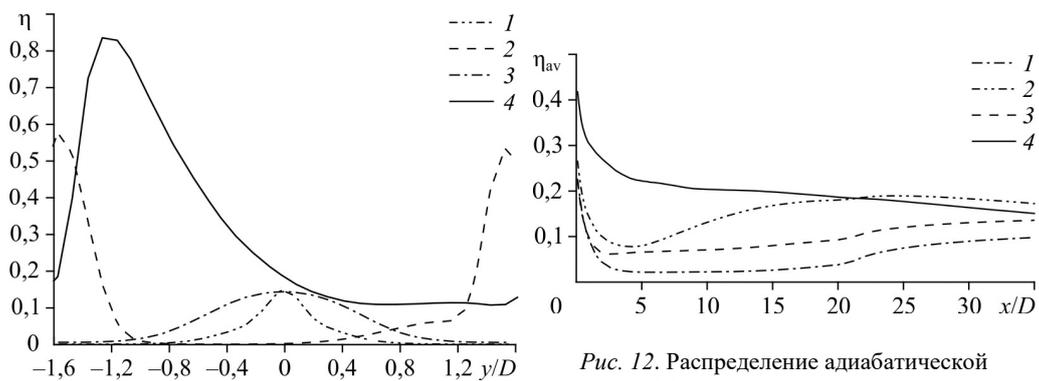


Рис. 11. Распределение локальной эффективности охлаждения для вариантов 1–4 при $M = 1,5$.
Варианты: 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4).

Рис. 12. Распределение адиабатической эффективности охлаждения (поперечное осреднение) для вариантов 1–4 при $M = 1,5$.
Варианты: 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4).

Это объясняется тем, что охладитель из зоны низкого давления, которая является следствием наличия выступа выше по течению, улучшает горизонтальное распределение охладителя. Таким образом, для варианта 3 распределение охладителя является более равномерным, чем для варианта 1, а эффективность охлаждения — более высокой. Графики на рис. 12 также демонстрирует, что эффективность адиабатического охлаждения в горизонтальной плоскости для варианта 4 выше, чем для остальных вариантов. Как ранее было указано, сопло с горизонтальным углом изменяет импульс потока охладителя и повышает равномерность распределения охладителя. Кроме того, выступ изменяет характеристики течения вблизи сопла подачи и улучшает распределение охладителя в поперечном направлении. Следовательно, эффективность пленочного охлаждения для варианта 4 выше, чем для остальных геометрий, благодаря совместному вкладу угла сопла и наличия выступа.

2.2. Влияние расстояния до уступа вверх по течению

На рис. 13 показано взаимодействие натекающего пограничного слоя и струй охладителя при коэффициенте $M = 1,5$, а также явление захвата охладителя для вариантов 4–6. В случае 5 охладитель растекается в поперечном направлении сильнее, чем для указанных остальных вариантов. При этом количество захваченного охладителя для вариантов 4–6 близко. Разница проявляется в области вверх по течению и зависит от расстояния до выступа. Видно, что для варианта 5 эта область имеет наименьший размер, поэтому накопление захваченного охладителя создает наиболее высокое давление в этой области по сравнению с остальными вариантами. Вследствие этого охладитель распределяется более широко, чем в остальных случаях. Это означает, что при уменьшении расстояния до выступа улучшается поперечное распространение охладителя.

На рис. 14 приведены изолинии для безразмерной температуры и вектора скорости в плоскости $y-z$ при $x/D = 1,5$. В случаях 4–6 наблюдается образование ПВВВ. При этом интенсивность таких вихрей для варианта 5 является самой низкой среди трех рассмотренных случаев. В этом варианте расстояние до выступа является наименьшим, а количество захваченного охладителя для всех трех случаев близко. Таким образом, в варианте 5 захваченный охладитель распространяется в поперечном направлении наиболее интенсивно. Также для этого варианта наблюдается самая низкая z -компонента импульса, что соответствует самой низкой интенсивности структур ПВВВ. Кроме того, для варианта 5 вследствие более широкого растекания охладителя характерно более

