

УДК 536.24; 621.45

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ДЛЯ ВДУВА ХЛАДАГЕНТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ И НА ЕЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Ч. Ван<sup>\*,\*\*</sup>, Ч. Чжан<sup>\*\*\*</sup>, Ш.-Ц. Ли<sup>\*\*</sup>, Ц.-Ц. Лю<sup>\*</sup>, Х.-В. Чжан<sup>\*</sup>

\* Институт инженерной теплофизики Академии наук Китая, 100190 Пекин, Китай

\*\* Школа энергетики Шандунского университета, 250061 Цзинань, Китай

\*\*\* Тяньцзиньская лаборатория разработки передовых мехатронных систем  
и интеллектуального управления, 300384 Тяньцзинь, Китай  
E-mails: wangzhan@sdu.edu.cn, czhangxj@163.com, lisj19@mails.tsinghua.edu.cn,  
jjl@iet.cn, zhw@iet.cn

Методом вычисления связанных мультиполей исследовано влияние на вихревую структуру течения и на термоупругое напряженное состояние пластины геометрии и расположения вдоль направления основного потока пар отверстий для создания струй охлаждающей жидкости, разнонаправленных по отношению к направлению основного потока. Проводится сравнение предложенного способа с традиционным способом расположения отверстий в один ряд вдоль направления основного потока. Показано, что образование почковидных “антивихрей” позволяет увеличить допустимую температуру в окрестности отверстий. При малых параметрах вдува для увеличения эффективности пленочного охлаждения необходимо увеличить расстояние между двумя отверстиями в направлении основного потока или в поперечном направлении, увеличивая тем самым смещение струй в поперечном направлении. При больших параметрах вдува необходимо уменьшить расстояние между отверстиями, чтобы предотвратить разделение двух струй, препятствующее образованию почковидных “антивихрей”. Исследована концентрация напряжений, обусловленная неравномерным распределением температуры.

**Ключевые слова:** пленочное охлаждение парами разнонаправленных струй, геометрические параметры, почковидные “антивихри”, связанные мультиполя, температурные напряжения.

DOI: 10.15372/PMTF20190611

**Введение.** Повышение температуры газа на входе в турбину является эффективным способом увеличения КПД цикла [1–3]. В современных турбинах температура газа на входе превышает температуру, допустимую для материалов, из которых изготовлены лопасти турбины. Поэтому для продления срока эксплуатации лопастей необходимо как их внешнее пленочное охлаждение, так и внутреннее. В отличие от внутреннего охлаждения пленочное охлаждение позволяет существенно уменьшить температуру газа в окрестности внешней поверхности лопасти. При пленочном охлаждении широко используются отверстия цилиндрической формы, что обусловлено простотой их изготовления.

Во многих случаях вследствие высокой температуры газа для охлаждения лопасти требуется большое количество хладагента. Однако при большом количестве движения охлаждающей струи (при большом параметре вдува) и традиционном способе расположения отверстий вдоль направления основного потока происходит отрыв струи от поверхности лопасти, что уменьшает эффективность охлаждения. Возникновение вследствие диффузии струи пары вихрей почковидной формы [4] приводит к уменьшению эффективности пленочного охлаждения, поскольку при большом количестве движения основной струи горячий газ прижимается почковидными вихрями к поверхности лопасти. При большом значении параметра вдува целесообразно располагать отверстия таким образом, чтобы формировались почковидные “антивихри”, которые прижимают холодную струю к поверхности. Примером такого расположения отверстий является расположение пары отверстий, при котором образуется пара разнонаправленных струй (восходящая и нисходящая), находящихся под углом друг к другу. В работах [5–7] изучены механизм и параметры охлаждения при таком расположении отверстий и установлено, что в этом случае образуются почковидные “антивихри”, которые в широком диапазоне значений параметра вдува прижимают охлаждающую струю к стенке. В работе [8] проведено сравнение эффективности пленочного охлаждения при наличии пары разнонаправленных струй (ПРС) с эффективностью охлаждения в случае расположения отверстий в один ряд. В работе [9] исследование течения выполнено методом моделирования крупных вихрей. В [10] изучалось влияние формы отверстий на эффективность охлаждения, в [11] — влияние кривизны поверхности на эффективность охлаждения. В указанных выше работах исследовалась эффективность адиабатического охлаждения и не изучалось влияние на эффективность охлаждения расположения отверстий, в частности расстояния между ними как в направлении основного потока, так и в поперечном направлении.

