

УДК 536.24; 621.45

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ОТ ГЛУБИНЫ КРАТЕРА НА СТЕНКЕ ПРИ НАЛИЧИИ В НЕМ ОТВЕРСТИЯ

Ц. Л. Фу, Л. Ч. Бай<sup>\*,\*\*</sup>, Ч. Чжан<sup>\*,\*\*</sup>, П. Ф. Цзюй<sup>\*,\*\*</sup>

Институт инженерной теплофизики Академии наук Китая, 100190 Пекин, Китай

\* Тяньцзиньская лаборатория разработки передовых мехатронных систем и интеллектуального управления, 300384 Тяньцзинь, Китай

\*\* Тяньцзиньский технологический университет, 300384 Тяньцзинь, Китай

E-mails: fujl@iet.cn, ainuo574891591@163.com, czhangxj@163.com, jupengfei\_tjut@163.com

Представлены результаты исследования влияния глубины кратера на характеристики течения и тепловую эффективность пленочного охлаждения при вдуве вторичного потока через цилиндрические отверстия в профилированных кратерах, предназначенных для распыления защитной пленки на поверхности лопатки турбины. Глубина кратера составляла от 0,25 до 1,25 диаметра цилиндрического отверстия, параметр вдува — от 0,5 до 2,0. Численное моделирование выполнено с использованием метода вычислительной газодинамики. На основе результатов численного моделирования показано, что характер течения вниз по потоку от выходного сечения отверстия существенно зависит от взаимодействия вдуваемой струи с кратером. Эффективность пленочного охлаждения зависит от глубины кратера и параметра вдува, но независимо от этих параметров тепловая эффективность пленочного охлаждения при вдуве через отверстия, расположенные в кратере, больше, чем при вдуве через цилиндрические отверстия в отсутствие кратера. Установлено, что целесообразно использовать кратеры, глубина которых равна диаметру отверстия.

**Ключевые слова:** пленочное охлаждение, профилированные кратеры, глубина кратера, параметр вдува, пара “антивихрей” почковидной формы, эффективность охлаждения адиабатической стенки.

DOI: 10.15372/PMTF20190612

**Введение.** В настоящее время для охлаждения лопаток газовых турбин широко используется пленочное охлаждение. Эффективность охлаждения зависит и от формы отверстий в охлаждаемой стенке, через которые осуществляется вдув, и от параметра вдува [1]. Технология изготовления наклонных цилиндрических отверстий проста, но их применение ограничено вследствие низкой эффективности охлаждения при больших параметрах вдува. Для увеличения эффективности охлаждения при больших параметрах вдува предложено использовать отверстия другой формы, в частности отверстия веерообразной формы. Эффективность охлаждения с использованием таких отверстий существенно больше, но стоимость их изготовления высокая [2].

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Тяньцзиньского фонда естественных наук (грант № 18JQCQNJC07200) и Китайского национального фонда научных исследований (гранты № 51776201, 51506150).

© Фу Ц. Л., Бай Л. Ч., Чжан Ч., Цзюй П. Ф., 2019

Помимо веерообразных отверстий в последнее время предложены два более простых варианта расположения отверстий: наклонные цилиндрические отверстия в пологих траншеях [3, 4] и кратерах [5]. Траншею или кратер, предназначенные для распыления защитной пленки на поверхности лопатки турбины, можно сформировать, разместив маску вокруг цилиндрического отверстия. В ряде исследований установлено, что эффективность охлаждения с использованием отверстий, расположенных в траншее, сопоставима с эффективностью охлаждения с использованием веерообразных отверстий [6, 7]. Эффективность охлаждения с помощью отверстий, расположенных в кратерах, ниже, чем при использовании веерообразных отверстий, но выше, чем при использовании цилиндрических отверстий. Однако применение отверстий, расположенных в кратерах, может привести к существенному уменьшению прочности конструкции [8]. Эту проблему можно решить, используя дискретное расположение отверстий. Меняя площадь выходного сечения отверстий, расположенных в кратерах, можно получить меньшую скорость потока в поперечном направлении, но большую в вертикальном направлении по сравнению со случаем применения отверстий, расположенных в траншеях. При использовании отверстий, расположенных в кратерах, охлаждающая струя распространяется на меньшее расстояние в поперечном направлении, но проникает в основной поток на большую глубину, вследствие чего эффективность охлаждения в этом случае меньше, чем в случае использования отверстий, расположенных в траншеях, что подтверждено экспериментально [6, 7].

Геометрия кратера и его положение относительно выходного сечения цилиндрического отверстия оказывают существенное влияние на распространение струи охлаждающей жидкости (хладагента) и, следовательно, на эффективность охлаждения. В работе [6] исследованы кратеры различной геометрии (эксцентрические и концентрические эллипсы, расширяющиеся в направлении главного потока, круговые кратеры) и их эффективность при охлаждении. Показано, что эффективность кратеров всех трех указанных типов больше эффективности цилиндрических отверстий, но эффективность круговых кратеров больше эффективности эллиптических. Аналогичные результаты получены в работе [9] при исследовании охлаждения плоской пластины в случае вдува через отверстия в кратерах. В работе [10] оптимизировалась геометрия концентрического эллиптического кратера при параметре вдува, равном 0,5, и установлено, что более предпочтительным является кратер, расширяющийся в поперечном направлении. В [8] рассматривались кратеры эллиптической, прямоугольной и треугольной форм, но влияние геометрических параметров на эффективность охлаждения исследовалось только для кратеров прямоугольной формы. В работах [11, 12] изучены кратеры, имеющие форму полусфер и трехгранников. Установлено, что при вдуве через отверстия в трехгранных кратерах эффективность адиабатического охлаждения выше как при средних значениях параметра вдува, так и при больших.

