

УДК 536.244

## Оптимизация геометрии отверстия с кратерным профилем для повышения эффективности пленочного охлаждения\*

Л.Ц. Бай, Ц. Чанг, З.Т. Тонг, П.Ф. Ю

Тяньцзинский технологический университет, Тяньцзин, Китай

E-mail: czhangxj@163.com

В статье представлено описание оптимального контура кратероподобной выемки вокруг цилиндрического отверстия для организации пленочного охлаждения, найденного с помощью численного моделирования потока и методов оптимизации. Влияние пяти выбранных геометрических параметров, которые полностью описывают выемку, изучается с использованием метода ортогонального проектирования и интервального метода. С помощью интервального метода и генетического алгоритма в комбинации с нейронной сетью с обратным распространением ошибки при коэффициентах вдува 0,5 и 1,5 выполнена оптимизация для отверстия. В результате работы последнего метода оптимизации получена большая усредненная по площади эффективность охлаждения для обоих значений коэффициента вдува. Усредненная по площади эффективность охлаждения для оптимизированных отверстий с кратероподобной выемкой повышается на 17,21 % для коэффициента вдува 0,5 и на 101,96 % — для коэффициента вдува 1,5 по сравнению с базовым вариантом. Повышение эффективности пленочного охлаждения объясняется в терминах динамики потока и вихревых структур.

**Ключевые слова:** пленочное охлаждение, кратероподобное отверстие, эффективность охлаждения, интервальный анализ, нейронная сеть, генетический алгоритм, оптимизация.

### Введение

Концепция пленочного охлаждения была предложена еще в 70-е годы прошлого столетия [1], однако и сегодня эта технология востребована в задачах охлаждения лопастей газовых турбин, особенно в случае современных турбин, которые имеют высокий уровень расхода газа-охлаждителя. Обычно при использовании технологии пленочного охлаждения для подачи охладителя применяются отверстия цилиндрической формы. Но при высоких параметрах вдува подобная геометрия не может обеспечить высокую эффективность охлаждения, что было отмечено в обзоре [2].

В проблеме охлаждения лопастей современных газовых турбин важное место занимает термобарьерное покрытие (Thermal Barrier Coating — ТВС). На поверхности лопастей при напылении покрытия можно создать два вида новых структур: выемки-канавки и выемки кратероподобной формы. Как было показано в работе [3], отверстия с кратерообразной выемкой обеспечивают более высокую эффективность охлаждения, чем обычное цилиндрическое отверстие. В публикации [4] была выполнена оценка эффективности

---

\* Исследование проводилось при финансовой поддержке Фонда поддержки естественных наук провинции Тяньцзин (грант № 18JQJNC07200) и Китайского фонда поддержки естественных наук (грант № 15106150).

охлаждения через отверстия указанных форм по сравнению с цилиндрическими отверстиями. Авторы показали, что при параметре вдува, равном 0,5, оба альтернативных варианта геометрии отверстий обеспечивают большую эффективность охлаждения, чем в случае простых цилиндрических отверстий, но наличие кратероподобной геометрии демонстрирует более низкую эффективность, чем выемка в виде канавки. Похожие результаты были получены для параметров вдува, равных 0,5 и 2 [5]. Важно отметить, что двумерность канавки отрицательно влияет на механическую прочность турбинной лопасти [6], в то же время охлаждающий газ, инжектированный в зоне выше канавки, быстрее нагревается набегающим потоком горячего газа [7]. По сравнению с такой геометрией отверстия с кратерной выемкой, дискретно распределенные по поверхности лопасти, представляют больший интерес для инженерных приложений.

Форма кратера существенно влияет на охлаждение, о чем свидетельствует изменение структуры течения за кратерной выемкой. Исходя из этого, многие исследователи искали правильную форму для кратероподобной выемки в целях повышения эффективности охлаждения. В работе [8] изучалась эффективность охлаждения для случая использования одновременно пяти отверстий с кратерными выемками при параметре вдува, равном 0,5, и оказалось, что самая высокая эффективность охлаждения наблюдалась для случая цилиндрического отверстия, помещенного в концентрический кратер. Исследователи [9] предложили инновационную кратерную форму отверстия, которая характеризуется тупоугольным V-образным выступом, размещенным ниже цилиндрического отверстия. Они предполагали, что такая структура будет генерировать вторичное течение в виде «почкообразной» вихревой пары с противовращением (*anti-kidney-shaped vortex pair*), что поможет охлаждающему газу оставаться ближе к стенке и будет способствовать улучшению пленочного охлаждения. В работе [10] была предложена кратерная выемка для отверстия, которое было названо отверстием с приповерхностным диффузионным течением (*near surface streamwise diffusion hole*). Эксперименты показали повышение эффективности охлаждения при использовании такой структуры по сравнению с простым цилиндрическим отверстием.

Помимо формы охлаждающих отверстий на пленочное охлаждение также влияет подбор геометрических параметров кратера, а именно его высота и ширина, или их комбинация. В исследовании [8], посвященном охлаждению через отверстия с кратерной выемкой, было показано, что более глубокие отверстия обеспечивают лучшее охлаждение. В экспериментальном исследовании [10] оценивалось влияние нескольких геометрических параметров, таких как глубина, ширина и длина кратера, а также расстояние в потоке между соседними выступами. Также здесь изучалось влияние внешнего края цилиндрического отверстия и угла наклона кратера. Было проверено семь комбинаций указанных геометрических параметров, причем эти комбинации приводили к явным изменениям в охлаждении, особенно при высоком параметре вдува. Современные методы оптимизации оказались эффективным подходом к выбору подходящей комбинации параметров для существующих отверстий для вдува охладителя с целью улучшения пленочного охлаждения. В работах [11, 12] использовалась суррогатная модель с усреднением по весам, а также модель Кригинга для оптимизации отверстий с веерной геометрией и для отверстия с кратерным профилем по периферии отверстия. В этих работах было показано взаимное влияние различных геометрических параметров отверстий на пленочное охлаждение, а также выявлены оптимальные комбинации этих параметров.

Цель настоящего исследования заключается в выявлении оптимальных параметров кратерной выемки, которые обеспечили бы максимальную эффективность пленочного охлаждения (усредненную по поверхности) при двух параметрах вдува: 0,5 и 1,5. В работе используется метод оптимизации, разработанный для обычных цилиндрических отверстий пленочного охлаждения [10]. В ходе численного моделирования, в результате которого

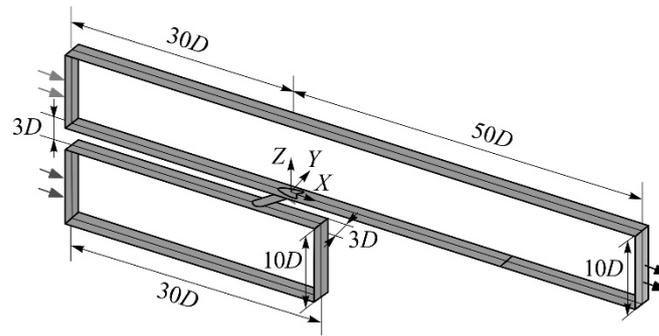


Рис. 1. Геометрическая схема модели.