На долговечность лопастей турбины помимо эффективности охлаждения оказывают влияние температурные напряжения в ней, которые возникают вследствие неоднородности температурного поля. Наличие отверстий, предназначенных для вдува охлаждающего потока, также является причиной появления концентрации напряжений. Поэтому необходимо исследовать термоупругие напряжения, возникающие в процессе пленочного охлаждения. Вследствие сложности экспериментального изучения термоупругих напряжений в лопастях турбины большинство исследований напряженного состояния выполнено путем численного моделирования с использованием метода вычисления связанных мультиполей. В работах [12, 13] исследованы термоупругие напряжения при наличии круговых цилиндрических отверстий. В [14] изучено напряженное состояние лопастей при наличии нескольких цилиндрических отверстий для вдува охлаждающей жидкости и установлено, что концентрация напряжений имеет место в основании лопасти, на ее передней и задней кромках. В работе [15] определено оптимальное расположение отверстий для вдува охлаждающей жидкости в лопасти СЗХ. В [16] установлено, что напряжения, обусловленные наличием центробежной силы, того же порядка, что и термоупругие напряжения.

Таким образом, пленочное охлаждение ПРС является наиболее совершенным способом расположения отверстий для охлаждающего потока. Однако имеется ряд аспектов, требующих дальнейшего изучения. Во-первых, требуется дальнейшее исследование влияния на эффективность охлаждения расстояния между отверстиями как в направлении основного потока, так и в поперечном направлении. Во-вторых, необходимо изучить неадиабатический процесс охлаждения. Это обусловлено тем, что в проведенных ранее исследованиях, как правило, рассматривался адиабатический процесс, но при изучении эффективности пленочного охлаждения требуется решать связанную задачу термоупругости.

В данной работе рассматриваются две задачи, решение которых позволяет определить расположение отверстий при пленочном охлаждении ПРС. С использованием численных

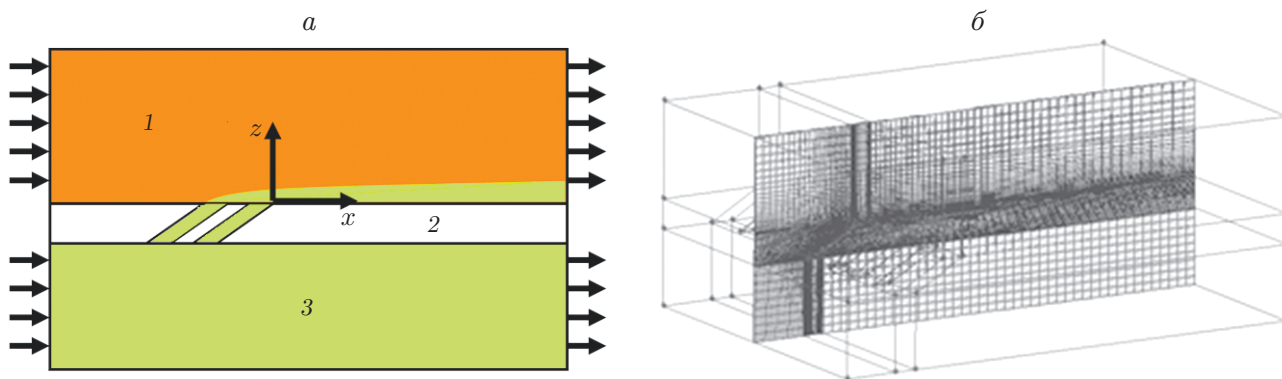


Рис. 1. Схема задачи (а) и расчетная сетка (б):  
 1 — основной поток, 2 — пластина, 3 — охлаждающий поток

методов гидродинамики исследуется влияние расстояния между отверстиями на эффективность пленочного охлаждения и на распределение температуры. С помощью метода вычисления связанных мультиполей изучаются термомеханические свойства пластины.

**1. Модель течения и методы исследования.** На рис. 1 показана область численного моделирования, содержащая основной и охлаждающие потоки и плоскую пластину. Основной и охлаждающие потоки движутся в направлении оси  $x$ . В расчетной области находятся пять пар отверстий. Для того чтобы исключить влияние боковой стенки, ниже приводятся результаты расчета, полученные в окрестности средней пары отверстий. В расчетной области содержится  $2,3 \cdot 10^6$  элементов при расчете гидродинамического течения и приблизительно  $52 \cdot 10^3$  конечных элементов при расчете связанной задачи термоупругости. Количество элементов в расчетной области является достаточным для решения рассматриваемой задачи [13]. Краевые условия соответствуют рабочему режиму типичной направляющей лопасти газовой турбины. Скорость основного потока на входе равна  $U_m = 150$  м/с, его температура  $T_m = 1500$  К, интенсивность турбулентности потока — 10 %. Давление в основном потоке на выходе составляет  $P_m \approx 10^6$  Па. Температура охлаждающего потока равна  $T_c = 700$  К, интенсивность турбулентности этого потока — 5 %.