В работе [13] предложены профилированные кратеры с затупленным V-образным выступом. Из результатов численного моделирования следует, что при этом эффективность охлаждения адиабатической стенки увеличивается на 200–300 %, несмотря на увеличение коэффициента теплопередачи на 50–80 % при больших значениях параметра вдува. В работе [14] экспериментально исследовались контурированные кратеры с выступами аналогичной формы, но с большим расширением в продольном направлении. Установлено, что при использовании таких кратеров эффективность охлаждения адиабатической стенки меньше, чем при использовании типичных веерообразных кратеров. Механизм увеличения эффективности охлаждения при вдуве через отверстия в кратерах с криволинейным выступом объяснен в работе [15]. Установлено, что криволинейные выступы играют основную роль в образовании пар “антивихрей” почковидной формы. Вследствие увеличения скорости струи в поперечном направлении на выходе из кратера охладитель распростра-

няется в этом направлении на большее расстояние, а пары почковидных “антивихрей” прижимают его к поверхности.

Эффективность охлаждения, достигаемую при использовании отверстий в пологих траншеях или кратерах, можно получить, не меняя форму цилиндрических отверстий в металлических деталях и используя только тепловые защитные завесы. В соответствии с номинальными геометрическими размерами отверстий и толщиной защитной пленки [16] в работах [5–15] исследовались только кратеры, глубина которых не превышала 0,75 диаметра отверстия. В работе [13] установлено, что эффективность охлаждения увеличивается при глубине кратера, составляющей  $0,25 \div 0,75$  диаметра отверстия. В работе [17] выполнено экспериментальное исследование отверстий в кратерах при различных значениях толщины тепловой завесы, теплопроводности материала лопасти турбины и тепловой защиты. В [17] также показано, что увеличение эффективности теплового охлаждения с увеличением глубины кратера обусловлено увеличением термосопротивления.

В работах [13, 17] установлено, что тепловая эффективность охлаждения при использовании отверстий в кратерах, глубина которых превышает толщину тепловой завесы, больше, чем при использовании отверстий в неглубоких кратерах. Насколько известно авторам данной работы, существует небольшое количество работ, посвященных исследованию эффективности охлаждения при наличии отверстий в глубоких кратерах. В работах [18, 19] приведены результаты исследований эффективности охлаждения при наличии отверстий в глубоких траншеях. В [19] рассматривались отверстия в траншеях различной глубины вплоть до глубин, составляющих 1,25 диаметра отверстия, и установлено, что при значениях параметра вдува в диапазоне от 0,6 до 1,4 наибольшая эффективность охлаждения имеет место в случае использования отверстий в траншеях, глубина которых равна диаметру отверстий.

В данной работе приведены результаты исследования влияния глубины профилированных кратеров на структуру течения и эффективность пленочного охлаждения в широком диапазоне значений параметра вдува.

**Численное моделирование.** При анализе структуры течения и эффективности пленочного охлаждения использовался пакет CFD (ANASYS CFX). Трехмерные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса аппроксимировались по пространственным координатам конечно-разностными уравнениями второго порядка точности. Для моделирования турбулентности использовалась  $(k-\omega)$ -модель турбулентности, представляющая собой комбинацию  $(k-\varepsilon)$ - и  $(k-\omega)$ -моделей с функцией сопряжения. Эта модель использовалась в работе [20] при исследовании эффективности осредненного по поперечной координате процесса охлаждения адиабатической стенки при вдуве через цилиндрические отверстия. Вычисления прекращались, когда среднеквадратичные невязки всех определяемых величин составляли менее  $10^{-5}$ .

Физическая модель состоит из канала, в котором течет основной поток, камеры охлаждения, цилиндрического отверстия в профилированном кратере (рис. 1). Направления осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  совпадают с направлением основного потока, поперечным направлением и направлением нормали к поверхности стенки соответственно. В случае использования отверстия без кратера начало координат находится в центре задней кромки на выходе из цилиндрического отверстия. Диаметр цилиндрического отверстия  $D = 4$  мм, угол наклона отверстия к направлению основного потока равен  $30^\circ$ . Толщина пластины и тепловой завесы равна  $3D$ . Вход в главный канал и выход из него расположены на расстоянии, равном  $30D$ , вверх по потоку от выхода из цилиндрического отверстия и на расстоянии, равном  $50D$ , вниз по потоку. Высота канала, в котором течет основной поток, равна  $10D$ , ширина —  $3D$ . Высота и угол наклона камеры охлаждения те же, что и у канала, в котором течет основной поток. Длина охлаждающей камеры в направлении основного потока рав-

