

УДК 536.24

Численное исследование влияния формы вихрегенераторов на эффективность пленочного охлаждения*

Д. Чжэн^{1,2}, С. Ван¹, Ц. Юань¹

¹ Университет Сиань Цзяотун, Сиань, Китай

² Университет Торонто, Торонто, Канада

E-mail: xinjun_wang@outlook.com

Проведено численное исследование метода улучшения эффективности пленочного охлаждения путем размещения разнообразных вихрегенераторов перед отверстием для подачи охладителя. Исследовано девять различных форм вихрегенераторов, в том числе в виде прямоугольника, треугольника, параллелограмма и трапеции. Эффективность пленочного охлаждения определялась при отношении плотностей основного и вторичного потоков 0,97 и при вариации параметра вдува в пределах 0,5–1,5. Полученные результаты показали, что эффективность пленочного охлаждения значительно улучшается при установке вихрегенератора выше по потоку источника охладителя. Закрученные потоки от вихрегенератора вращаются в противоположном направлении от пары вихрей со встречным вращением, ослабляя их эффект. Кроме того, прямоугольный вихрегенератор обеспечивает наиболее однородный слой хладагента в поперечном направлении и наибольшую усредненную эффективность адиабатического охлаждения, но при его применении проявляется побочный эффект — увеличивается суммарная потеря давления.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, профилированный вихрегенератор, численное исследование, эффективность адиабатического охлаждения.

Рабочая температура газовой турбины, как правило, выше, чем способен выдержать материал, из которого изготовлена турбина. Для уменьшения повреждений от таких высоких температур применяются различные технологии охлаждения. Для защиты рабочей лопатки первой ступени газовой турбины широко применяется пленочное охлаждение в целях создания преграды горячему газу. В связи с этим исследователи проявляют большой интерес к улучшению эффективности пленочного охлаждения.

При пленочном охлаждении хладагент истекает из компрессора и выбрасывается через отверстия для подачи охладителя, расположенные на защищаемой поверхности. Часть хладагента неизбежно попадает в основной поток, вызывая его интенсивное смешивание с набегающим горячим потоком газа. Такое смешивание, происходящее под воздействием пары вихрей со встречным вращением (ПВВВ; в англоязычной литературе — counter rotating vortex pair или kidney vortices), значительно влияет на эффективность пленочного охлаждения. Для уменьшения неблагоприятного влияния ПВВВ и улучшения эффективности пленочного охлаждения предлагается модифицировать пограничный слой, образующийся при подаче охладителя [1–3]. Для повышения эффективности пленочного охлаждения помимо изменения геометрии отверстия выпуска охладителя вниз

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Китайского совета по стипендиям (CSC).

по течению от отверстия устанавливался вихрегенератор (ВГ) в форме треугольника [4, 5]. Кроме того, эффективность пленочного охлаждения усиливалась вверх по потоку [6]. Дальнейшее исследование данной конфигурации проводилось в работах [7–9]. Все указанные работы были сосредоточены на модификации формы отверстия охладителя с тем, чтобы увеличить производительность охлаждения путем уменьшения неблагоприятного воздействия пары вихрей со встречным вращением. В этих работах мало внимания уделялось эффектам, связанным с размещением вихрегенератора перед отверстием для подачи охладителя и формой последнего для уменьшения неблагоприятного воздействия ПВВВ. В настоящей работе продолжено исследование эффективности пленочного охлаждения за счет расположения ВГ перед отверстием для подачи охладителя.

На рис. 1, 2 показаны особенности форм ВГ. Начало координат расположено со стороны заднего края выходного отверстия охладителя. Диаметр отверстия охладителя $D = 10$ мм, его длина составляет $2,5D$ и угол впрыска — 30° в направлении потока. Изучаются девять вариантов ВГ, расположенных на расстоянии $2,5D$ вверх по потоку от отверстия охладителя. Все девять случаев различаются только формой поперечного сечения ВГ. Средой основного течения предполагается воздух как идеальный газ с температурой $T_m = 298,15$ К и скоростью потока $u_m = 15$ м/с. Средой хладагента предполагается воздух как идеальный газ с температурой $T_c = 318,15$ К. Заданы интенсивность турбулентности набегающего потока (0,5 %) и масштаб длины D . Отношение плотности хладагента (DR) к основному течению принято равным 0,97. Массовые расходы основного и вторичного течений задаются во входном отверстии такими, чтобы обеспечить коэффициент вдува M равным 0,5, 1,0 и 1,5. Условие на выходе — атмосферное давление (1,013 бар). На двух боковых стенках отверстия для подачи охладителя в поперечном направлении заданы граничными условиями симметрии. Другие стенки предполагались адиабатическими с условием прилипания.