В плоской пластине имеется пять пар отверстий. Одно отверстие каждой пары создает струю, направленную в положительном направлении оси  $y$ , а другое — в отрицательном (рис. 2). В соответствии с размерами реальных лопастей газовых турбин диаметр отвер-

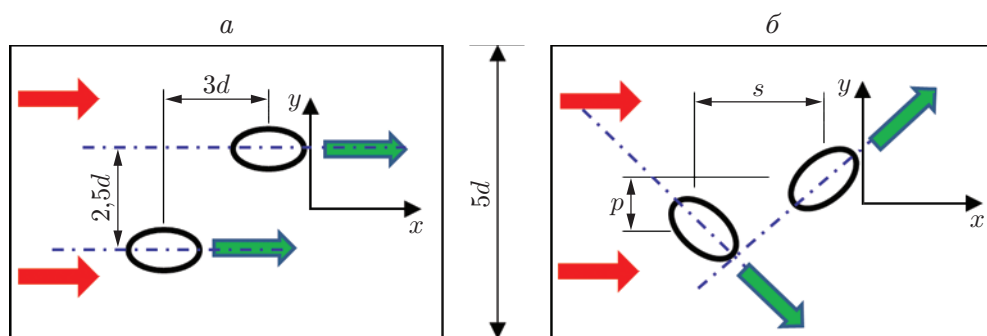


Рис. 2. Система координат и варианты расположения отверстий:  
 а — традиционный (вдоль направления основной струи), б — при пленочном охлаждении ПРС

ствия  $d$  принят равным 1 мм, расстояние между парами отверстий в направлении оси  $y$  принято равным  $5d$ . Обычно при пленочном охлаждении отверстия располагаются таким образом, чтобы струя хладагента была параллельна направлению основного потока в плоскости  $xy$  (вариант 0). В случае пленочного охлаждения ПРС пара отверстий расположена таким образом, что каждая из двух струй образует угол с направлением основного потока, равный  $45^\circ$ . Расположение отверстий в каждой паре характеризуется двумя параметрами: расстоянием между отверстиями в направлении основного потока  $s$  и расстоянием в поперечном направлении  $p$ . В данной работе рассматриваются три варианта расположения отверстий при пленочном охлаждении ПРС: 1)  $p = 0, s = 3d$ ; 2)  $p = 0, s = 6d$ ; 3)  $p = d, s = 3d$ . Параметр вдува определяется следующим образом:

$$M = \frac{\rho_c V_c}{\rho_m V_m}.$$

Здесь  $\rho_c, \rho_m$  — плотности хладагента и газа в основном потоке соответственно;  $V_c, V_m$  — скорости охлаждающей струи и основного потока соответственно. Для того чтобы исследовать влияние количества движения струи, проведены расчеты при значениях параметра вдува  $M$  в интервале от 0,5 до 1,5.

При решении связанной задачи термоупругости для пластины с отверстиями, предназначенными для потока охлаждающей жидкости, использован метод вычисления связанных мультиполей. Для решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса методом конечных объемов использован пакет CFD с решателем CFX. Распределение скоростей и температуры в потоке жидкости описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{U_i U_j}), \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{U_j h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{U_i U_j})], \end{aligned}$$

где  $U$  — скорость;  $\rho$  — плотность;  $T$  — температура;  $x$  — пространственная координата. При решении задачи использовалась SST- $(k-\omega)$ -модель турбулентности [13]. Для определения напряжений и деформаций из системы

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i &= 0, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \\ \sigma_{ij} &= 2G\varepsilon_{ij} + \lambda \varepsilon_{ii} \delta_{ij} - \frac{\alpha E \Delta T}{1 - 2\nu} \delta_{ij}, \\ \lambda u_{i,i} n_i + G n_j (u_{j,i} + u_{i,j}) - \frac{\alpha E \Delta T_{,i}}{1 - 2\nu} n_i &= 0 \end{aligned}$$

температура берется из решения гидродинамической задачи. В уравнениях термоупругости  $\sigma$  — напряжения;  $\varepsilon$  — деформации;  $F$  — внешняя нагрузка;  $u$  — смещение;  $T$  — температура;  $\alpha$  — коэффициент температурного расширения;  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $G, \lambda$  — константы Ламе.