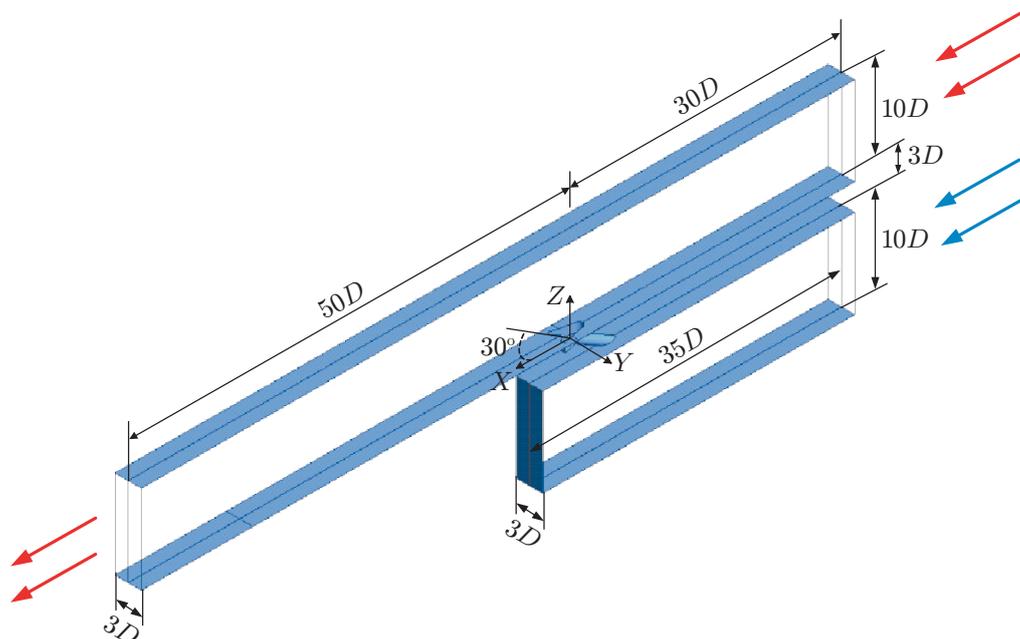


Рис. 1. Физическая модель

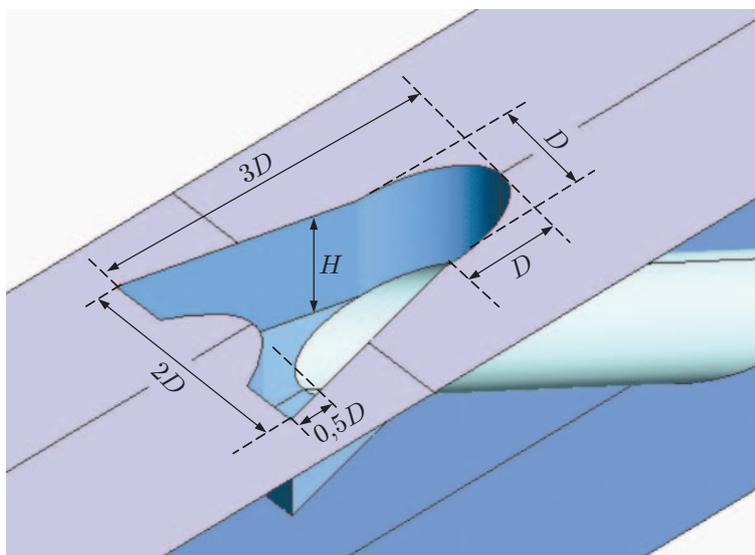


Рис. 2. Геометрия кратера

на  $40D$ . Направление скорости на входе в камеру охлаждения параллельно направлению скорости на входе в канал.

На рис. 2 показана геометрия кратера. Стенки кратера, расширяющегося в направлении потока и в поперечном направлении от точки с координатой  $X = -D$ , представляют собой линейчатую поверхность. Длина и ширина кратера равны  $2D$  и  $3D$  соответственно. Кривизна полуэллиптической кривой с наветренной стороны отверстия считается постоянной. Длина изогнутого выступа равна  $0,5D$ , ширина —  $D$ . Единственным геометрическим параметром, который менялся при моделировании, была глубина кратера, изменявшаяся в диапазоне от 0 до  $1,25D$  с шагом  $0,25D$ . Заметим, что нулевая глубина кратера соответствует случаю его отсутствия.

При численном моделировании основной и охлаждающий потоки представляли собой потоки идеального газа. Все стенки полагались гладкими, адиабатическими, на стенках задавалось условие непротекания. Скорость однородного потока газа на входе в канал, в котором течет основной поток, равна 25 м/с. Статическое давление на выходе из канала составляет 0,1 МПа. Температуры основного потока и потока охлаждающего воздуха равны 414 и 300 К соответственно, что обеспечивает отношение плотностей охлаждающего и основного потоков, равное 1,38. Турбулентность основного и охлаждающего потоков равна 3,5 и 1,0 % соответственно. Число Рейнольдса, вычисленное с учетом скорости основного потока и диаметра отверстия, принято равным  $4,656 \cdot 10^3$ . Скорость на входе в камеру охлаждения изменялась таким образом, чтобы обеспечить требуемое значение параметра вдува, и вычислялась по формуле

$$U_{c,in} = \frac{\rho_{h,in} U_{h,in} M}{\rho_{c,in} A_{hole} / A_{c,in}},$$

где  $U_{c,in}$ ,  $U_{h,in}$  — скорости на входе в камеру охлаждения и в главный канал соответственно;  $\rho_{c,in}$ ,  $\rho_{h,in}$  — плотности охлаждающего воздуха и горячего воздуха в основном потоке соответственно;  $A_{hole}$ ,  $A_{c,in}$  — площади поперечных сечений цилиндрического отверстия и охлаждающей камеры соответственно. Коэффициент вдува  $M$  изменялся в диапазоне от 0,5 до 2,0.