определяется эффективность пленочного охлаждения для отверстий с кратерообразной выемкой (отверстие-кратер), применяется разностная схема второго порядка для решения трехмерных стационарных уравнений Навье–Стокса (с усреднением по Рейнольдсу). Для получения тестовых точек оптимизации используется ортогональное проектирование. Построение суррогатной модели и аппроксимация численных результатов для базовых решений проводится с помощью нейронной сети с обратным распространением ошибки. Построенная модель применяется для получения оптимального решения посредством генетического алгоритма.

### Вычислительная модель

Геометрическая схема модели приведена на рис. 1. Модель включает в себя канал основного течения, камеру газа-охлаждителя и цилиндрическое основное отверстие, которое интегрировано с кратерообразным профилем. Цилиндрическое отверстие имеет диаметр  $D = 4$  мм и угол наклона  $30^\circ$  относительно направления основного потока. Направления по потоку, поперек потока и вертикальное направление соответствуют осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Начало системы координат размещено по центру задней кромки выхода цилиндрического отверстия. Поперечная ширина модели равна трем диаметрам отверстия, и на боковых сторонах канала накладываются периодические граничные условия, которые моделируют эффект ряда отверстий для инжекции охладителя.

На рис. 2 отображены геометрические параметры кратерообразного отверстия. Расстояние по потоку от выхода цилиндрического отверстия до выхода из кратера обозначено как  $L$ . Продольная ширина и глубина кратера обозначены как  $W$  и  $H$  соответственно. Длина фигурного выступа составляет  $L_p$  в направлении потока, поперечная ширина —  $W_p$ . Пять переменных параметров соответствуют конкретной форме кратерного профиля. Поэтому в качестве переменных для оптимизации отверстия пленочного охлаждения с кратерной выемкой используются относительные величины:  $L/D$ ,  $W/D$ ,  $H/D$ ,  $L_p/L$ ,  $W_p/W$ .

Так как физическая модель симметрична относительно плоскости  $Y/D = 0$ , то для снижения потребности в вычислительных ресурсах в численном моделировании аэродинамики используется только половина геометрической модели ( $0 \leq Y/D \leq 1,5$ ). Граничные условия отображены в табл. 1. Они очень близки к условиям, описанным в работе [10]. Две боковые плоскости ( $Y/D = 0$  и  $Y/D = 1,5$ ) симметричны, что соответствует бесконечному ряду охлаждающих отверстий.

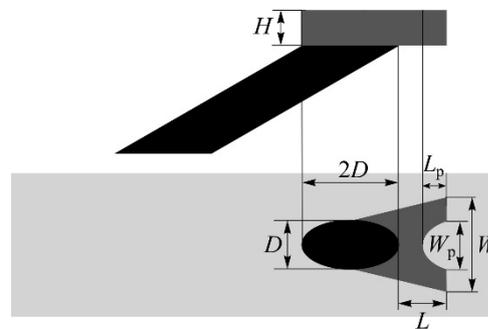


Рис. 2. Геометрические параметры отверстия с кратерообразной выемкой.

Таблица 1

## Граничные условия

Расчетная область						Рабочая среда	Число Рейнольдса	Отношение охладителя в основном потоке
На входе канала для основного потока			На выходе канала		На входе камеры охладителя			
Однородная нормальная скорость $U_h$ , м/с	Общая температура $T_h$ , К	Интенсивность турбулентности, %	Статистическое давление, атм	Интенсивность турбулентности, %	Общая температура $T_c$ , К	Воздух (идеальный газ)	4656	1,38
25	414	3,5	1	1.0	300			

На всех твердых стенах заданы мягкие адиабатические условия для потока без проскальзывания. В последующем численном моделировании все граничные условия оставались неизменными, за исключением входной скорости охладителя. Два значения параметра вдува  $M = 0,5$  и  $1,5$  достигаются за счет изменения скорости на входе в камеру охладителя и вычисляются по соотношению

$$M = \frac{DR \cdot U_{\text{plenum}} \cdot A_{\text{plenum}} / A_{\text{hole}}}{U_h}, \quad (1)$$

где  $M$  — параметр вдува,  $U_h$  — равномерная нормальная скорость на входе в основной канал,  $U_{\text{plenum}}$  — средняя скорость на входе камеры охладителя,  $A_{\text{plenum}}$  и  $A_{\text{hole}}$  — площади сечения камеры охлаждающего газа и цилиндрического отверстия вдува соответственно.

Для расчетной области половины осесимметричной модели генерируется гексагональная сетка. На рис. 3 показана расчетная сетка вблизи кратероподобного отверстия (для базового случая). Для лучшего описания пограничного слоя (по скорости и температуре) вблизи стенок и охлаждающих отверстий создается более детальная сетка. Расстояние между первым узлом и стенкой выбирается равным  $0,005D$ , чтобы обеспечить величину безразмерного расстояния до стенки  $y^+ = u_T / \mu$  меньше чем 1 (здесь  $y$  — нормальное расстояние первого узла от стенки,  $u_T$  — локальная тангенциальная скорость,  $\mu$  — локальная динамическая вязкость).

Поля течения и теплоперенос для пленочного охлаждения вычислялись путем решения трехмерных стационарных уравнений Навье–Стокса с помощью пакета программ ANSYS CFX. При численном моделировании использовалась схема дискретизации второго порядка точности. Снижение общей невязки по параметрам потока и теплопереноса до уровня меньше, чем  $10^{-5}$ , считалось критерием сходимости решения. Согласно результатам численных исследований [11–13], SST-модель среди прочих моделей турбулентности оказалась достаточно точной для предсказания эффективности пленочного охлаждения. Поэтому она была выбрана для расчетов в настоящем исследовании.

Влияние шага сетки на решение было проверено на задаче моделирования теплового пограничного слоя в применении к базовому варианту

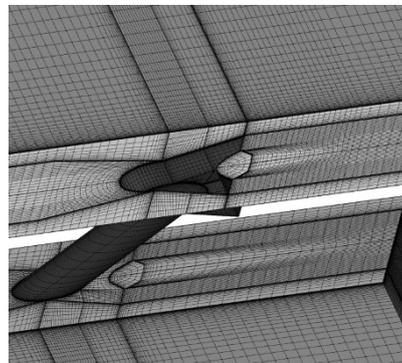


Рис. 3. Вид расчетной сетки вблизи отверстия.

Рис. 4. Результаты тестирования на измельчение расчетной сетки для базового варианта кратероподобного отверстия при параметре вдува  $M = 0,5$ .  
1 — 11,11 млн. ячеек, 2 — 13,3 млн. ячеек, 3 — 16,9 млн. ячеек.