**2. Результаты исследования и их обсуждение.** Пленочное охлаждение используется для защиты лопастей турбины от горячего газа. На рис. 3 приведены изолинии температурного поля для различных вариантов расположения отверстий при параметре

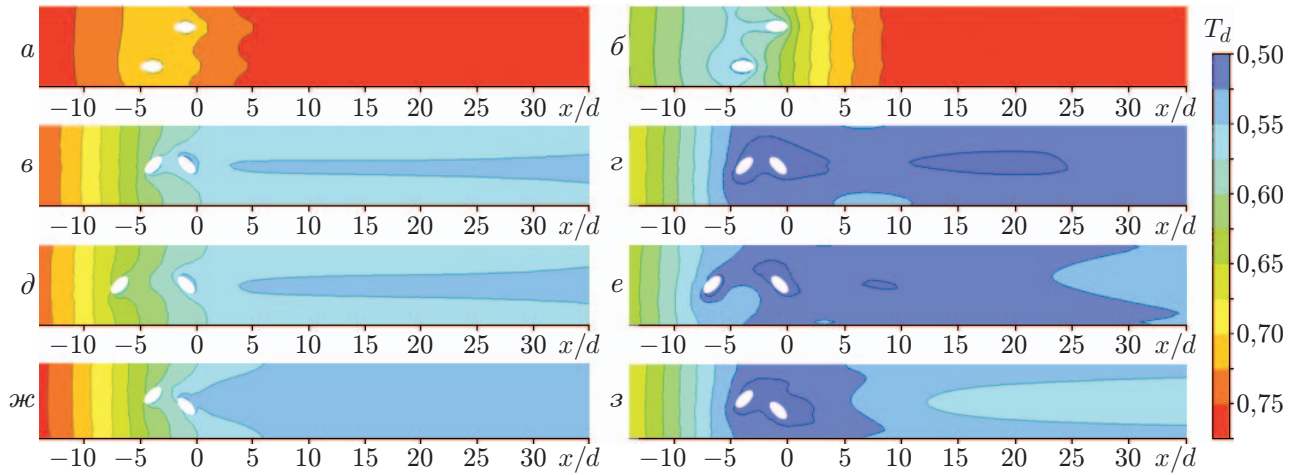


Рис. 3. Изолинии температуры поверхности стенки при различных вариантах расположения отверстий:

*a, б* — вариант 0, *в, г* — вариант 1, *д, е* — вариант 2, *ж, з* — вариант 3; *a, в, д, ж* —  $M = 0,5$ , *б, г, е, з* —  $M = 1,5$

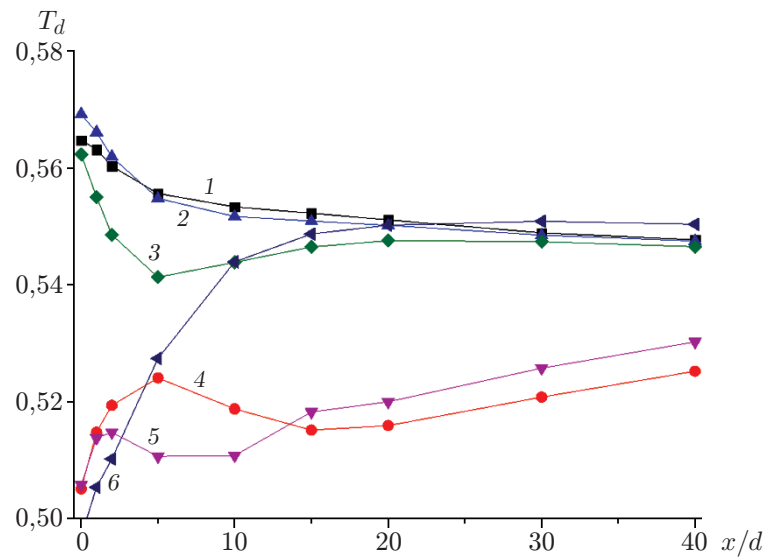


Рис. 4. Зависимость осредненной по поперечной координате безразмерной температуры поверхности стенки от координаты  $x$  при различных вариантах расположения отверстий:

1, 4 — вариант 1, 2, 5 — вариант 2, 3, 6 — вариант 3; 1-3 —  $M = 0,5$ , 4-6 —  $M = 1,5$