Вследствие симметрии задачи относительно плоскости  $Y/D = 0$  расчеты проводились в области  $0 \leq Y/D \leq 1,5$ , ограниченной плоскостями  $Y/D = 0$  и  $Y/D = 1,5$ , на которых ставились условия симметрии. В этой области рассматривался только один ряд отверстий.

Для оценки эффективности пленочного охлаждения использовались коэффициент локальной эффективности охлаждения адиабатической стенки  $\eta$  и осредненный по области ( $0 \leq Y/D \leq 1,5$ ,  $0 \leq X/D \leq 30$ ) коэффициент эффективности охлаждения адиабатической стенки  $\eta_{ave}$ :

$$\eta = \frac{T_h - T_{aw}}{T_h - T_c}, \quad \eta_{ave} = \int_{X=0}^{30D} \int_{Y=0}^{1,5D} \eta dY dX.$$

Здесь  $T_{aw}$ ,  $T_h$ ,  $T_c$  — температура смеси основного газа и хладагента на верхней адиабатической поверхности пластины, а также температуры основного и охлаждающего потоков соответственно.

Безразмерная температура вычислялась по формуле

$$\theta = \frac{T_f - T_c}{T_h - T_c},$$

где  $T_f$  — температура смеси основного газа и хладагента.

Интенсивность завихренности  $\omega_X$  в направлении оси  $X$ , характеризующая пару почковидных вихрей и пару почковидных “антивихрей”, определялась следующим образом:

$$\omega_X = \frac{\partial U_Z}{\partial Y} - \frac{\partial U_Y}{\partial Z}$$

( $U_Z$ ,  $U_Y$  — компоненты вектора скорости в направлениях осей  $Z$  и  $Y$  соответственно).

Расчетная гексаэдрическая сетка строилась с использованием пакета ICEM CFD. На рис. 3 показана сетка в окрестности отверстия. Сетка сгущалась вблизи стенок, что позволяло учесть особенности гидродинамического и теплового пограничных слоев. Первая точка расчетной сетки находилась на расстоянии от стенки, равном  $0,005D$ , что обеспечивало значение безразмерной координаты  $y^+ < 1$ .

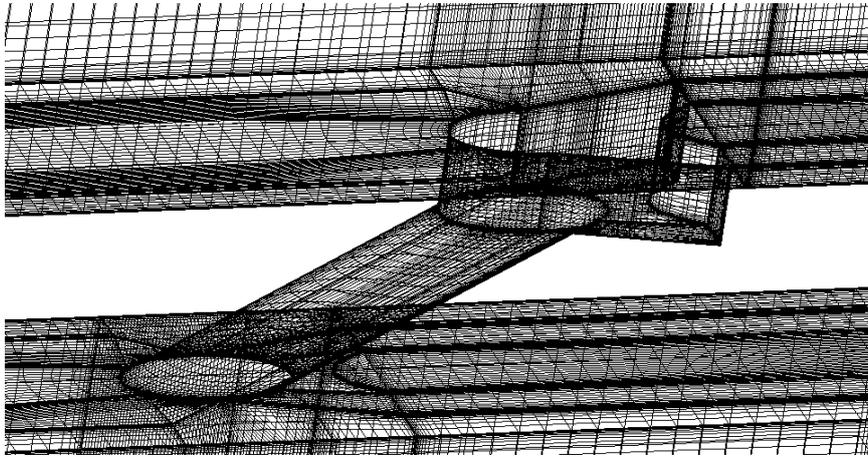


Рис. 3. Расчетная сетка в окрестности отверстия, расположенного в кратере

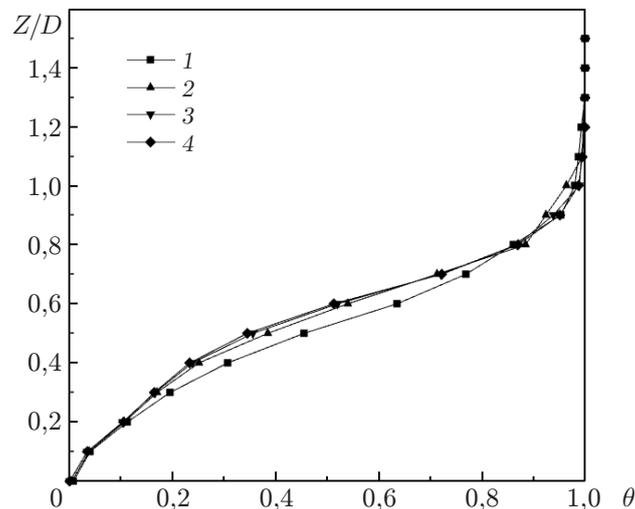


Рис. 4. Распределение безразмерной температуры вдоль линии пересечения плоскостей  $X = 3D$  и  $Y = 0$  при  $H = D$ ,  $M = 0,5$  и различном числе ячеек расчетной сетки:

1 —  $85 \cdot 10^4$ , 2 —  $113 \cdot 10^4$ , 3 —  $134 \cdot 10^4$ , 4 —  $169 \cdot 10^4$

Точность вычислений на расчетной сетке с различным числом ячеек проверялась для случая отверстия в кратере глубиной  $H = D$  и при параметре вдува  $M = 0,5$ . На рис. 4 приведены распределения безразмерной температуры вдоль линии пересечения плоскостей  $X = 3D$  и  $Y = 0$  при  $H = D$ ,  $M = 0,5$  и различном числе ячеек расчетной сетки. Из приведенных на рис. 4 зависимостей следует, что для точного моделирования температурного пограничного слоя достаточно использовать сетку, содержащую  $134 \cdot 10^4$  ячеек. Проверялась также точность вычислений на сетках с различным числом ячеек в случае другой глубины кратеров.

**Результаты численного моделирования и их обсуждение.** На рис. 5 приведены изолинии завихренности и линии тока в плоскости  $X = 5D$  при различных значениях параметров задачи.

В случае отсутствия кратера ( $H = 0$ ) и при малых значениях параметра вдува ( $M = 0,5$ ) охлаждающая жидкость в основном распределена на стенке в окрестности центральной линии отверстия (см. рис. 5,а). В этом случае вниз по течению образуются

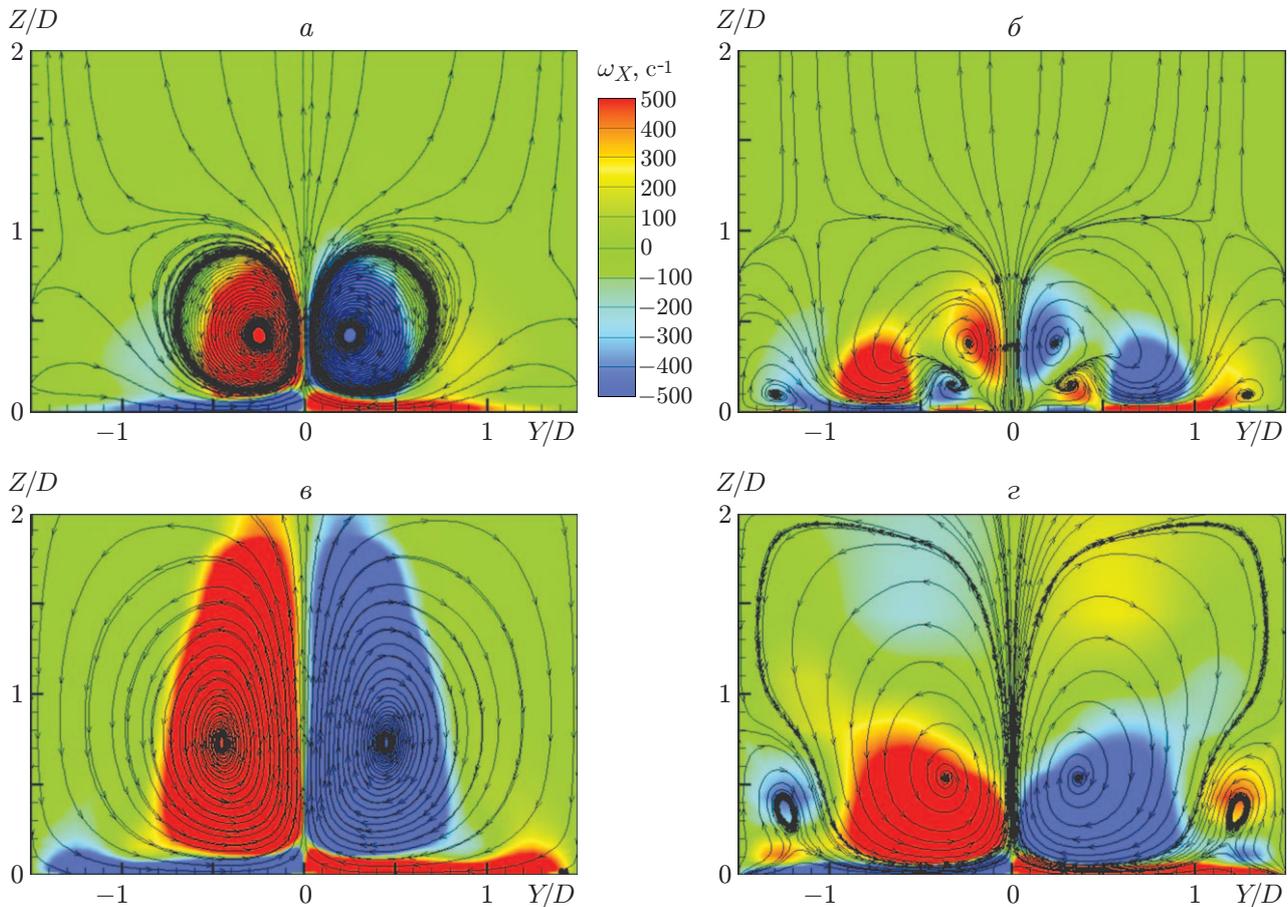


Рис. 5. Изолинии завихренности  $\omega_X$  и линии тока в плоскости  $X = 5D$  при различных значениях параметров задачи:

$a$  —  $H = 0, M = 0,5$ ;  $б$  —  $H = 0,5D, M = 0,5$ ;  $в$  —  $H = 0,5D, M = 1,5$ ;  $г$  —  $H = D, M = 1,5$

пары почковидных вихрей и отсутствуют пары почковидных “антивихрей”. В результате в поперечном направлении охлаждающая жидкость распространяется на небольшое расстояние.

В случае отверстия в неглубоком кратере ( $H = 0,5D$ ) и при значении параметра вдува  $M = 0,5$  (см. рис. 5,б) вследствие взаимодействия потока с криволинейным выступом в окрестности центральной линии отверстия вблизи стенки образуется пара почковидных “антивихрей”. Эта пара “антивихрей” прижимает охладитель к стенке, что способствует его распространению в поперечном направлении. Другая пара почковидных “антивихрей” образуется сбоку вследствие взаимодействия основного потока с потоком охладителя, текущим по прямолинейному участку кратера. Эта пара почковидных “антивихрей” оказывает существенное влияние на течение в областях, расположенных по обе стороны от кратера ( $-1,5 \leq Y/D \leq -1,0, 1,0 \leq Y/D \leq 1,5$ ).

При глубине кратера  $H = 0,5D$  и большом значении параметра вдува ( $M = 1,5$ ) вследствие значительного количества движения струи охладителя, вытекающей из цилиндрического отверстия, большая ее часть быстро проникает в основной поток. В этом случае сформировавшаяся пара почковидных вихрей большой интенсивности оказывает существенное влияние на течение вниз по потоку (см. рис. 5,в). При больших значениях параметра вдува кратер глубиной  $H = 0,5D$  практически не влияет на структуру потока вниз по течению.

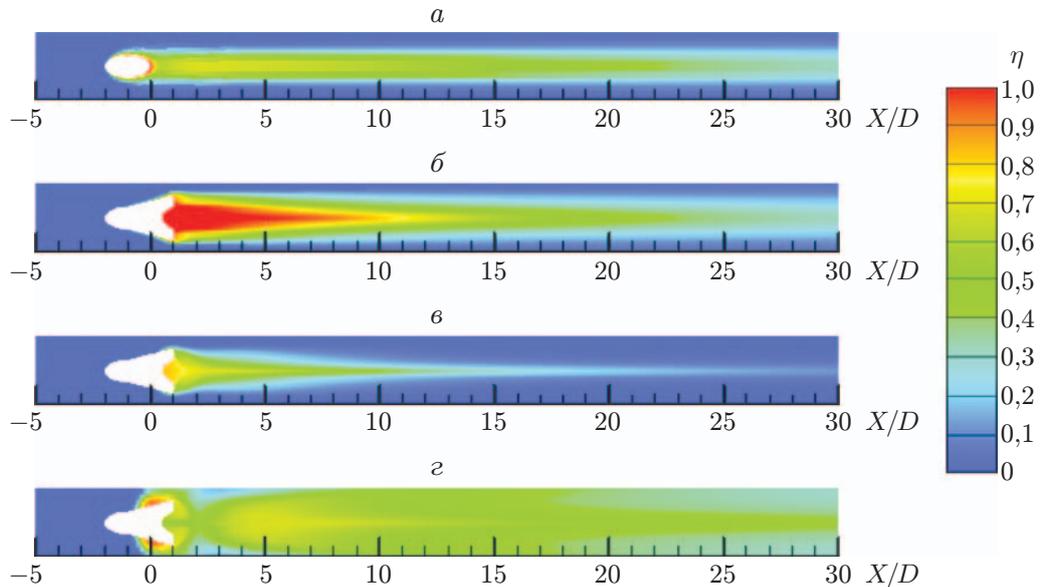


Рис. 6. Изолинии коэффициента эффективности охлаждения адиабатической стенки при различных значениях параметров задачи:

$a$  —  $H = 0$ ,  $M = 0,5$ ;  $b$  —  $H = 0,5D$ ,  $M = 0,5$ ;  $v$  —  $H = 0,5D$ ,  $M = 1,5$ ;  $z$  —  $H = D$ ,  $M = 1,5$

При глубине кратера  $H = D$  наличие у него изогнутого выступа не позволяет большому количеству охладителя быстро проникнуть в основной поток, в результате чего значительно уменьшаются размер и интенсивность сформировавшихся почковидных вихрей (см. рис. 5,2). Более того, на некотором расстоянии от стенки образуется пара почковидных “антивихрей”. В этом случае при больших значениях параметра вдува ( $M = 1,5$ ) глубина кратера оказывает существенное влияние на вихревую структуру.