Чтобы гарантировать, что результаты вычислений не зависят от размера ячейки, было выполнено исследование их чувствительности к плотности расчетной сетки. Для обеспечения качества и достоверности полученных результатов моделирования также было

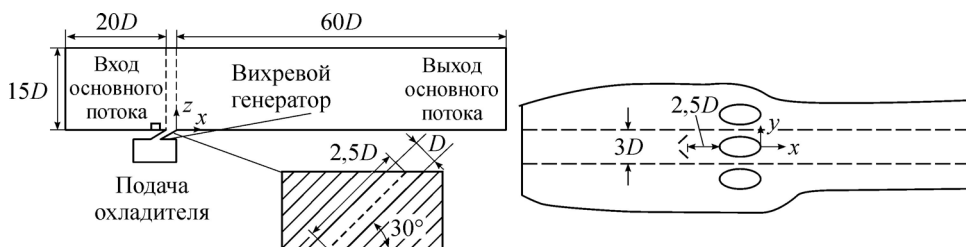


Рис. 1. Вычислительная модель, вид в плане.

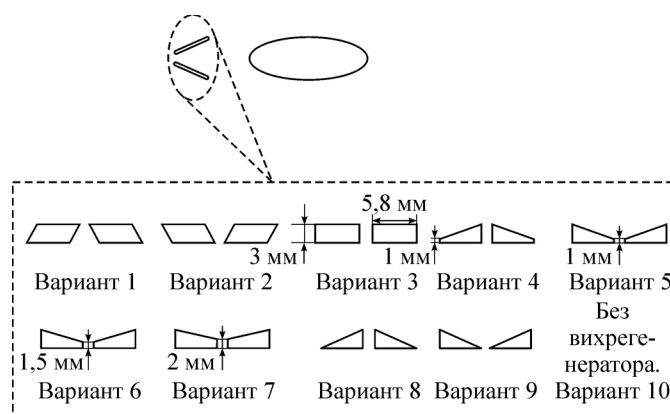


Рис. 2. Варианты форм вихревых генераторов.

проведено тестовое исследование. Показано, что $k-\varepsilon$ модель турбулентности лучше согласуется с экспериментальными данными, чем другие модели турбулентности. Таким образом, $k-\varepsilon$ модель турбулентности принята в качестве базовой для дальнейших расчетов.

Коэффициент полных потерь давления может быть записан как

$$C_{p,t} = \frac{p_{0,t,\text{ref}} - p_{1,t}}{0,5 \cdot \rho_1 \cdot u_1^2}, \quad (1)$$

где $p_{1,t}$ — средний массовый расход для полного давления на выходе основного потока, ρ_1 и u_1 — плотность и скорость на выходе соответственно. Влияние вторичного потока учитывается введением параметра $p_{0,t,\text{ref}}$ предложенного в работе [10]. Этот параметр имеет вид

$$p_{0,t,\text{ref}} = \frac{m_h}{m_h + m_c} p_{0,h,t} + \frac{m_c}{m_h + m_c} p_{0,c,t}, \quad (2)$$

где $p_{0,t,\text{ref}}$ и $p_{0,c,t}$ — средний массовый расход для полного давления на входе основного потока и выходе охлаждающей жидкости соответственно, m_h и m_c — массовый расход для основного и вторичного потоков соответственно.

Завихренность потока ω_z , описанная в [11], преобладает над сдвиговым напряжением с положительными значениями, и большие значения ω_z представляют более интенсивные вихри:

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)^2. \quad (3)$$

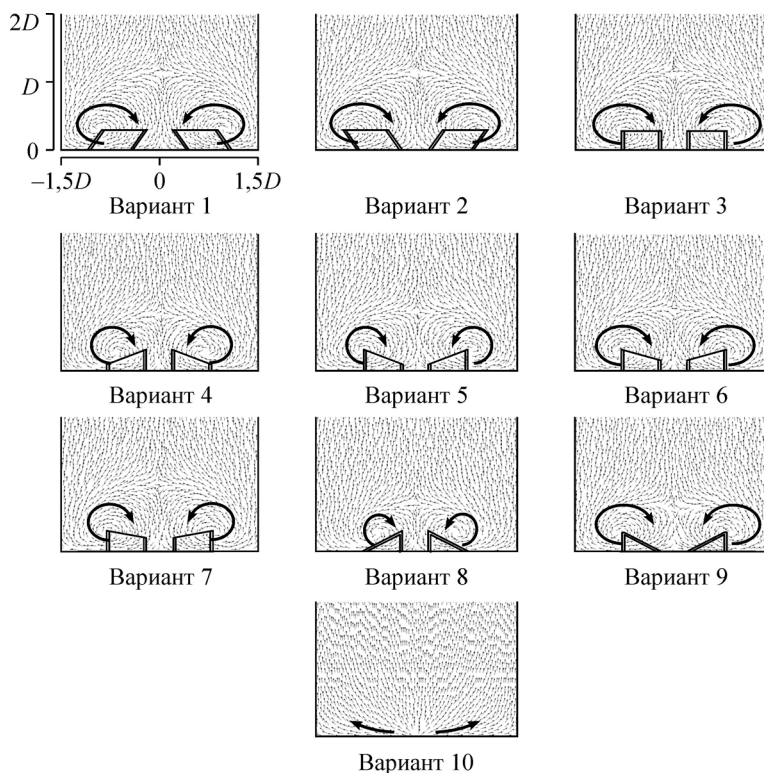


Рис. 3. Эволюция продольной завихренности вверх по течению от отверстий.

Определение коэффициента эффективности пленочного охлаждения φ можно записать как

$$\varphi = \frac{\eta / \eta_{\text{plate}}}{(C_{p,t} / C_{p,t,\text{plate}})^{1/3}}, \quad (4)$$

где η_{plate} и $C_{p,t,\text{plate}}$ — эффективность адиабатического охлаждения и коэффициент полных потерь давления пленочного охлаждения на плоской пластине соответственно.

Основной поток закручивается в направлении к оси вычислительной области, и этот искривленный поток вращается противоположно паре вихрей со встречным вращением, распространяясь также в стороны в случае наличия вихрегенератора (варианты 1–9). Кроме того, отошедший от стенки основной поток прижимает охлаждающую жидкость к защищаемой поверхности, уменьшая подъем струи вторичного потока. На рис. 3 показаны соответствующие векторные иллюстрации в плоскости $y-z$ при $x/D = -2,5$. Вихрь, сгенерированный ВГ, и завихрение ПБВВ вращаются в противоположные стороны, что неблагоприятно влияет на интенсивность пары вихрей со встречным вращением и улучшает эффективность пленочного охлаждения. На рис. 4 показана завихренность по нормали к поверхности в плоскости $x-y$, вызванная наличием ВГ. Интенсивность этого вихря в варианте 3 выше, чем в других случаях, из-за более высокого препятствия, особенно в центральной области. Большая, чем в других случаях, часть основного потока вынуждена вращаться в противоположном направлении по отношению к завихрению ПБВВ.