вдува  $M = 0,5; 1,5$ . На рис. 4 представлена зависимость от координаты  $x$  осредненной по поперечной координате  $y$  безразмерной температуры

$$\bar{T}_d = \frac{1}{5d} \int_{-2,5d}^{2,5d} T_d dy, \quad T_d = \frac{T - T_c}{T_m - T_c}. \quad (1)$$

Очевидно, что в случае расположения отверстий вдоль направления основного потока (вариант 0) безразмерная температура в области вниз по потоку  $T_d > 0,7$  и практически не зависит от параметра вдува. Эта температура превышает температуру, допустимую для большинства металлов. Только при большом значении параметра вдува ( $M = 1,5$ ) температура в окрестности отверстия, расположенного вверх по потоку, меньше, что обусловлено конвекцией внутри отверстия.

Для вариантов расположения отверстий при пленочном охлаждении ПРС эффективность охлаждения существенно зависит от параметра вдува. При  $M = 0,5$  наибольшая эффективность охлаждения в области вниз по потоку имеет место в случае варианта 3 расположения отверстий ( $s = 3d, p = d$ ). В этом случае ширина области охлаждения в поперечном направлении также больше, чем в случае двух других вариантов расположения отверстий. При  $M = 1,5$  наименьшая температура имеет место в случае варианта 1 ( $s = 3d, p = 0$ ) и варианта 2 ( $s = 6d, p = 0$ ) расположения отверстий. При  $x/d > 15$  в случае варианта 2 температура больше, чем в случае варианта 1. В области вверх по потоку при  $M = 0,5$  температура больше, чем при  $M = 1,5$ . Эффективность охлаждения в основном зависит от коэффициента теплопередачи внутри отверстия, который в свою очередь зависит от параметра вдува.

На рис. 5 приведены поле скоростей и изолинии безразмерной осредненной по поперечной координате температуры (см. (1)) в сечении  $x/d = 5$  при  $M = 0,5; 1,5$  и различных вариантах расположения отверстий. В случае варианта 0 расположения отверстий каждое отверстие генерирует пару почковидных вихрей. При распространении охлаждающей струи в основном потоке образуются пары внешних почковидных вихрей, которые захватывают высокотемпературный поток и прижимают его к стенке. Наиболее существенно это явление проявляется при больших значениях параметра вдува ( $M = 1,5$ ), поэтому невозможно уменьшить температуру только за счет увеличения расхода хладагента.

В случае расположения отверстий в соответствии с вариантами пленочного охлаждения ПРС механизм образования вихрей иной. Вследствие того что угол между охлаждающими струями и основным потоком составляет  $45^\circ$ , со стороны основного потока возникает сила реакции. В результате каждая струя формирует вихри, вращающиеся в противоположных направлениях, два вихря представляют собой пару почковидных “антивихрей”. Например, в плоскости  $yz$  восходящая струя, движущаяся в положительном направлении оси  $y$ , формирует вихрь, вращающийся в отрицательном направлении оси  $y$ , аналогично нисходящая струя формирует вихрь, вращающийся в положительном направлении оси  $y$ .

При параметре вдува  $M = 0,5$  в случае варианта 1 расположения отверстий восходящая струя, прежде чем занять положение, которое она заняла бы, двигаясь по потоку по кратчайшему пути, сталкивается с другой струей, в результате чего удаляется от стенки. Поэтому формирование на поверхности пластины эффективной пары почковидных “антивихрей” с использованием двух отдельных струй затруднено. В варианте 2 вследствие большего расстояния между отверстиями в направлении основного потока восходящая струя занимает свое положение на поверхности пластины до момента столкновения с нисходящей. В этом случае две струи достаточно легко объединяются и формируют близкую к симметричной пару почковидных “антивихрей”, препятствующих перегреву стенки. В варианте 3, так же как и в варианте 2, вследствие достаточно большого рас-

