

УДК 536.24

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

А. Гулайлиа<sup>\*,\*\*</sup>, А. Хорси<sup>\*\*</sup>, С. А. Слимэйн<sup>\*,\*\*</sup>,  
М. М. Бенчериф<sup>\*\*,\*\*\*</sup>, К. Гурссма<sup>\*\*</sup>

\* Центр разработки спутников, Оран, Алжир

\*\* Университет наук и технологий им. Мохамеда Будиафа, 31001 Оран, Алжир

\*\*\* Оранская национальная политехническая школа Мориса Аудина, 31000 Оран, Алжир  
E-mails: guelailia@yahoo.fr, azzeddine.khorsia@yahoo.fr, sslimane@cds.asal.dz,  
Mohamed.benchrif@yahoo.fr, k.gourssma@yahoo.com

С использованием программного обеспечения ANSYS CFX исследовано влияние геометрических и физических параметров (коэффициента вдува, положения и высоты твердых отложений) за выходным отверстием инжектора на эффективность пленочного охлаждения. Исследовано несколько вариантов расположения отложения различной высоты относительно выходного отверстия инжектора. Для описания турбулентности использовалась модель сдвиговых напряжений (SST-модель). Определена эффективность охлаждения пленки при различных значениях коэффициента вдува. Проведено сравнение результатов численных расчетов и экспериментальных данных и показано, что они хорошо согласуются.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, тепломассообмен, турбулентность, тепловая защита, сопло ракеты, пленочное охлаждение, отложение.

DOI: 10.15372/PMTF20200108

**Введение.** Эффективность работы практически всех тепловых двигателей (камеры сгорания, ракетные двигатели, газовые турбины) существенно зависит от максимальной температуры термодинамического цикла. Для достижения максимальной эффективности работы таких двигателей необходимо, чтобы они работали при максимально допустимой температуре. При увеличении температуры поверхности, контактирующие с горячим потоком, подвергаются значительным тепловым нагрузкам, что может привести к их повреждению. Поэтому необходимо защитить поверхность материала путем вдува холодной жидкости в виде пленочного потока, препятствующего воздействию температур, превышающих максимально допустимую для данного материала. Такая система охлаждения, называемая пленочным охлаждением, представляет собой одну из наиболее эффективных технологий охлаждения. При использовании этой технологии вторичная жидкость вдувается через отверстия на поверхности, которую нужно охладить. Впрыскиваемая охлаждающая жидкость формирует на поверхности тонкий слой термоизоляции, который препятствует ее перегреву.

Эффективность пленочного охлаждения зависит от различных физических параметров (температуры, плотности [1], интенсивности турбулентности, давления [2], коэффициента вдува [3]), а также от геометрических параметров (геометрии и расположения отверстий, через которые осуществляется вдув охлаждающей жидкости). В работе [4] проведено экспериментальное исследование пленочного охлаждения на передней кромке лопатки турбины для входных отверстий двух типов: цилиндрических и сходящихся щелевых.

В [5] численно исследовано влияние препятствия серповидной формы, установленного ниже по потоку относительно вдуваемой струи, на эффективность пленочного охлаждения и на поле течения над плоской пластиной. Зависимость характеристик пленочного охлаждения от формы отложения за выходным отверстием инжектора изучена в [6]. В работе [7] исследовано влияние массового расхода на эффективность пленочного охлаждения и теплообмена на лопатке ротора газовой турбины. Для повышения эффективности пленочного охлаждения цилиндрические отверстия заменялись на сходящиеся щелевые отверстия (консоли). Установлено, что сходящиеся щелевые отверстия обеспечивают лучшую защиту за счет пленочного охлаждения по сравнению с цилиндрическими отверстиями. Эффективность пленочного охлаждения рядов консольных отверстий на лопатке сопла определена в работе [8]. Влияние шероховатости поверхности плоской пластины на эффективность адиабатического охлаждения изучено в [9]. В работах [10, 11] показано, что в случае шероховатой поверхности эффективность пленочного охлаждения уменьшается. В [12–15] приведены подробные экспериментальные данные об эффективности пленочного охлаждения и коэффициенте теплопередачи при использовании одиночных отверстий и рядов отверстий в плоской пластине. В работе [16] исследована применимость метода пленочного охлаждения для тепловой защиты сопла ракеты, а также изучено влияние кривизны поверхности на эффективность пленочного охлаждения.

Другим важным фактором, который необходимо учитывать при исследовании эффективности пленочного охлаждения, является отложение различных загрязняющих веществ и твердых частиц (песка, золы, пыли) на поверхностях лопасти и сопла. При наличии таких отложений эффективность охлаждения поверхности уменьшается, что может привести к закупориванию выходного отверстия инжектора, предназначенного для вдува охлаждающей жидкости. Поэтому необходимо учитывать влияние деформации поверхности на эффективность пленочного охлаждения. В работе [17] изучено влияние различных изменений поверхности (наличия отложений, засорения инжекционных отверстий, скалывания кромок отверстия) на эффективность пленочного охлаждения. В [18] численно проанализировано влияние дисперсии частиц на эффективность пленочного охлаждения при наличии отложения.