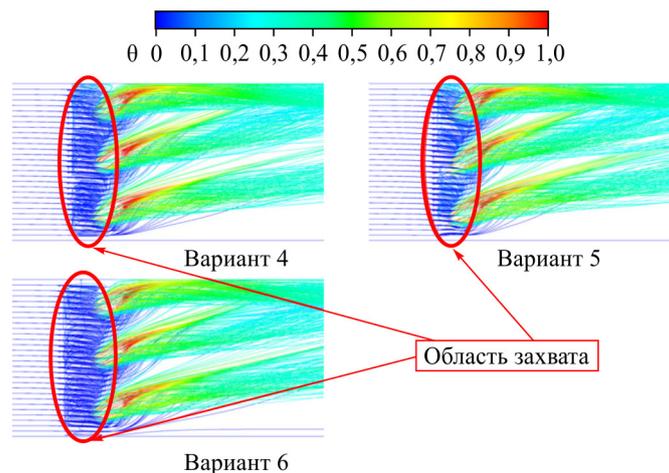


Рис. 13. Линии тока с градацией цветов для безразмерной температуры при $M = 1,5$.

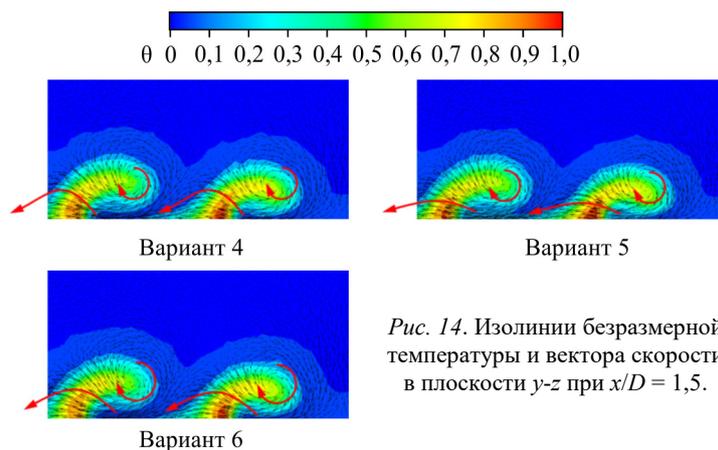


Рис. 14. Изолинии безразмерной температуры и вектора скорости в плоскости y - z при $x/D = 1,5$.

равномерное распределение безразмерной температуры. Можно сделать вывод, что с ростом расстояния до выступа возрастает интенсивность вихрей и понижается однородность безразмерной температуры.

На рис. 15 показана локальная эффективность охлаждения в поперечном направлении для плоскости y - z при $x/D = 3$ для вариантов 4–6 при $M = 1,5$. Видно, что самая высокая локальная эффективность (в поперечном направлении) соответствует варианту 5 (среди всех трех вариантов при $y/D > -1,2$). В этой конфигурации захваченный охладитель распространяется более широко. Кроме того, сохраняется дополнительное влияние ненулевого горизонтального угла на поперечное распространение охладителя. Таким образом, вариант 5 обеспечивает высокий уровень адиабатической эффективности охлаждения в поперечном направлении в области с $y/D > -1,2$.

На рис. 16 представлено распределение локальной адиабатической эффективности охлаждения для вариантов 4–6 при $M = 1,5$. Видно, что эффективность для варианта 5 выше чем для всех остальных. Как было указано ранее, захваченный охладитель распространяется шире всего в случае варианта 5, а z -компонента импульса будет здесь самой низкой. При этом интенсивность вихрей также является самой низкой, а распределение температуры наиболее равномерным. Можно сделать вывод, что горизонтально-усредненная эффективность охлаждения возрастает с увеличением расстояния вверх по потоку.

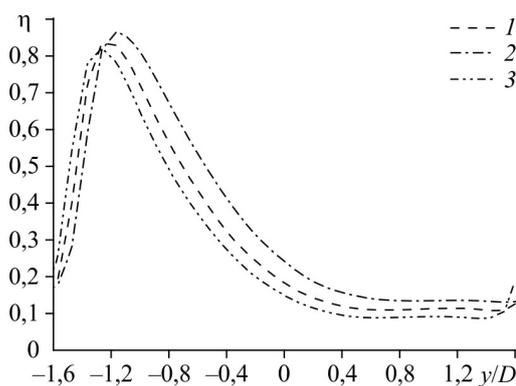


Рис. 15. Распределение локальной эффективности охлаждения для вариантов 4–6 при $M = 1,5$.
Варианты: 4 (1), 5 (2), 6 (3).