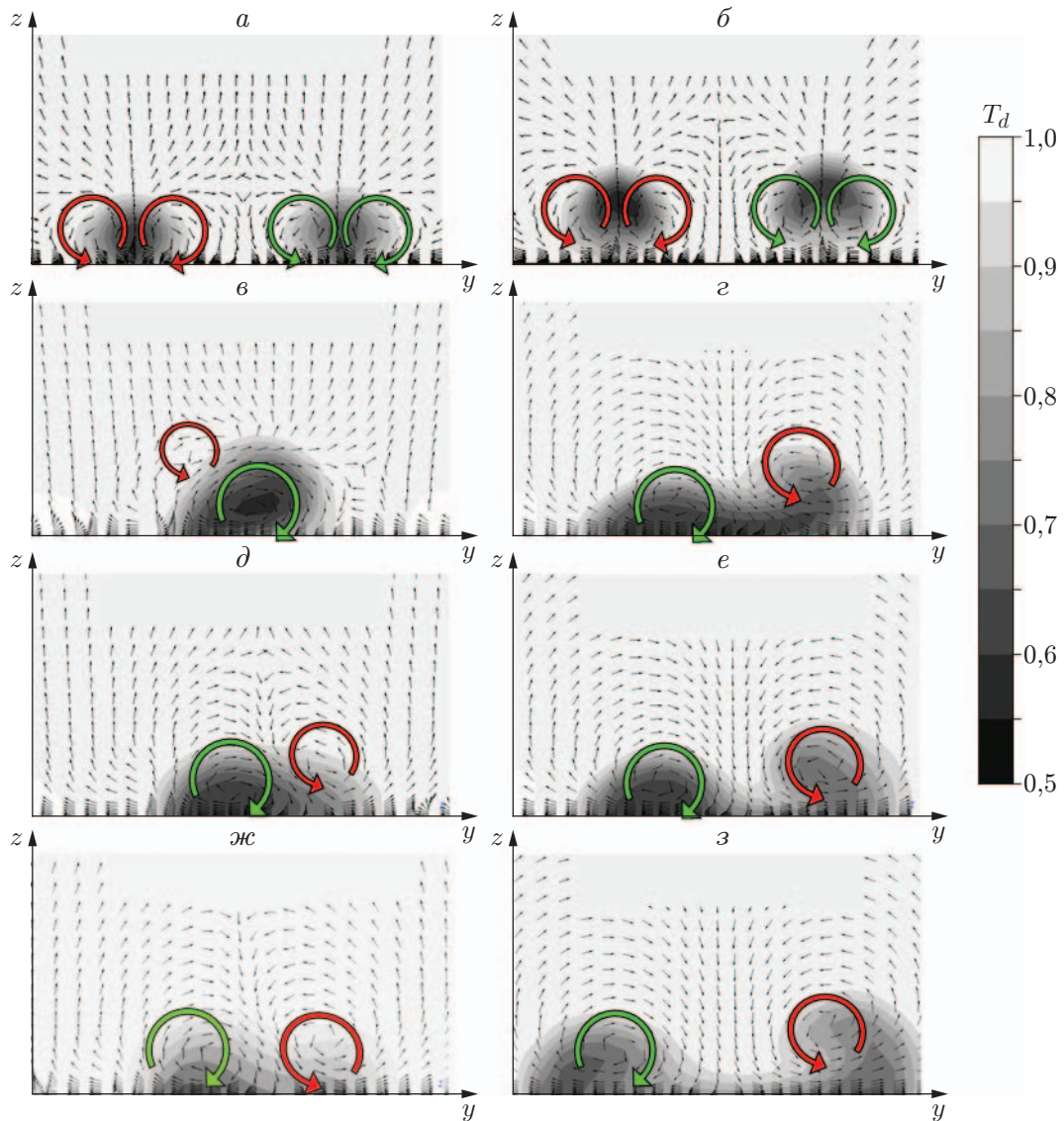


Рис. 5. Поле скоростей и изолинии безразмерной осредненной по поперечной координате температуры в сечении  $x/d = 5$  при различных вариантах расположения отверстий:

$a, б$  — вариант 0,  $в, г$  — вариант 1,  $д, е$  — вариант 2,  $ж, з$  — вариант 3;  $a, в, д, ж$  —  $M = 0,5$ ,  $б, г, е, з$  —  $M = 1,5$

стояния между отверстиями в поперечном направлении восходящая струя занимает свое положение на стенке до момента столкновения с нисходящей струей. В этом случае две струи формируют симметричную пару почковидных “антивихрей”, препятствующих перегреву поверхности стенки. При большом параметре вдува ( $M = 1,5$ ) в варианте 1 обе струи занимают свое положение на стенке, не сталкиваясь, несмотря на то что расстояние между отверстиями небольшое. Однако в варианте 2 две струи движутся на большом расстоянии друг от друга и не могут сформировать почковидные “антивихри” достаточной интенсивности. Таким образом, при небольших значениях параметра вдува большое расстояние между отверстиями является более предпочтительным, в то время как при больших значениях этого параметра предпочтительными являются небольшие расстоя-