На рис. 6 приведены изолинии коэффициента эффективности охлаждения адиабатической стенки при различных значениях глубины кратера и параметра вдува. При  $H = 0$  и  $M = 0,5$  (см. рис. 6,а) вблизи центральной линии канала эффективность охлаждения больше, чем вдали от нее, вследствие слабого растекания охлаждающей струи в поперечном направлении. При  $H = 0,5D$  и  $M = 0,5$  (см. рис. 6,б) эффективность охлаждения стенки вниз по течению существенно больше, что обусловлено формированием вблизи центральной линии пары почковидных “антивихрей”. Поскольку в областях  $-1,5 \leq Y/D \leq -1,0$  и  $1,0 \leq Y/D \leq 1,5$  почковидные “антивихри” оказывают существенное влияние на течение, эффективность охлаждения адиабатической стенки увеличивается, несмотря на меньшее количество хладагента. Из рис. 6,а,б следует, что при параметре вдува  $M = 0,5$  наличие кратера приводит к существенному увеличению эффективности охлаждения.

Однако при  $H = 0,5D$  и  $M = 1,5$  эффективность охлаждения резко уменьшается как в направлении основного потока, так и в поперечном направлении (см. рис. 6,в). Уменьшение эффективности охлаждения обусловлено тем, что сформировавшаяся при большом значении параметра вдува пара почковидных вихрей оказывает существенное влияние на структуру течения. При увеличении глубины кратера ( $H = D$ ) эффективность адиабатического охлаждения значительно увеличивается как вблизи центральной линии, так и вдали от нее (см. рис. 6,г). Это происходит вследствие блокирования охлаждающей струи криволинейным выступом и образования пары почковидных “антивихрей” на некотором расстоянии от центральной линии. Таким образом, при больших значениях параметра вдува эффективность охлаждения можно увеличить за счет увеличения глубины кратера.

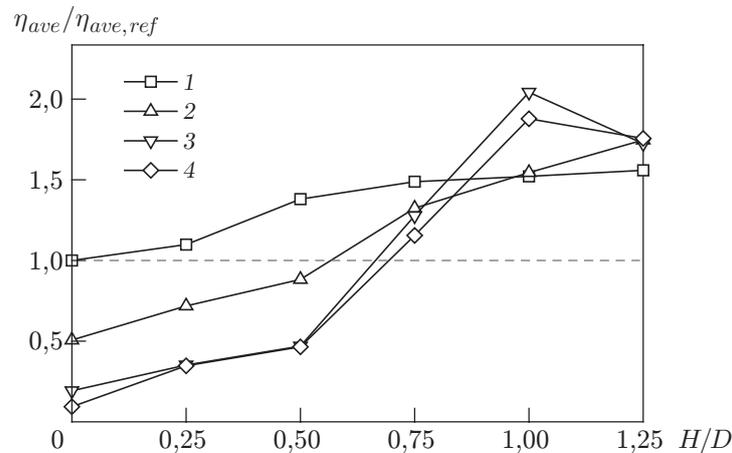


Рис. 7. Зависимость осредненного по площади коэффициента эффективности охлаждения адиабатической стенки от глубины кратера при различных значениях параметра вдува:

1 —  $M = 0,5$ , 2 —  $M = 1,0$ , 3 —  $M = 1,5$ , 4 —  $M = 2,0$

На рис. 7 приведена зависимость осредненного по площади коэффициента эффективности охлаждения адиабатической стенки от глубины кратера при различных значениях параметра вдува ( $\eta_{ave}/\eta_{ave,ref}$  — значения осредненного по площади стенки коэффициента эффективности охлаждения, отнесенные к его значениям в случае отсутствия кратера). Из приведенных на рис. 7 зависимостей следует, что при наличии кратера эффективность охлаждения всегда больше независимо от его глубины. Однако коэффициент эффективности зависит от глубины кратера и параметра вдува. При наличии отверстий в кратерах глубиной  $H = 0,25D \div 0,50D$  при  $M = 0,5$  и  $H = 0,75D \div 1,25D$  при  $M = 0,5 \div 2,0$  эффективность охлаждения больше, чем в случае отсутствия кратера.

При наличии отверстий в кратерах, глубина которых находится в диапазоне  $H = 0 \div 0,75D$ , и параметре вдува  $M = 0,5$  эффективность охлаждения больше, чем при  $M = 1,0 \div 2,0$ . Для кратеров, глубина которых находится в диапазоне  $H = D \div 1,25D$ , при параметре вдува  $M = 1,0 \div 2,0$  эффективность охлаждения больше, чем при  $M = 0,5$ .

При  $M = 0,5 \div 1,0$  эффективность охлаждения увеличивается с увеличением глубины кратера. При параметре вдува  $M = 0,5$  целесообразно использовать кратер глубиной  $H = 0,75D$ , поскольку при дальнейшем увеличении глубины кратера эффективность охлаждения увеличивается незначительно. В случае наличия отверстия в кратере глубиной  $H = 1,25D$  наибольшая локальная эффективность охлаждения имеет место при параметре вдува  $M = 1,0$ . При  $M = 1,5; 2,0$  наибольшая эффективность охлаждения имеет место в случае наличия отверстия в кратере глубиной  $H = D$ . При наличии отверстий в кратерах глубиной  $H \geq 0,75D$  эффективность охлаждения больше, чем при наличии отверстий в кратерах небольшой глубины. При значениях параметра вдува  $M = 0,5 \div 2,0$  с учетом эффективности охлаждения и стоимости изготовления отверстий в металлических деталях рекомендуется использовать отверстия в кратерах глубиной  $H = D$ .