кратера (безразмерные параметры составляли  $L/D = 1,0$ ,  $W/D = 2,0$ ,  $L_p/L = 0,5$ ,  $W_p/W = 0,5$ ,  $H/D = 0,75$ ) и при параметре вдува  $M = 0,5$  путем расчетов на разных сетках. Тепловые пограничные слои выражаются через профиль безразмерной температуры  $\theta$ , которая определяется соотношением:

$$\theta = \frac{T_f - T_c}{T_h - T_c}, \quad (2)$$

где  $T_f$  — температура смеси основного газа и газа-охлаждителя,  $T_h$  и  $T_c$  — статические температуры на входе в основной канал и на входе в камеру охлаждающей жидкости соответственно.

В представленной работе были протестированы три вида расчетных сеток с различным уровнем детализации для случая базовой геометрии отверстия при параметре вдува, равном 0,5. Сетки содержали 11,11 миллиона (сетка 1), 13,3 миллиона (сетка 2) и 16,9 миллиона ячеек (сетка 3). Профили безразмерной температуры по линии пересечения плоскостей  $X/D = 4$  и  $Y/D = 0$  для трех вариантов измельчения сетки показаны на рис. 4. Видно, что сетка 2 достаточно хорошо описывает тепловой пограничный слой и геометрия слоя почти не изменяется при увеличении числа ячеек. Поэтому в данном исследовании для изучения течения и эффективности охлаждения для базовой геометрии отверстия с кратерным профилем при параметре вдува, равным  $M = 0,5$ , использовалась сетка 2. Аналогично были проведены тесты по измельчению сетки для других вариантов отверстий при двух параметрах вдува —  $M = 0,5$  и  $1,5$ .

### Цель и методы оптимизации

Эффективность пленочного охлаждения описывается соотношением

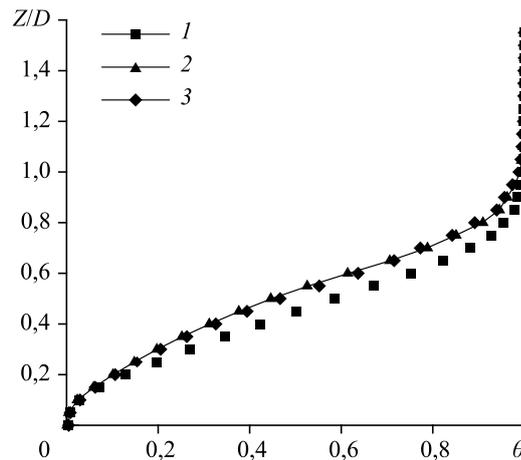
$$\eta = \frac{T_h - T_{aw}}{T_h - T_c}, \quad (3)$$

где  $T_{aw}$  — локальная температура на верхней стенке пластины с пленочным охлаждением при наличии адиабатических условий.

Для решения проблемы оптимизации в качестве параметра оптимизации была выбрана эффективность адиабатического охлаждения  $\eta_{ave}$ , усредненная по площади (усреднение по зоне ниже по течению от выхода из отверстия  $0 \leq X/D \leq 30$ ,  $0 \leq Y/D \leq 1,5$ ), которая рассчитывается по формуле

$$\eta_{ave} = \frac{1}{1,5D \cdot 30D} \int_0^{30D} \int_0^{1,5D} \eta dYdX. \quad (4)$$

В настоящей работе целью оптимизации является поиск отверстия с кратерообразной выемкой с нужным набором геометрических параметров, который соответствует максимальной эффективности пленочного охлаждения, усредненной по площади.



Для решения рассматриваемой задачи следует также определить эффективность охлаждения с усреднением по поперечной координате  $\eta_{ave,lat}$ , которая записывается как

$$\eta_{ave,lat} = \frac{1}{1,5D} \int_0^{1,5D} \eta dY. \quad (5)$$

В табл. 2 приведены интервалы изменения геометрических переменных для задачи оптимизации, величины для базового варианта отверстия и типичные параметры из работы [10]. Интервалы для величин, принятые в настоящей работе, покрывают все значения в исследовании [10], кроме отношения  $W/D$ . Дело в том, что в исследовании [10] отверстие с выемкой использовалось при большом шаге между инжектирующими отверстиями, составлявшем приблизительно интервал  $6D$ , поэтому требовалась большая ширина отверстия. Обычно отверстие-канавка или отверстие с кратероподобной геометрией имеют мелкие формы, типичная глубина таких отверстий равняется  $0,5D$  (согласно толщине теплозащитного слоя [14]). Вместе с тем, в работе [15] изучалось отверстие канавка с большей глубиной —  $1,0D$ , и оно обеспечивало лучшее охлаждение при параметрах вдува в интервале от  $M = 0,6$  до  $M = 1,4$ . С учетом этого в данной работе по оптимизации также исследуется вариант с глубоким отверстием — с относительной глубиной, равной  $1,1$ . Для базового варианта отверстия каждый из геометрических параметров принадлежит указанному интервалу.

Для анализа влияния геометрических параметров кратероподобного профиля был разработан численный эксперимент с ортогональной схемой параметров. Интервал для каждой проектной переменной был равномерно разделен на 4 уровня, в результате чего было получено 16 решений для 5 оптимизационных параметров, которые приведены в табл. 3.

Таблица 2

Интервал величины для анализа

Оптимизационные параметры Интервалы	$L/D$	$W/D$	$L_p/L$	$W_p/W$	$H/D$
Нижний предел интервала настоящего исследования	1,0	1,2	0,1	0,1	0,1
Верхний предел интервала настоящего исследования	2,8	2,8	0,9	0,9	1,1
Значения параметров базового варианта	1,0	2,0	0,5	0,5	0,75
Значения параметров из работы [10]	1,6	3,6	0,781	0,389	0,6

Таблица 3

Ортогональный план значений оптимизационных параметров

№ варианта	$L/D$	$W/D$	$L_p/L$	$W_p/W$	$H/D$
1	1	1,2	0,1	0,1	0,1
2	1	1,7333	0,3667	0,3667	0,4333
3	1	2,2667	0,6333	0,6333	0,4333
4	1	2,8	0,9	0,9	1,1
5	1,6	1,2	0,3667	0,6333	1,1
6	1,6	1,7333	0,1	0,9	0,7667
7	1,6	2,2667	0,9	0,1	1,4333
8	1,6	2,8	0,6333	0,3667	0,1
9	2,2	1,2	0,6333	0,9	0,4333
10	2,2	1,7333	0,9	0,6333	0,1
11	2,2	2,667	0,1	0,3667	1,1
12	2,2	2,8	0,3667	0,1	0,7667
13	2,8	1,2	0,9	0,3667	0,7667
14	2,8	1,7333	0,6333	0,1	0,1
15	2,8	2,2667	0,3667	0,9	0,1
16	2,8	2,8	0,1	0,6333	0,4333