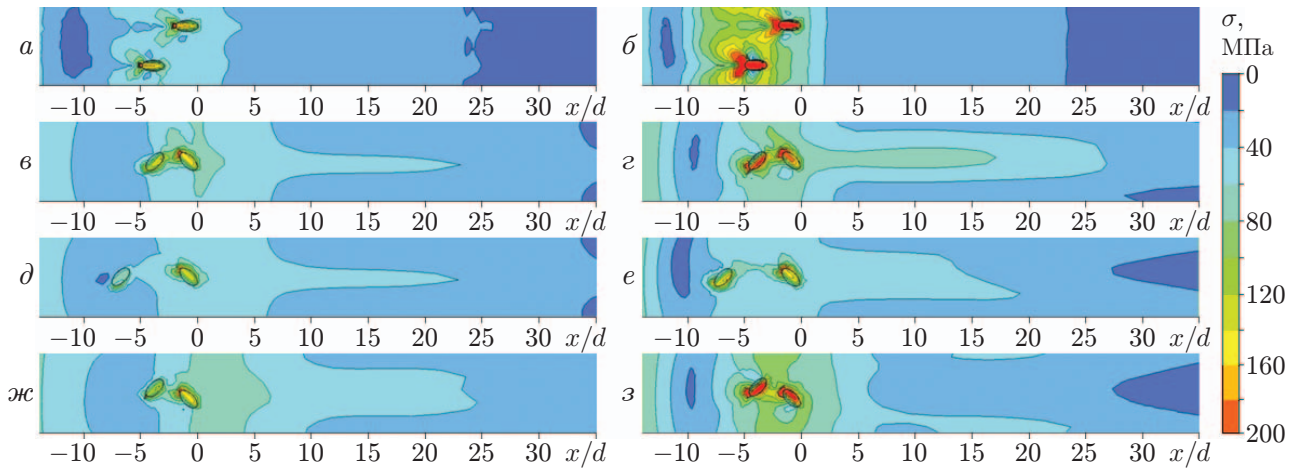


Рис. 6. Изолинии температурных напряжений при различных вариантах расположения отверстий:

*a, б* — вариант 0, *в, з* — вариант 1, *д, е* — вариант 2, *ж, з* — вариант 3; *a, в, д, ж* —  $M = 0,5$ , *б, з, е, з* —  $M = 1,5$

Максимальные температурные напряжения  $\sigma$   
на выходе из отверстия

Вариант расположения отверстий	$\sigma$ , МПа	
	$M = 0,5$	$M = 1,5$
0	232	535
1	212	290
2	190	213
3	285	320

ния между отверстиями. В варианте 3 два вихря полностью разделены, в этом случае не формируется пара почковидных “антивихрей” достаточной интенсивности, поэтому вблизи центральной линии отсутствует охлаждающая пленка. Таким образом, в случае расположения отверстий при пленочном охлаждении ПРС наличие зазора между отверстиями в поперечном направлении целесообразно при небольших значениях параметра вдува (например, при  $M \leq 0,5$ ).

На рис. 6 представлены изолинии температурных напряжений при  $M = 0,5; 1,5$  для всех рассмотренных вариантов расположения отверстий. В таблице приведены максимальные значения температурных напряжений. Неоднородное распределение коэффициента температурного расширения может быть причиной возникновения температурных напряжений. Поскольку температура вблизи отверстий существенно меньше температуры в других областях потока, в окрестности отверстий происходит концентрация напряжений. Так, напряжения в большей части пластины не превышают 40 МПа, в то время как в окрестности отверстий они могут достигать 200 МПа. При параметре вдува  $M = 0,5$  температурные напряжения не превышают 200 МПа, а при  $M = 1,5$  они могут превышать 200 МПа.

В случае расположения отверстий вдоль направления основного потока температурные напряжения существенно больше напряжений, возникающих в случае расположения отверстий при пленочном охлаждении ПРС, и при  $M = 1,5$  могут превышать 500 МПа. Среди всех рассмотренных вариантов расположения отверстий при пленочном охлаждении



ПРС наибольшая концентрация напряжений имеет место для вариантов 1, 3 при  $M = 1,5$ . Область, в которой напряжения превышают 200 МПа, для вариантов 1, 3 больше, чем для варианта 2. Это обусловлено тем, что в вариантах 1, 3 расстояние между отверстиями меньше, чем в варианте 2.