**Заключение.** Исследовано влияние глубины кратеров профилированных отверстий на эффективность охлаждения адиабатической стенки и структуру течения при различных значениях параметра вдува. Установлено, что при наличии кратера с криволинейным выступом глубина проникновения охлаждающей струи в основной поток уменьшается вследствие уменьшения интенсивности пар почковидных вихрей и возникновения пар почковидных “антивихрей”, прижимающих охлаждающую струю к стенке.

Эффективность охлаждения зависит от глубины кратера и параметра вдува. Осредненная по площади эффективность охлаждения увеличивается с увеличением глубины кратера при значениях параметра вдува, находящихся в диапазоне  $M = 0,5 \div 1,0$ . Локальный максимум эффективности охлаждения имеет место в случае наличия отверстия в кратере глубиной  $H = D$  при  $M = 1,5 \div 2,0$ .

С учетом эффективности охлаждения и стоимости изготовления отверстий в металлических деталях рекомендуется использовать отверстия в кратерах глубиной  $H = D$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Bogard D. G., Thole K. A.** Gas turbine film cooling // *J. Propuls. Power.* 2006. V. 22, N 2. P. 249–270.
2. **Bunker R. S.** Film cooling: breaking the limits of diffusion shaped holes // *Heat Transfer Res.* 2010. V. 41, N 6. P. 627–650.
3. **Bunker R. S.** Film cooling effectiveness due to discrete holes with a transverse surface slot. S. 1., 2002. (Paper / ASME; N GT2002-30178).
4. **Pakhomov M. A., Terekhov V. I., Khalatov A. A., Borisov I. I.** Film cooling effectiveness with injection through circular holes embedded in a transverse trench // *Thermophys. Aeromech.* 2015. V. 22, N 3. P. 329–337.
5. **Пат. 6383602 США, МКИ F 01 D 5/08.** Method for improving the cooling effectiveness of a gaseous coolant stream which flows through a substrate, and related articles of manufacture / T. Fric, R. Campbell. Оpubл. 7.05.2002.
6. **Dorrington J. R., Bogard D. G., Bunker R. S.** Film effectiveness performance for coolant holes embedded in various shallow trench and crater depressions. S. 1., 2007. (Paper / ASME; N GT2007-27992).
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. S. 1., 2011. (Paper / ASME; N GT2011-46604).
8. **Tran N., Nguyen C., Ho S., et al.** Prediction of adiabatic effectiveness of various cratered film hole configurations. Pt 1. Sensitivity analysis for the rectangle shaped mask // *Papers AIAA.* 2010. V. 6. P. 4775–4784.
9. **Lu Y., Dhungel A., Ekkad S. V., Kapat J.** Film cooling measurement for cratered cylindrical inclined holes // *J. Turbomach.* 2009. V. 131, N 2. 011005.
10. **Kim J. H., Kim K. Y.** Surrogate-based optimization of a cratered cylindrical hole to enhance film-cooling effectiveness // *J. Thermal Sci. Technol.* 2016. V. 11, N 2. JTST0025.
11. **Khalatov A. A., Panchenko N. A., Severin S. D.** Application of cylindrical, triangular and hemispherical dimples in the film cooling technology // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 891. 012145.
12. **Khalatov A. A., Panchenko N. A., Severin S. D.** Flat plate film cooling at the coolant supply into triangular and cylindrical craters // *MATEC Web Conf.* 2017. V. 115. 09003.
13. **Kalghatgi P., Acharya S.** Improved film cooling with a round film cooling hole embedded in a contoured crater // *J. Turbomach.* 2015. V. 137, N 10. 101006.
14. **An B. T., Liu J. J., Zhang X. D., et al.** Film cooling effectiveness measurements of a near surface streamwise diffusion hole // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2016. V. 103. P. 1–13.
15. **Bai L. C., Zhang C.** Flow mechanism of cooling effectiveness improvement for the cylindrical film cooling hole with contoured craters // *IOP Conf. Ser. Materials Sci. Engng.* 2019. V. 473, N 1. 012033.
16. **Bunker R. S.** The effects of manufacturing tolerances on gas turbine cooling // *J. Turbomach.* 2009. V. 131, N 4. 041018.

17. **Davidson F. T., Kistenmacher D. A., Bogard D. G.** Film cooling with a thermal barrier coating: round, holes, craters and trenches. S. l., 2012. (Paper / ASME; N GT2012-70029).
18. **Lu Y., Dhungel A., Ekkad S. V., et al.** Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // J. Turbomach. 2009. V. 131, N 2. 011003.
19. **Lee K. D., Kim K. Y.** Film cooling performance of cylindrical holes embedded in a transverse trench // Numer. Heat Transfer. Pt A. 2014. V. 65. P. 127–143.
20. **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. V. 59, N 5. P. 951–961.

*Поступила в редакцию 5/II 2019 г.,  
после доработки — 25/IV 2019 г.  
Принята к публикации 27/V 2019 г.*

---