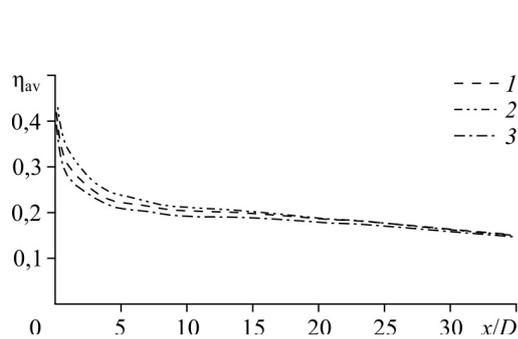


Рис. 16. Распределение поперечно-осредненной адиабатической эффективности охлаждения для вариантов 4–6 при $M = 1,5$.
Варианты: 4 (1), 5 (2), 6 (3).

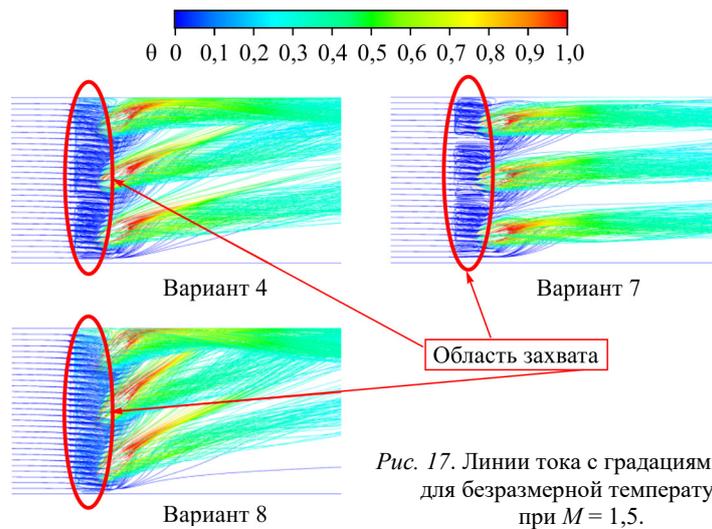


Рис. 17. Линии тока с градиациями цвета для безразмерной температуры при $M = 1,5$.

2.3. Влияние величины горизонтального угла

На рис. 17 изображено взаимодействие натекающего пограничного слоя со струями охладителя для вариантов 4, 7 и 8 при $M = 1,5$. Показан процесс захвата охладителя в вариантах 4, 7, 8, причиной которого является зона низкого давления ниже по течению от выступов. Захваченный охладитель растекается вширь в зоне низкого давления из-за градиента давления в поперечном направлении. Кроме того, количество захваченного охладителя возрастает с увеличением горизонтального угла. Это объясняется тем фактом, что z -компонента импульса уменьшается при увеличении угла, что увеличивает количество захваченного охладителя в зоне между выступом и соплом подачи охладителя. Кроме того, y -компонента импульса потока охладителя возрастает с увеличением горизонтального угла. Это улучшает распространение охладителя поперек потока. Таким образом, интенсивность продольного распространения охладителя возрастает с увеличением горизонтального угла.

На рис. 18 приведены изолинии безразмерной температуры и вектора скорости на плоскости $y-z$ при $x/D = 1,5$. Для всех вариантов наблюдаются структуры ПВВВ. Для угла 45° интенсивность таких вихрей является наименьшей, а распределение температуры равномерным среди представленных вариантов (4, 7, 8). Ненулевой горизонтальный угол уменьшает z -компоненту импульса, что, в свою очередь, понижает интенсивность

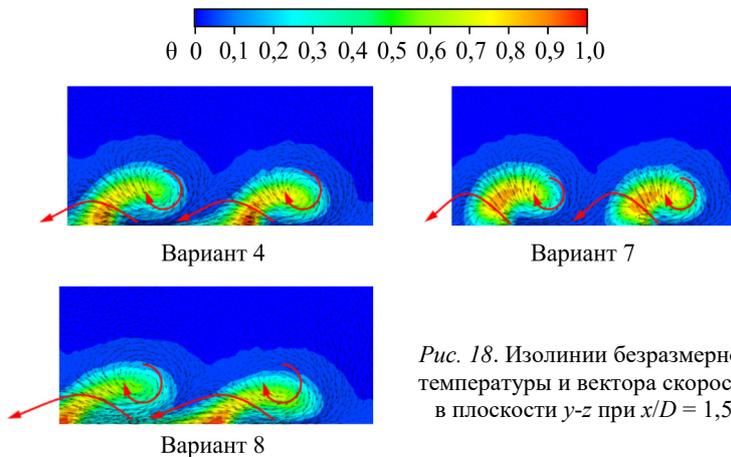


Рис. 18. Изолинии безразмерной температуры и вектора скорости в плоскости $y-z$ при $x/D = 1,5$.