Из результатов численного анализа следует, что при небольших значениях параметра вдува ( $M = 0,5$ ) наименьшая температура и наименьшие температурные напряжения имеют место в случае варианта 3 расположения отверстий. При больших значениях параметра вдува ( $M = 1,5$ ) наименьшая температура имеет место в случае вариантов 1, 2 расположения отверстий. Однако для варианта 2 температурные напряжения наименьшие. Следовательно, в случае варианта 2 расположения отверстий эффективность охлаждения и механическое состояние пластины наилучшие.

**Заключение.** С использованием метода расчета мультиполей исследовано влияние на вихревую структуру течения расстояния между отверстиями, расположенными таким образом, чтобы каждой парой отверстий создавались две струи охлаждающей жидкости (восходящая и нисходящая).

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

При традиционном способе расположения отверстий вдоль направления основного потока образуется пара почковидных вихрей, которые прижимают горячий поток к стенке, в результате чего невозможно эффективное охлаждение поверхности, особенно при больших значениях параметра вдува.

Почковидные “антивихри” прижимают холодный поток к стенке. Расстояние между отверстиями оказывает существенное влияние на вихревую структуру течения. При малых значениях параметра вдува ( $M = 0,5$ ) расстояние между двумя отверстиями в направлении основного потока или в поперечном направлении следует увеличить, при больших значениях параметра вдува ( $M = 1,5$ ) — уменьшить.

В случае отверстий, расположенных таким образом, что каждая пара отверстий создает две струи охлаждающей жидкости (восходящую и нисходящую), концентрация температурных напряжений существенно уменьшается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Han J. C.** Gas turbine heat transfer and cooling technology / J. C. Han, S. Dutta, S. Ekkad. L.: Taylor and Francis, 2000.
2. **Volchkov E. P., Kutateladze S. S., Leont'ev A. I.** Effect of compressibility and nonisothermicity on the efficiency of film cooling in a turbulent boundary layer // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1966. V. 7, N 4. P. 93–94.
3. **Volchkov E. P., Levchenko V. Ya.** Effectiveness of gas film cooling for a turbulent boundary layer // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1965. V. 5, N 5. P. 100–102.
4. **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.
5. **Kusterer K., Bohn D., Sugimoto T., et al.** Double-jet ejection of cooling air for improved film-cooling. S. l., 2006. (Paper / ASME; N GT-2006-90854).
6. **Kusterer K., Elyas A., Bohn D., et al.** Double-jet film-cooling for highly efficient film-cooling with low blowing ratios. S. l., 2008. (Paper / ASME; N GT-2008-50073).
7. **Kusterer K., Bohn D., Sugimoto T., et al.** Influence of blowing ratio on the double-jet ejection of cooling air. S. l., 2007. (Paper / ASME; N GT-2007-27301).
8. **Wang Z., Liu J., An B., et al.** Effects of axial row-spacing for double-jet film-cooling on the dimensionless temperature. S. l., 2011. (Paper / ASME; N GT2011-46055).

9. **Graf L., Kleiser L.** Large-eddy simulation of double-row compound-angle film cooling: setup and validation // *Comput. Fluids*. 2011. V. 43. P. 58–67.
10. **Farzad B., Pegah P.** Film cooling flow by double rows of compound angle and compound angle shaped holes. S. l., 2013. (Paper / ASME; N GT2013-95272).
11. **Liao G., Wang X., Li J., et al.** Effects of curvature on the film dimensionless temperature of double-jet film cooling. S. l., 2014. (Paper / ASME; N GT2014-26263).
12. **Wang Z., Zhang C., Liu J. J.** Thermal-elastic coupling analysis of round-hole flat-plate film-cooling // *J. Aerospace Power*. 2015. V. 30. P. 1298–1306.
13. **Wang Z., Zhang C., Chen Y., et al.** Study on thermo-elastic coupling characteristics of dual-row film cooling // *J. Propuls. Technol.* 2017. V. 38. P. 2038–2045.
14. **Sierra F. Z., Bolaina C., Kubiak J., et al.** Heat transfer and thermal mechanical stress distributions in gas turbine blades. S. l., 2009. (Paper / ASME; N GT2009-59194).
15. **Nowak G., Wroblewski W.** Thermal mechanical optimization of cooled turbine blade. S. l., 2007. (Paper / ASME; N GT2007-28196).
16. **Amaral S., Verstraete T., Braembussche R. V., et al.** Design and optimization of the internal cooling channels of a HP turbine blade. Pt 1. Methodology. S. l., 2008. (Paper / ASME; N GT2008-51077).

*Поступила в редакцию 30/XI 2018 г.,  
после доработки — 1/IV 2019 г.  
Принята к публикации 27/V 2019 г.*

---