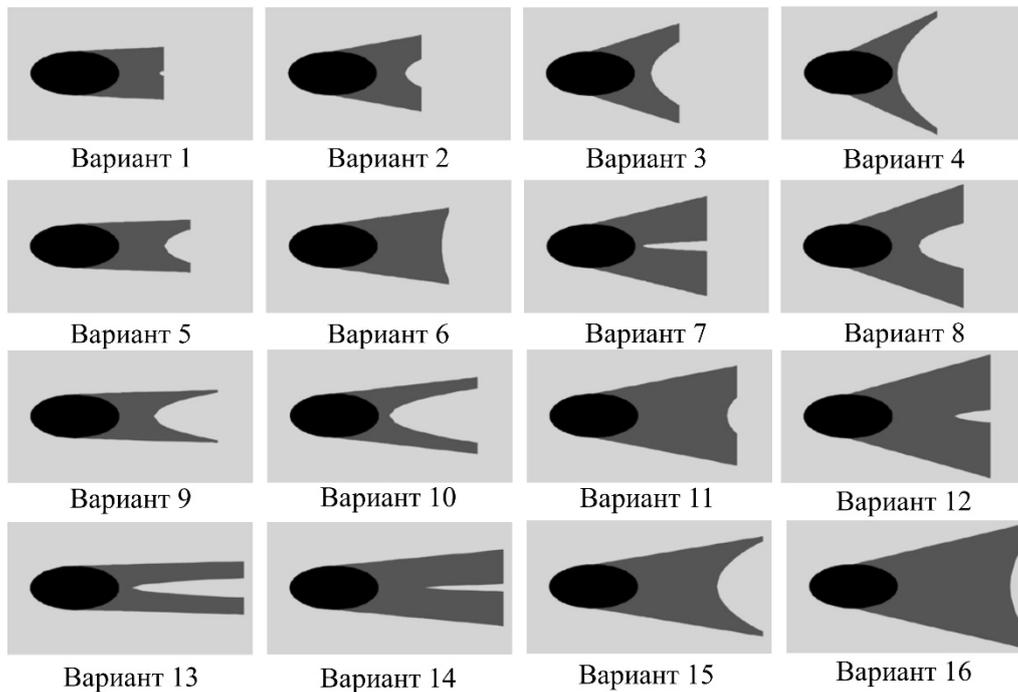


Рис. 5. Вид сверху отверстий с формой кратера (по ортогональной схеме).

Для наглядности все 16 вариантов решений для отверстий с кратероподобной геометрией, полученные в рамках описанной ортогональной схемы параметров, показаны на рис. 5 (вид сверху).

В настоящей работе применялись два метода оптимизации геометрических параметров отверстия с формой в виде кратера. Первый метод — это интервальный анализ, основанный на ортогональной схеме параметров. Второй метод — это генетический алгоритм в сочетании с нейронной сетью с обратным распространением ошибки (BP-GA).

Для случая интервального анализа интервал — это разница между максимальной и минимальной величинами для усредненных целевых функций при всех уровнях фактора влияния. Интервал, соответствующий этому фактору, отражает степень слияния последнего на целевую функцию в пределах исследуемого диапазона изменения данного параметра. В целом чем больше интервал, тем больше воздействие указанного фактора на целевую функцию. Кроме того, интервальный анализ призван оценить влияние уровня выбранного фактора на целевую функцию без учета остальных факторов. Таким образом, оптимальный уровень каждого параметра можно оценить по величине интервала, тем самым определяя оптимальную комбинацию.

Нейронная сеть с методом обратного распространения ошибки (Back Propagation) применялась для построения суррогатной модели с целью получения корреляции между целевыми результатами и значениями проектных переменных. В качестве метода обучения была выбрана байесовская регуляризация, а для оценки степени сходимости использовалась среднеквадратичная ошибка. В качестве метода оптимизации был выбран генетический алгоритм с функцией подгонки через суррогатную модель, которая была обучена заранее с помощью сети с обратным распространением ошибки.

### Результаты и обсуждение

В табл. 4 приведены результаты интервального анализа, основанные на усредненной по площади эффективности охлаждения, для всех конфигураций из ортогонального плана.

В табл. 4  $F^j$  — это средняя целевая функция для  $j$ -го уровня фактора, где факторы отсортированы от слабого к сильному, а  $\Delta F_i$  — интервал для фактора с номером  $i$ . Оптимизация заключается в поиске максимально возможной эффективности охлаждения. Так, при параметре вдува, равном 0,5, самым существенным фактором для целевой функции является не отношение высоты кратера к диаметру отверстия  $H/D$ , а отношение ширины кратера к диаметру отверстия  $W/D$ . Для случая параметра вдува  $M = 0,5$  степень важности параметров оптимизации в градации от высокого к низкому следующая:  $H/D > W/D > L/D > W_p/W > L_p/L$ . Однако при высоком параметре вдува  $M = 1,5$  ранжирование параметров изменяется:  $W/D > H/D > W_p/W > L_p/L > L/D$ . С помощью метода интервалов получены оптимальные комбинации уровней проектной переменной для двух значений параметра вдува. В таблице самые высокие величины для  $F_j$  отмечены символом «\*». Именно комбинация уровней с наибольшими значениями проектных переменных является оптимальным решением, получаемым с помощью интервального метода.

В табл. 5 приведены оптимальные геометрические параметры, полученные при реализации интервального метода и метода нейронной сети BP-GA, а также соответствующая усредненная по площади эффективность охлаждения в сравнении с базовой конфигурацией для вариантов  $M = 0,5$  и 1,5. По сравнению с базовым вариантом при  $M = 0,5$  оптимальный вариант геометрии, вычисленный интервальным методом, показывает более высокие значения по каждому геометрическому параметру. Что касается оптимизации

Таблица 4

Анализ с помощью интервального метода

Целевая функция или интервал для фактора $i$	$M = 0,5$					$M = 1,5$				
	$L/D$	$W/D$	$L_p/W$	$W_p/W$	$H/D$	$L/D$	$W/D$	$L_p/W$	$W_p/W$	$H/D$
$F^1$	0,313	0,256	0,303	0,301	0,205	0,248	0,206	0,301	0,344*	0,086
$F^2$	0,303	0,290	0,300	0,398	0,336	0,207	0,123	0,188	0,199	0,335*
$F^3$	0,320*	0,328	0,313	0,316*	0,347*	0,314*	0,314	0,211	0,257	0,312
$F^4$	0,295	0,357*	0,315*	0,315	0,343	0,263	0,388*	0,331*	0,231	0,299
$\Delta F^1$	0,026	0,102	0,015	0,018	0,142	0,107	0,265	0,142	0,144	0,249