Рис. 19. Распределение локальной адиабатической эффективности охлаждения для вариантов 4, 7 и 8 при $M = 1,5$.
Варианты: 4 (1), 7 (2), 8 (3).

перемешивания между основным потоком и охладителем. При увеличении горизонтального угла уменьшается z -компонента импульса потока охладителя. Это облегчает попадание охладителя в зону между выступом и соплом. Захват инжектированного охладителя улучшает его распространение в поперечном направлении и снижает интенсивность структуры ПВВВ. При геометрии с углом, равным 45° , интенсивность этих вихрей является наименьшей (благодаря двойному влиянию выступа и горизонтального угла). Существенный горизонтальный угол повышает поперечную компоненту импульса охладителя, что обеспечивает более равномерное его распределение. Поэтому для вариантов 4, 7, 8 и при горизонтальном угле 45° наблюдается самое равномерное распределение температуры.

На рис. 19 показаны графики локальной адиабатической эффективности охлаждения для плоскости $y-z$ при $x/D = 3$ для вариантов 4, 7 и 8 при $M = 1,5$. Эта эффективность, осредненная в поперечном направлении, является наивысшей для варианта 8. Последнее объясняется тем, что z -компонента импульса потока охладителя уменьшается с ростом горизонтального угла, что снижает интенсивность вихрей. Захват охладителя также вносит свой вклад в уменьшение интенсивности вихрей. При этом y -компонента охладителя возрастает с увеличением горизонтального угла, что повышает равномерность распределения охладителя. Захват охладителя увеличивает степень его распространения. Поэтому локальная эффективность адиабатического охлаждения в поперечном направлении для варианта 8 является самой высокой и самой однородной.

На рис. 20 показано распределение эффективности охлаждения (осредненной в поперечном направлении) для вариантов 4, 7, 8 при $M = 1,5$ и сравнение с данными из предыдущих статей. Для варианта 8 локальная эффективность адиабатического охлаждения является самой высокой среди рассмотренных вариантов. Увеличение горизонтального угла способствует снижению интенсивности структур ПВВВ по механизму уменьшения z -компоненты импульса охладителя и повышает равномерность распределения охладителя благодаря увеличению y -компоненты импульса. Кроме того, в этом случае легче протекает процесс захвата охладителя в зоне за выступом, что существенно улучшает распространение охладителя на плоскости.

Авторами также было проведено сравнение поперечной адиабатической эффективности охлаждения с аналогичным значением M для других конфигураций пленочного

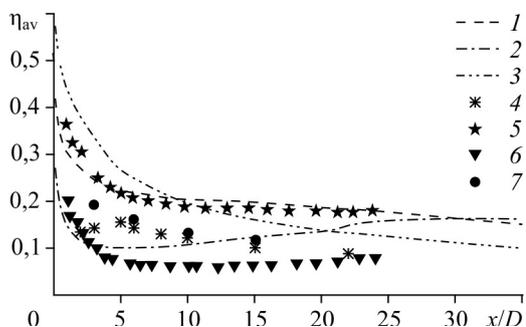
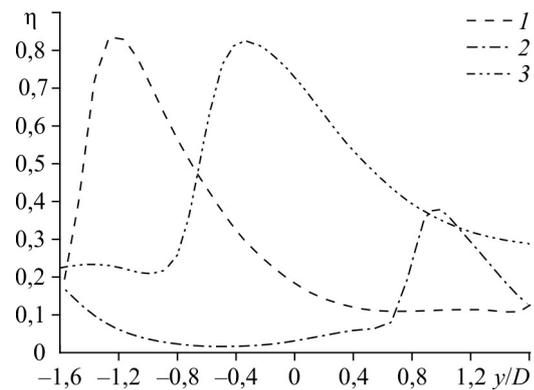


Рис. 20. Распределение поперечно-осредненной адиабатической эффективности охлаждения для вариантов 4, 7 и 8 при $M = 1,5$.
Варианты: 4 (1), 7 (2), 8 (3), данные работы [15] для круглого отверстия при $M = 1,88$, $DR = 1,6$ (4) и для отверстия с наклоном вперед 15° при $M = 1,25$, $L/D = 6$ (7), данные работы [3] для отверстия с расширением спереди при $M = 1,25$, $L/D = 6$ (5) и для отверстия с профилированным входом при $M = 1,25$, $DR = 1,6$ (6).