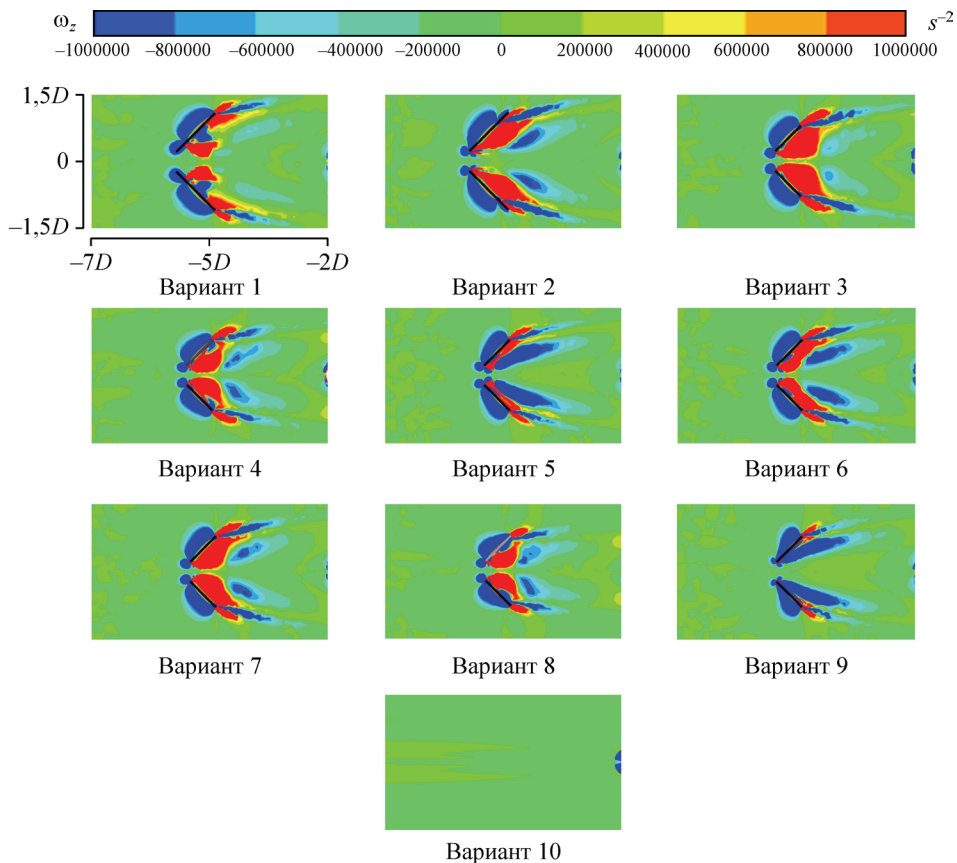


Рис. 4. Изолинии эволюции завихренности (ω_z) по нормали к стенке.

Поперечная однородность слоя охлаждающей жидкости существенно увеличивается в результате ослабления неблагоприятного эффекта пары вихрей со встречным вращением. Таким образом, подъем струи вторичного потока уменьшается, приводя к большей поперечной однородности теплового пограничного слоя, что обеспечивает максимальную защиту поверхности от горячих газов. Завихренность, созданная вихрегенератором, противоположна задаваемой ПВВВ, уменьшая воздействие последних, и, таким образом, тепловой слой отклоняется в поперечном направлении. Распространение потока охлаждающей жидкости в продольном и поперечном направлениях становятся существенно лучше, что приводит к более равномерной эффективности пленочного охлаждения. Усредненная эффективность адиабатического охлаждения для вариантов 1–10 при различных M показана на рис. 5. Видно, что наиболее равномерное распределение потока охладителя в поперечном направлении получено для случая установки ВГ выше по течению. Самая высокая усредненная эффективность адиабатического охлаждения наблюдается в варианте 3, так как в этом случае наиболее искривленный поток вращается в противоположном направлении от пары вихрей со встречным вращением, уменьшая подъем охлаждающей жидкости. Таким образом, интенсивность этого вихря выше, чем такого же вихря в других случаях, что приводит к более существенному уменьшению влияния ПВВВ.

Результаты, представленные на рис. 6, показывают, что повышение полных потерь давления вызвано наличием препятствия и завихренностью, сгенерированной вихрегенератором. Самый высокий коэффициент полных потерь давления наблюдается в случае ВГ, имеющего форму параллелограмма. В нижнем углу параллелограмма ВГ наблюдаются несколько пар завихренностей (см. рис. 3). Завихренность увеличивает полную потерю давления, несмотря на ее незначительное влияние на тепловую эффективность пленочного охлаждения. На рис. 6 также показано, что полные потери давления для варианта 3 выше, чем в случаях 4–10. Из-за меньшего препятствия основному потоку в вариантах с трапецидальным ВГ получены относительно более низкие полные потери давления, чем в случае 3.

Изменение отношения коэффициента эффективности адиабатического охлаждения в зависимости от M показано на рис. 7. Видно, что эффективность пленочного охлаждения значительно улучшается при наличии вихрегенератора, установленного вверх по потоку. Кроме того, максимальное улучшение эффективности пленочного охлаждения, наблюдаемое для варианта 3, получено благодаря наибольшему подавлению неблагоприятного воздействия пар вихрей со встречным вращением. Случаи пленочного охлаждения с ВГ в форме параллелограмма (варианты 1 и 2) также эффективны, но при этом наблюдаются высокие потери полного давления. Рисунок 7 также иллюстрирует, что ВГ, расположенный выше по потоку, лучше всего увеличивает эффективность пленочного охлаждения при величине параметра вдува $M = 1,0$.

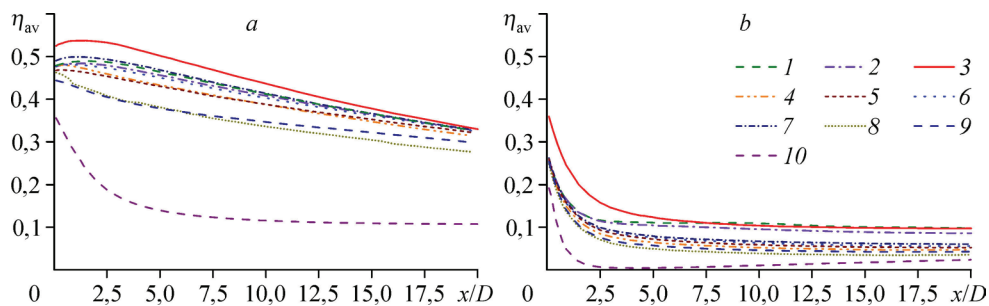


Рис. 5. Распределения усредненной эффективности адиабатического охлаждения при $M = 0,5$ (a) и $1,5$ (b).