Таблица 5

Геометрические параметры для оптимизационного отверстия и базового варианта

Параметр вдува $M = 0,5$				
Оптимизационные параметры	Отверстие с наклоном	Базовый вариант	Оптимальный вариант по интервальному методу	Оптимальный вариант по методу нейронной сети
$L/D$	–	1,0	2,2	2,057
$W/D$	–	2,0	2,8	2,8
$L_p/L$	–	0,5	0,9	0,254
$W_p/W$	–	0,5	0,633	0,757
$H/D$	–	0,75	0,767	0,763
$\eta_{av'e}$	0,213	0,353	0,386	0,413
Параметр вдува $M = 1,5$				
Оптимизационные параметры	Отверстие с наклоном	Базовый вариант	Оптимальный вариант по интервальному методу	Оптимальный вариант по методу нейронной сети
$L/D$	–	1,0	2,2	2,392
$W/D$	–	2,0	2,8	2,8
$L_p/L$	–	0,5	0,9	0,657
$W_p/W$	–	0,5	0,1	0,438
$H/D$	–	0,75	0,433	0,830
$\eta_{av'e}$	0,041	0,283	0,269	0,571

с помощью метода нейронной сети, то при параметре вдува  $M = 0,5$  также получены более высокие значения оптимизируемых параметров по сравнению с базовым вариантом кратерного отверстия (кроме величины  $L_p/L$ ). Усредненная по площади эффективность пленочного охлаждения при параметре вдува  $M = 0,5$  увеличивается от 0,353 для базового варианта до 0,386 для оптимального варианта, полученного с помощью интервального метода, и до 0,413 для оптимального варианта, рассчитанного с помощью нейронной сети. При параметре вдува  $M = 1,5$  геометрические параметры для двух оптимальных вариантов показывают более высокие значения трех переменных оптимизации ( $L/D$ ,  $W/D$ ,  $L_p/L$ ), чем в случае базового варианта. По сравнению с базовым вариантом переменные  $W_p/W$  и  $H/D$  для оптимального варианта отверстия имеют обратную тенденцию. Важно отметить, что при двух опробованных методах оптимизации мы получаем различные величины для наиболее влиятельного геометрического фактора  $H/D$  для случая параметра вдува  $M = 1,5$ . Эффективность пленочного охлаждения для оптимального варианта, полученного с помощью интервального метода при  $M = 1,5$ , имеет величину 0,269, что даже ниже, чем для базового варианта отверстия. Это означает, что интервальный подход для оптимизации параметров кратероподобного отверстия с пятью параметрами оптимизации не является подходящим. Причина может быть в широком интервале для переменных оптимизации и существенном взаимном влиянии переменных при реализации этого подхода. Напротив, метод нейронной сети (BP-GA) показал замечательные результаты при оптимизации кратероподобного профиля. Оптимальный вариант, полученный с помощью нейронной сети, дает эффективность охлаждения на уровне 0,571 (по сравнению с эффективностью 0,283 для исходного варианта). Таким образом, метод нейронной сети (BP-GA) лучше подходит для целей оптимизации. При этом охлаждение с помощью вдува через отверстие с базовой кратероподобной геометрией (до оптимизации) является уже более эффективным, чем для варианта простого наклонного отверстия без кратера для обоих значений параметра вдува. Поэтому все дальнейшие сравнения проводятся только для базового варианта отверстия и отверстия, оптимизированного с помощью нейронной сети. Усредненная по площади эффективность охлаждения для оптимизированного варианта отверстия для случая  $M = 0,5$  выше, чем для базовой геометрии, на 17,21 %. Для пленочного охлаждения при параметре вдува  $M = 1,5$  выигрыш по сравнению с базовым вариантом становится значительно выше — на уровне 101,96 %. Если сравнивать геометрические параметры, то обнаружится, что оптимальный вариант имеет большие размеры кратера с большей глубиной для обоих значений параметра вдува.

Для выходной плоскости кратероподобного отверстия на рис. 6 показано распределение скорости в направлении  $Z$  для двух вариантов геометрии и при двух параметрах вдува:  $M = 0,5$  и  $1,5$ . Как было показано в исследованиях [16], более низкая скорость охлаждающего потока в направлении  $Z$  создает меньшую высоту проникновения охладителя в основной поток, что дает возможность охладителю оставаться ближе к стенке. Распределения скорости в направлении  $Z$  в целом схожи для базового варианта и для оптимального варианта отверстий для обоих случаев параметра вдува. Вместе с тем оптимальное кратероподобное отверстие создает более низкую скорость по оси  $Z$  благодаря большей площади выходной плоскости, и, следовательно, меньший импульс потока инжестируемого газа-охладителя и меньшую высоту проникновения в основной поток.

Для случая простого цилиндрического отверстия известно, что почкообразный вихрь (kidney-shaped vortex pair) сдерживает продольное распространение инжестируемого охладителя. Однако почкообразный вихрь с противовращением, который отличается от вторичного течения в виде почкообразного вихря, является желательным для усиления пленочного охлаждения. В работе [16] было дано объяснение, каким образом механизм

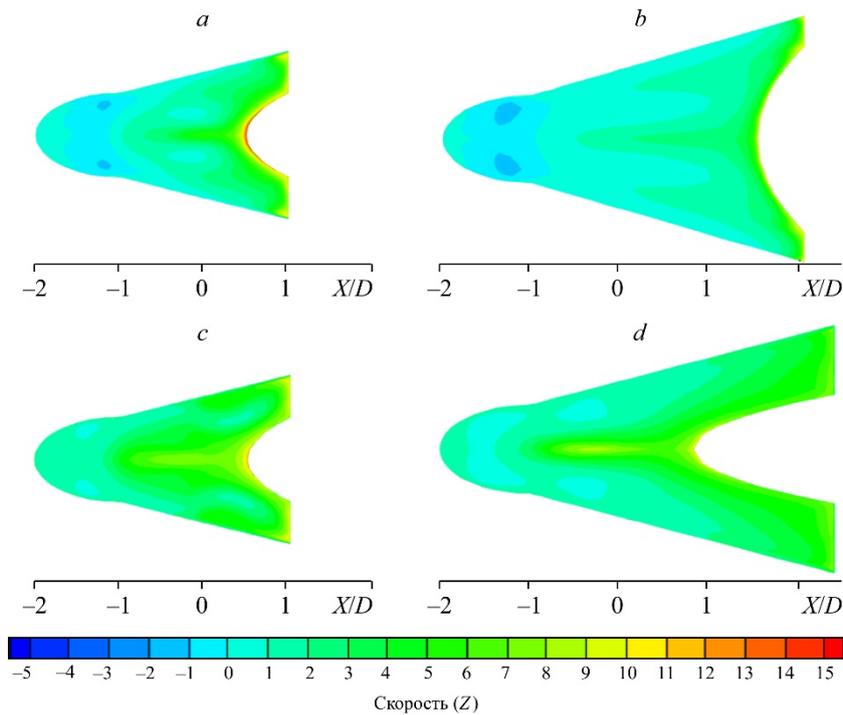


Рис. 6. Поле скорости по оси  $Z$  на выходной плоскости отверстия-кратера. Базовый (а) и оптимальный (б) варианты при  $M = 0,5$ ; базовый (с) и оптимальный (д) варианты при  $M = 1,5$ .