охлаждения. Сравнение показывает, что предложенная в настоящей работе конфигурация охлаждения имеет некоторые преимущества в рамках рассматриваемого пленочного охлаждения. Кроме того, эта новая конфигурация является альтернативой для ряда особых случаев охлаждения газовых турбин, имеющих ограничение на размеры для профилированных отверстий и пленочное охлаждение торцевой стенки. Практичным решением является размещение выступа на торцевой стенке. Такая геометрия может ослабить вихри, сгенерированные отверстиями, и тем самым улучшить эффективность пленочного охлаждения. Она также позволяет модернизировать существующие устройства для охлаждения газовых турбин. Для этого достаточно повысить эффективность пленочного охлаждения с помощью размещения дополнительных выступов на прежней конструкции турбины.

Выводы

Проведено численное исследование метода улучшения эффективности пленочного охлаждения с помощью горизонтального угла и установки выступа выше по течению. Эффективность пленочного охлаждения оценивалась для различных геометрических параметров при отношении плотностей жидкостей, равном 0,97. При этом коэффициент вдува варьировался от 1 до 2. Получены следующие результаты.

1. Применение горизонтального угла подачи охладителя понижает z -компоненту импульса потока охладителя, что уменьшает интенсивность парных вихрей. Кроме того, усиливается y -компонента импульса и улучшается равномерность распределения охладителя.

2. Выступы выше по течению приводят к отрыву основного потока, что создает за выступом зону пониженного давления. Низкое давление в этой зоне способствует вовлечению потока охладителя. Это улучшает распространение охладителя в поперечном направлении.

3. При увеличении расстояния от сопла до выступа возрастает интенсивность структур ПВВВ, что уменьшает однородность распределения охладителя. Вследствие этого с увеличением расстояния до выступа адиабатическая эффективность охлаждения понижается.

4. При увеличении горизонтального угла подачи охладителя понижается интенсивность ПВВВ, а однородность распределения охладителя улучшается. Поэтому с увеличением наклона горизонтального угла возрастает эффективность адиабатического охлаждения.

Список обозначений

C_p — коэффициент статического давления,	T_c — температура охладителя, К,
D — диаметр сопла для пленочного охлаждения, м,	T_m — температура основного потока, К,
$DR = \rho_c / \rho_m$ — отношение плотностей охладителя к газу основного потока,	u_m — скорость основного потока, м/с,
L — расстояние между выступом и соплом подачи охладителя, м,	u_1 — скорость основного потока на выходе, м/с,
$M = DR \cdot u_c / u_m$ — коэффициент вдува,	x — координата по потоку вдоль поверхности модели, м,
p — статическое давление в потоке, Па,	y — поперечная координата, м,
	z — вертикальная координата, м.

Греческие символы

α — горизонтальный угол, град,	$\eta = (T_{aw} - T_m) / (T_c - T_m)$ — эффективность охлаждения,
ρ — плотность, кг/м ³ ,	$\theta = (T - T_m) / (T_c - T_m)$ — безразмерная температура.

Индексы

m — основной поток,	aw — адиабатическая стенка,
av — среднее,	1 — на выходе основного потока.
c — охладитель,	