Варианты: 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5), 6 (6), 7 (7), 8 (8), 9 (9), 10 (10).

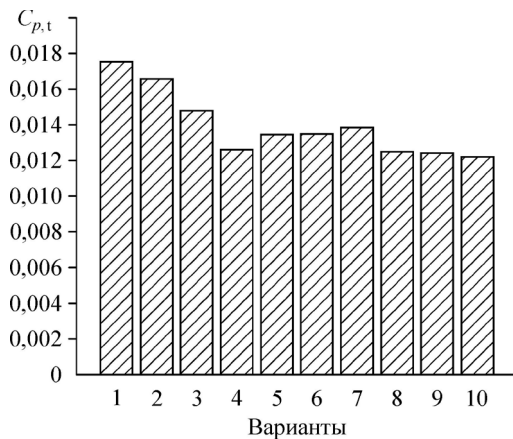


Рис. 6. Коэффициент полных потерь давления для вариантов 1–10.

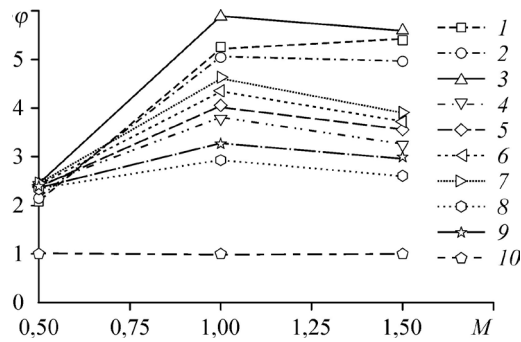


Рис. 7. Изменение коэффициента эффективности адиабатического охлаждения φ в зависимости от параметра вдува M .

Рассмотренная выше конфигурация важна для практических применений. Она позволяет разрешить некоторые ситуации в газотурбинных двигателях, связанные с пространственным ограничением на использование профилированных отверстий и торцевого пленочного охлаждения. Также эта конфигурация дает хорошую возможность обновлять старые устройства охлаждения газовой турбины за счет улучшения производительности пленочного охлаждения, достигаемого путем расположения вихрегенератора перед отверстиями для подачи охладителя.

Список литературы

1. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Панченко Н.А., Коваленко А.С. Пленочное охлаждение плоской поверхности системой парных отверстий: влияние турбулентности и ускорения потока // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 5. С. 571–578.
2. Пахомов М.А., Терехов В.И., Халатов А.А., Борисов И.И. Тепловая эффективность пристенной газовой завесы при ее вдуве через круглые отверстия в траншее // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 343–352.
3. Гуляйлиа А., Хорси А., Хамиду М.К. Моделирование эффективности пленочного охлаждения передней кромки лопатки через профилированные сужающиеся отверстия // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 33–44.
4. Zaman K., Rigby D.I., Heidmann J.D. Inclined jet in crossflow interacting with a vortex generator // J. Propulsion Power. 2010. Vol. 26, No. 5. P. 947–954.
5. Shinn A.F., Vanka S.P. Large eddy simulations of film-cooling flows with a micro-ramp vortex generator // J. Turbomachinery. 2013. Vol. 135, No. 1. P. 011004-1–011004-13.
6. Na S., Shih T.I.P. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp // J. Heat Transfer. 2007. Vol. 129, No. 4. P. 464–471.
7. Zheng D., Wang X., Zhang F., Zhou J., Yuan Q. The effect of upstream ramps with different shapes on film cooling efficiency // ASME. Paper GT2017-63741, p. V05AT12A010. 11 p.
8. Zheng D., Wang X., Zhang F., Yuan Q. Numerical investigation on the effects of the divided steps on film cooling performance // J. Applied Thermal Engng. 2017. Vol. 124. P. 652–662.
9. Zhang F., Wang X., Li J. The effects of upstream steps with unevenly spanwise distributed height on rectangular hole film cooling performance // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. Vol. 102. P. 1209–1221.
10. Wilfert G., Fottner L. The aerodynamic mixing effect of discrete cooling jets with mainstream flow on a highly loaded turbine blade // J. Turbomachinery. 1996. Vol. 118, No. 3. P. 468–478.
11. Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows // Proc. Summer Program of the Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford University. 1988. P. 193–207.

Статья поступила в редакцию 7 мая 2018 г.,
после доработки — 26 июля 2018 г.,
принята к публикации 1 августа 2018 г.