течения улучшает пленочное охлаждение для случая кратероподобного отверстия: дополнительная пара вихрей с противоположным вращением оказывает существенное влияние на масштаб поперечного растекания охладителя. В настоящем исследовании для оценки такого явления как сложный почкообразный вихрь для случая течения вокруг отверстия-кратера авторы выбрали интенсивность пары вихрей по оси  $X$ . Эта оценка выполняется по формуле

$$\omega_x = \frac{\partial U_z}{\partial Y} - \frac{\partial U_y}{\partial Z}, \quad (6)$$

где  $U_z$  и  $U_y$  — скорость течения по осям  $Z$  и  $Y$  соответственно.

Распределения линий тока и изолинии завихренности  $\omega_x$  для течения в плоскости  $X/D = 4$  для базового и оптимального вариантов отверстий при  $M = 0,5$  и  $1,5$  показаны на рис. 7. Для базового варианта при  $M = 0,5$  почкообразный вихрь порождает еще пару вихрей вблизи центральной линии и по бокам. В случае оптимального отверстия при коэффициенте  $M = 0,5$  размер сложного почкообразного вихря сильно возрастает и занимает большую часть области в поперечном направлении. Одна часть вихря вблизи осевой линии почти затухает как по интенсивности, так и по размеру, а вторая часть смещается в угол. В случае более высокого параметра вдува  $M = 1,5$  в силу того, что глубина кратера базового варианта отверстия довольно мала ( $H/D = 0,75$ ), наличие отверстия играет ограниченную роль в эффекте блокировки течения. Большая часть газа-охладителя отрывается от поверхности пластины охлаждения, а в области ниже по течению наблюдается преобладание почкообразного вихря, порождаемого основным течением. При оптимальном варианте отверстия и параметре  $M = 1,5$  из-за более широкого выхода и большей глубины кратера возникает почкообразный вихрь большего размера, что обеспечивает покрытие

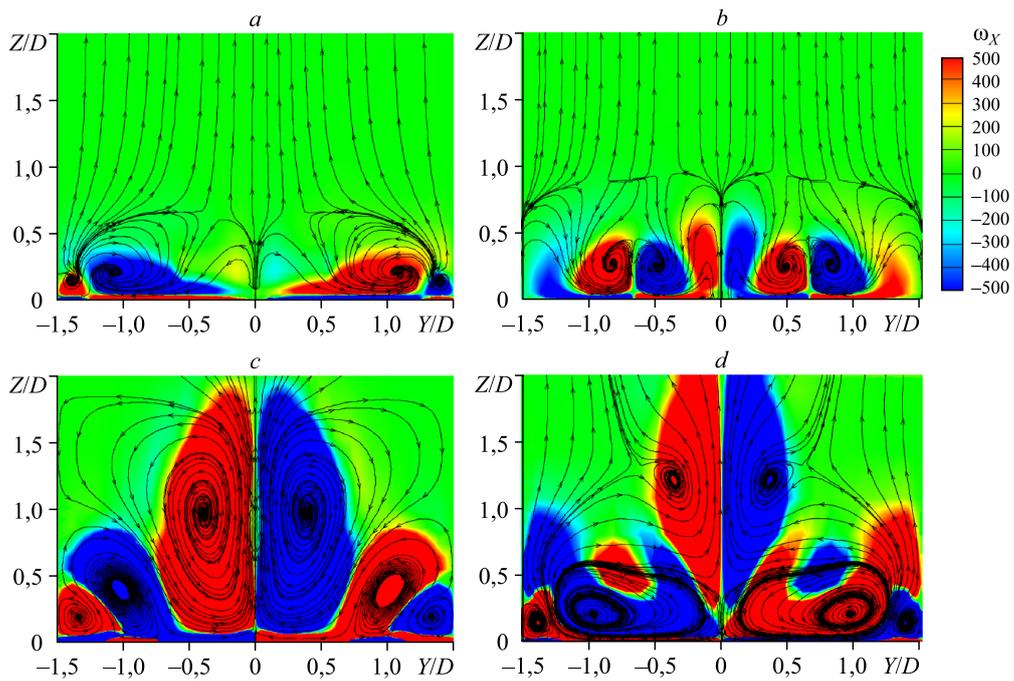


Рис. 7. Распределение поверхностных линий тока и изолинии завихренности  $\omega_x$  в плоскости  $X/D = 4$ .

Базовый (a) и нормальный (b) варианты при  $M = 0,5$ ; базовый (c) и оптимальный (d) варианты при  $M = 1,5$ .

области  $-1,3 \leq Y/D \leq 1,3$ , за ее пределами размер вторичного вихря существенно уменьшается.

На рис. 8 показаны распределения скорости и линий тока в трехмерном представлении для двух вариантов отверстий (базового и оптимизированного) для случаев  $M = 0,5$  и  $1,5$ .

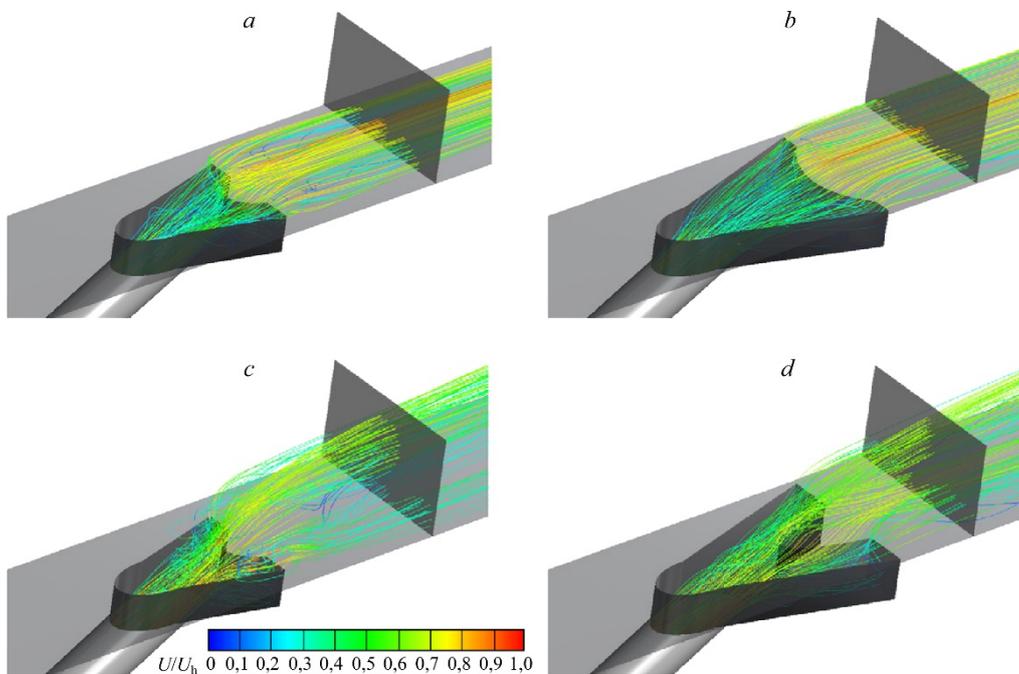


Рис. 8. Распределение скорости потока и линий тока.