Список литературы

1. Fric T.F., Roshko A. Vortical structure in the wake of a transverse jet // J. Fluid Mech. 1994. Vol. 279. P. 1–47.
2. Haven B.A., Yamagata D.K., Kurosaka M., Yamawaki S., Maya T. Anti-kidney pair of vortices in shaped holes and their influence on film cooling effectiveness // ASME. Paper No. 97-GT-045. 1997. 8 p.
3. Hyams D.G., Leylek J.H. A detailed analysis of film cooling physics: Part III. Streamwise injection with shaped holes // ASME. Paper No. 97-GT-271. 1997. 14 p.
4. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Панченко Н.А., Коваленко А.С. Пленочное охлаждение плоской поверхности системой парных отверстий: влияние внешней турбулентности и ускорения потока // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 5. С. 571–578.
5. Голайлиа А., Хорси А., Хамиду М.К. Моделирование эффективности пленочного охлаждения передней кромки лопатки через профилированные сужающиеся отверстия // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 33–44.
6. Gritsch M., Schulz A., Wittig S. Adiabatic wall effectiveness measurements of film-cooling holes with expanded exits // J. Turbomach. 1998. Vol. 120. P. 549–556.
7. Sargison J.E., Guo S.M., Oldfield M.L.G., Lock G.D., Rawlinson A.J. A converging slot-hole film-cooling geometry. Part 1. Low-speed flat-plate heat transfer and loss // J. Turbomach. 2002. Vol. 124, Iss. 3. P. 453–460.
8. Sargison J.E., Guo S.M., Oldfield M.L.G., Lock G.D., Rawlinson A.J. A converging slot-hole film-cooling geometry. Part 2. Transonic nozzle guide vane heat transfer and loss // ASME. Paper No. 2001-GT-0127. 2001. 10 p.
9. Azzi A., Jubran B.A. Numerical modelling of film cooling from converging slot-hole // Heat Mass Transfer. 2007. Vol. 43, Iss. 4. P. 381–388.
10. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Коваленко А.С., Шевцов С.В. Пленочное охлаждение плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий в траншее: влияние внешней турбулентности и ускорения потока // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 731–737.
11. Пахомов М.А., Терехов В.И., Халатов А.А., Борисов И.И. Тепловая эффективность пристенной газовой завесы при ее вдуве через круглые отверстия в траншее // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 343–352.
12. Халатов А.А., Панченко Н.А., Северин С.Д. Влияние внешней турбулентности на эффективность пленочного охлаждения при выдуве охладителя в поперечную траншею // Теплоэнергетика. 2017. Т. 64, № 9. С. 71–79.
13. Горелов Ю.Г., Тюльков К.В., Ананьев В.В., Бывальцев П.М. Верификация расчетов пленочного охлаждения входных кромок сопловых лопаток в ANSYS CFX // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 67–72.
14. Чжэн Д., Ван С., Юань Ц. Численное исследование влияние формы вихрегенераторов на эффективность пленочного охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 491–496.
15. Schmidt D.L., Sen B., Bogard D.G. Film cooling with compound angle holes: adiabatic effectiveness // J. Turbomach. 1996. Vol. 118. P. 807–813.
16. Sen B., Schmidt D.L., Bogard D.G. Film cooling with compound angle holes: heat transfer // J. Turbomach. 1996. Vol. 118. P. 800–806.
17. McClintic J.W., Wilkes E.K., Bogard D.G., Dees J.E., Laskowski G.M., Briggs R. Near-hole thermal field measurements for round compound angle film cooling holes fed by cross-flow // ASME. Paper No. GT2015-43949. 2015. 11 p.
18. Na S., Shih T.I.P. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp // J. Heat Transf. 2007. Vol. 129, No.1. P. 464–471.
19. Barigozzi G., Franchini G., Perdichizzi A. The effect of an upstream ramp on cylindrical and fan-shaped hole film cooling. Part I. Aerodynamic results // ASME. Paper No. GT2007-27077. 2007. P. 105–113.
20. Barigozzi G., Franchini G., Perdichizzi A. The effect of an upstream ramp on cylindrical and fan-shaped hole film cooling. Part II. Adiabatic effectiveness results // ASME. Paper No. GT 2007-27079. 2007. 9 p.
21. Zhang F., Wang X., Li J. The effects of upstream steps with unevenly spanwise distributed height on rectangular hole film cooling performance // Int. J. Heat Mass Transf. 2016. Vol. 102. P. 1209–1221.
22. Zheng D., Wang X., Zhang F., Zhou J., Yuan Q. The effect of upstream ramps with different shapes on film cooling efficiency // ASME. Paper No. GT 2017-73741. 2017. 11 p.
23. Zheng D., Wang X., Zhang F., Yuan, Q. Numerical investigation on the effects of the divided steps on film cooling performance // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 124. P. 652–662.
24. Montomoli F., D’Ammaro A., Uchida S. Numerical and experimental investigation of a new film cooling geometry with high P/D ratio // Int. J. Heat Mass Transf. 2013. Vol. 66. P. 366–375.
25. Abdala A.M.M., Elwekeel F.N.M. An influence of novel upstream steps on film cooling performance // Int. J. Heat Mass Transf. 2016. Vol. 93. P. 86–96.
26. Sinha A.K., Bogard D.G., Crawford M.E. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio // J. Turbomach. 1991. Vol. 113, No. 3. P. 442–449.

*Статья поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.,
после переработки — 11 ноября 2019 г.,
принята к публикации 10 февраля 2020 г.*