Обозначения см. на рис. 7.

В случае отверстия с базовой геометрией при параметре вдува  $M = 0,5$  высокоскоростной поток газа-охлаждителя присоединяется к стенке вблизи осевой линии отверстия, что отрицательно сказывается на продольном распространении охладителя. Напротив, оптимальный вариант отверстия имеет большую площадь кратерного профиля, и за счет этого газ лучше распространяется вширь, так что он покрывает почти все поперечное сечение. Для случая с высоким параметром вдува, равным 1,5, имеет место схожее распределение охлаждающего газа вблизи осевой линии для обоих вариантов отверстий. Однако в случае оптимального отверстия, имеющего большую площадь и глубину кратера, часть охладителя задерживается в отверстии, что позволяет удержанному газу вытекать в обе стороны. Интенсивность и размер струи охладителя становятся меньше, поэтому охлаждающий поток располагается ближе к стене.

На рис. 9 представлены распределения безразмерной температуры в плоскости  $X/D = 4$  для базового и оптимального вариантов отверстий при  $M = 0,5$  и 1,5. Очевидно, что поток через отверстие с оптимальной геометрией при  $M = 0,5$  дает более широкое покрытие зоны охлаждения в поперечном направлении по сравнению с базовым вариантом благодаря тому, что ядро потока охладителя прижимается к стенке. При  $M = 1,5$  ядро потока, проходящего через отверстие с базовой геометрией, находится далеко от стенки. Но в этих же условиях в случае отверстия с оптимальной геометрией (у которого размеры кратера больше) ядро потока прижимается к стенке из-за воздействия интенсивной вихревой пары, а затем оно расширяется в стороны и равномерно распределяется в поперечном направлении.

На рис. 10 показано распределение эффективности пленочного охлаждения на поверхности стенки для двух вариантов отверстий при двух параметрах вдува:  $M = 0,5$  и 1,5. Для случая, когда  $M = 0,5$ , картины распределения охлаждения на стенке для обоих вариантов похожи. Различие только в продольном покрытии области охлаждения стенки: оно лучше для оптимального варианта отверстия из-за большего размера вихря (см. рис. 10a и 10b). Согласно результатам моделирования течения с  $M = 1,5$ , изображенным на рис. 10c

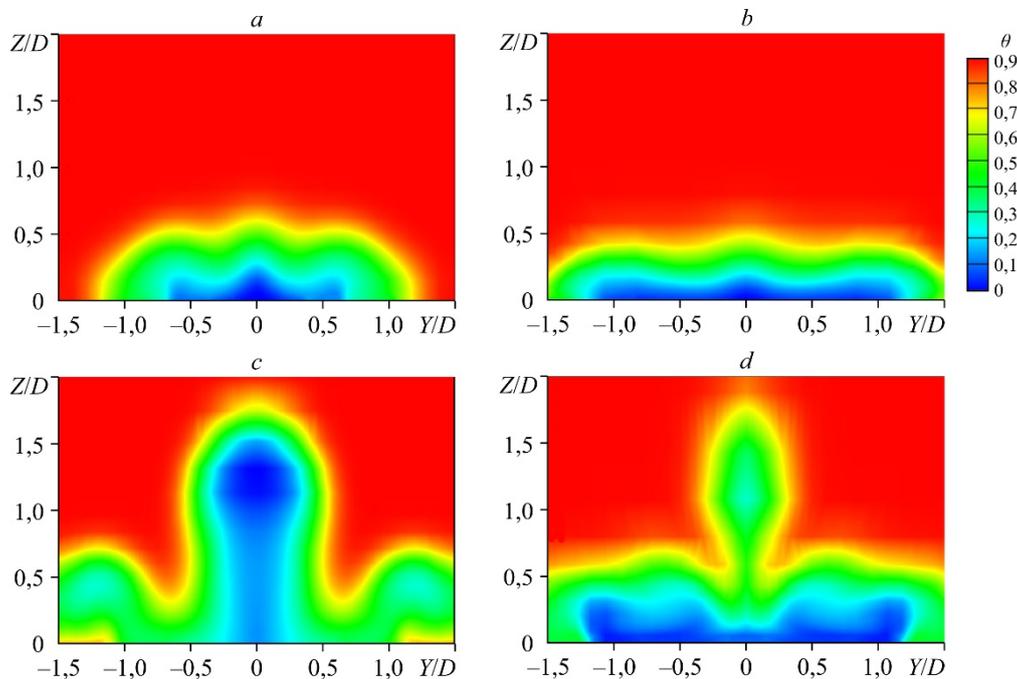


Рис. 9. Поле безразмерной температуры в плоскости  $X/D = 4$ .  
Обозначения см. на рис. 7.

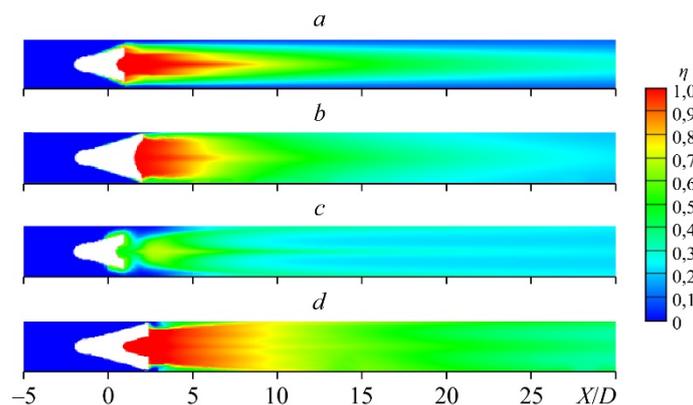
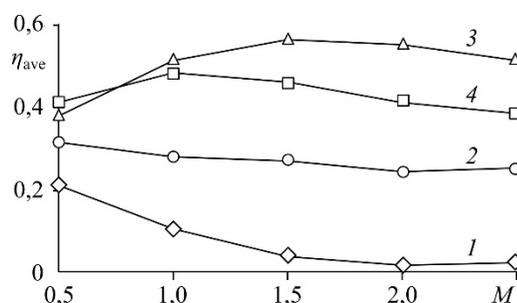


Рис. 10. Графики эффективности пленочного охлаждения для верхней стенки.

Базовый (a) и оптимальный (b) варианты при  $M = 0,5$ ;  
базовый (c) и оптимальный (d) варианты при  $M = 1,5$ .

Рис. 11. Усредненная по площади эффективность пленочного охлаждения для адиабатической стенки для четырех вариантов отверстий при параметрах вдува  $M = 0,5$  и  $2,5$ .

1 — наклонные отверстия,  
2 — базовый вариант отверстий,  
оптимальные варианты для  $M = 1,5$  (3),  $0,5$  (4).



и 10d, локальная эффективность охлаждения усиливается не только вблизи самого отверстия, но и в удаленных областях. В целом отверстие с оптимальной геометрией обеспечивает усиленное пленочное охлаждение, особенно для высокого параметра вдува  $M = 1,5$ .

На рис. 11 представлены графики эффективности пленочного охлаждения для четырех вариантов отверстий при параметрах вдува 0,5 и 2,5: для двух оптимизированных отверстий, базового кратерообразного отверстия и цилиндрического отверстия с наклоном. График показывает, что базовый вариант и полученный оптимизированный вариант отверстий не чувствительны к вариациям параметра вдува по сравнению с простым наклонным отверстием. И хотя оптимальный вариант был получен для фиксированного значения параметра вдува, он все же эффективен и при более высоком его значении, что важно для практического проектирования системы охлаждения. Можно сделать вывод, что метод нейронной сети является удобным инструментом для оптимизации отверстия с кратерообразной выемкой. Альтернативой, конечно, является традиционный способ: проведение оптимизации геометрии отверстия для разных значений параметра вдува или же построение модели, описывающей зависимость между параметром вдува и параметрами формы отверстия для пленочного охлаждения.

## Выводы

Проведено численное моделирование пленочного охлаждения через цилиндрическое отверстие с кратерообразной выемкой, которое выполнялось путем решения трехмерных стационарных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу. На основе экспериментальных данных для расчетов была выбрана модель турбулентности с переносом напряжения сдвига (SST). Было определено пять геометрических параметров для описания кратерообразного профиля: длина и ширина отверстия, глубина кратера (в единицах

диаметра отверстия), длина кратерных выступов (в единицах длины кратера) и ширина кратерных выступов (в единицах ширины кратера), которые рассматривались как параметры оптимизации при параметрах вдува  $M = 0,5$  и  $1,5$ , а усредненная эффективность адиабатического охлаждения рассматривалась как критерий оптимальности. Для обоих значений параметра вдува проведено CFD-моделирование в 16 случаях согласно методу ортогонального плана численного эксперимента. Отверстия с оптимальным набором геометрических параметров были получены с помощью интервального метода и метода нейронной сети с обратным распространением ошибки в комбинации с генетическим алгоритмом (BP-GA). Последний метод показал лучшие результаты для оптимизации параметров выемки. Оптимальное отверстие, полученное по методу оптимизации BP-GA, имеет большие геометрические размеры, чем базовый (исходный) вариант, при обоих вариантах параметра вдува. Уменьшение импульса потока охладителя вдоль оси  $Z$  на выходе из отверстия помогает уменьшить глубину проникновения газа в основной поток и заставляет охлаждающий газ оставаться ближе к охлаждаемой стенке. Кроме того, интенсивность генерации почкообразного вихря ниже по течению становится слабее, а интенсивность аналогичного вихря с противоположным вращением усиливается, что улучшает поперечное распространение потока охладителя. Для параметра вдува  $M = 0,5$  оптимизация кратероподобного отверстия дает выигрыш в эффективности охлаждения на 17,21 % по сравнению с исходным вариантом. Оптимизация кратерного профиля для потока с  $M = 1,5$  при правильной комбинации параметров оптимизации дает более значительный выигрыш — на 101,96 %.

#### Список литературы

1. Goldstein R.J. Film cooling // *Advances in Heat Transfer*. 1971. Vol. 7. P. 321–379.
2. Bogard D.G., Thole K.A. Gas turbine film cooling // *J. Propul. Power*. 2006. Vol. 22, No. 2. P. 249–270.
3. Patent No. 6383602 US. Method for improving the cooling effectiveness of a gaseous coolant stream which flows through a substrate, and related articles of manufacture / Fric T., Campbell R. 2002.
4. Dorrington J.R., Bogard D.R., Bunker R.S. Film effectiveness performance for coolant holes embedded in various shallow trench and crater depressions // *ASME Turbo Expo 2007*. AIAA Paper. 2007. No. GT2007-27992.
5. Lu Y.P., Dhungel A., Ekkad S.V., Bunker R.S. Film cooling measurement for cratered cylindrical inclined holes // *J. Turbomach.* 2009. Vol. 131, No. 2. P. 011005-1–011005-12.
6. Tran N.T., Nguyen C.Q., Ho S.H., Kapat J.S. Prediction of adiabatic effectiveness of various cratered film hole configurations: sensitivity analysis for the rectangle shaped mask // *AIAA Paper*. 2010. No. 2010-0404.
7. Davidson F.T., Dees J.E., Bogard D.G. An experimental study of thermal barrier coatings and film cooling on an internally cooled simulated turbine vane // *ASME Turbo Expo*. AIAA Paper. 2011. No. GT2011-46604. P. 559–570.
8. Zhang Z.W., Qin W.J., Hu J.M. A numerical research on diverse cratered film cooling hole geometries // *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 693. P. 491–497.
9. Kalghatgi P., Acharya S. Improved film cooling with a round film cooling hole embedded in a contoured crater // *J. Turbomach.* 2015. Vol. 137, No. 10. P. 101006-1–101006-10.
10. An B.T., Liu J.J., Zhang X.D., Zhou S.J., Zhang C. Film cooling effectiveness measurements of a near surface streamwise diffusion hole // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. Vol. 103. P. 1–13.
11. Lee K.D., Kim K.Y. Shape optimization of a fan-shaped hole to enhance film-cooling effectiveness // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2010. Vol. 53, No. 15–16. P. 2996–3005.
12. Lee K.D., Kim K.Y. Surrogate-based optimization of a cratered cylindrical hole to enhance film-cooling effectiveness // *J. Therm. Sci. Technol.* 2016. Vol. 11, No. 2. P. 226–238.
13. Zhang C., Wang Z. Effect of the downstream crescent-shaped block height on the flat-plate film flow and cooling performance // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2018. Vol. 59, No. 5. P. 951–961.
14. Bunker R.S. The effects of manufacturing tolerances on gas turbine cooling // *J. Turbomach.* 2009. Vol. 131, No. 4. P. 041018-1–041018-11.
15. Lee K.D., Kim K.Y. Film cooling performance of cylindrical holes embedded in a transverse trench // *Numer. Heat Transfer. Part A*. 2014. Vol. 65. P. 127–143.
16. Bai L.C., Zhang C. Flow mechanism of cooling effectiveness improvement of the cylindrical hole with contoured craters // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 473. P. 012033-1–012033-7.

*Статья поступила в редакцию 9 сентября 2019 г.,  
после доработки — 24 сентября 2019 г.,  
принята к публикации 10 февраля 2020 г.,  
после дополнительной доработки — 29 марта 2021 г.*