В данной работе проводится численное моделирование процесса пленочного охлаждения на плоской пластине. Целью работы является изучение влияния отложений на эффективность охлаждения и структуру основного потока при различных значениях коэффициента вдува. Исследуется влияние положения и высоты отложения на эффективность охлаждения пластины. При численном моделировании используется модель сдвиговых напряжений (SST-модель). Проведено сравнение расчетных значений с экспериментальными данными [19].

**Численный метод.** Моделирование проводится с использованием программного обеспечения ANSYS CFX. С помощью метода конечных объемов получено решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса. Вычисления продолжаются до тех пор, пока не будет достигнут критерий сходимости ( $10^{-5}$ ). В данной работе турбулентность моделируется с помощью модели сдвиговых напряжений (SST-модели) [20], объединяющей ( $k-\varepsilon$ )-модель и ( $k-\omega$ )-модель турбулентности.

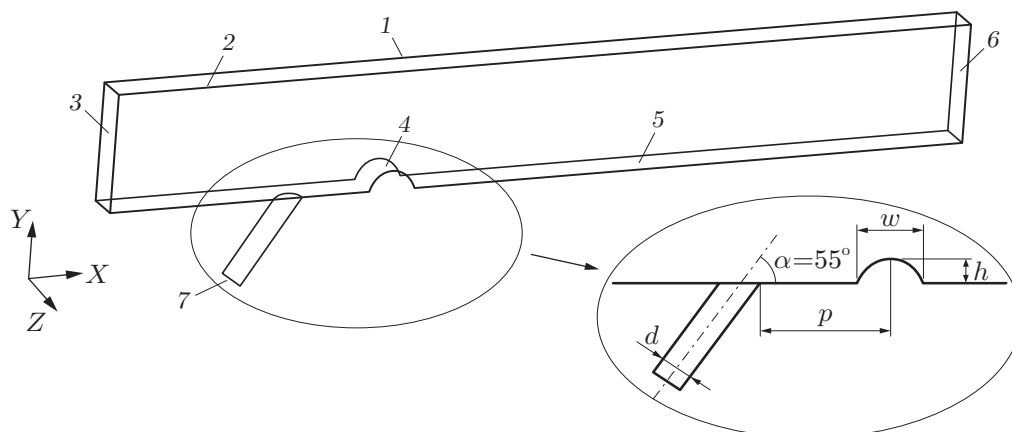


Рис. 1. Геометрия задачи:

1 — плоскость симметрии 1, 2 — плоскость симметрии 2, 3 — входное сечение горячего потока, 4 — отложение, 5 — охлаждаемая поверхность, 6 — выходное сечение, 7 — входное сечение холодного потока

**Геометрия исследуемой области.** Рассматривается плоская пластина, геометрические параметры которой взяты из работы [19]. Геометрия расчетной области при наличии отложений показана на рис. 1. Отверстие инжектора наклонено к пластине под углом  $55^\circ$ . В данной работе используется безразмерная координата  $x/d$ , отсчитываемая от кромки отверстия. Входное сечение расположено на расстоянии  $x/d = 8$  вверх по потоку от центра входного отверстия, а выходное сечение находится на расстоянии  $x/d = 30$  вниз по потоку. Вертикальный размер расчетной области равен  $y/d = 5$ , длина канала —  $6d$ , диаметр отверстия  $d = 12,7$  мм. Во всех рассматриваемых случаях ширина отложения составляет  $w = 2d$ . Начало системы координат расположено в центре выходного отверстия инжектора. Скорость набегающего потока равна  $U_\infty = 12$  м/с, температура потока  $T_\infty = 331,15$  К, температура струи  $T_c = 298,15$  К, интенсивность турбулентности  $Tu = 10$  %, относительная плотность  $\bar{\rho} = 1$ .

Исследовано семь вариантов расположения отложения различной высоты: 1) отсутствие отложения; 2)  $h = 0,5d$ ,  $p = d$ ; 3)  $h = 0,8d$ ,  $p = d$ ; 4)  $h = 1,1d$ ,  $p = d$ ; 5)  $h = 0,8d$ ,  $p = 4d$ ; 6)  $h = 0,8d$ ,  $p = 7d$ ; 7)  $h = 0,8d$ ,  $p = 10d$ .

**Построение расчетной сетки.** Для построения расчетных сеток использовался коммерческий генератор сеток ICEM CFD. Расчетная область дискретизировалась с использованием структурированной многоблочной сетки. Были созданы три структурированные сетки, содержащие 438 864, 780 521 и 1 031 292 шестигранных элемента (грубая, средняя и мелкая сетки соответственно). В результате численных экспериментов на различных сетках была выбрана среднеструктурированная сетка с 780 521 элементом. Сетка сгущалась вблизи стенок, отверстия инжектора и в окрестности отложения (рис. 2). Значения  $y^+$  в пристенных узлах изменялись в соответствии с моделью турбулентности SST ( $y^+ < 2$ ).

**Граничные условия.** Граничные условия задаются на всех границах области. На плоскостях симметрии 1 и 2 (см. рис. 1) ставятся условия симметрии. Пластина и поверхности с отверстиями полагаются адиабатическими при условии отсутствия скольжения. Профиль скорости в сечении на входе в расчетную область определяется по закону  $U_{in} = U_\infty (y/\delta^*)^{1/7}$ , где  $\delta^*$  — толщина пограничного слоя, равная диаметру отверстия. В выходном сечении отверстия задается давление.

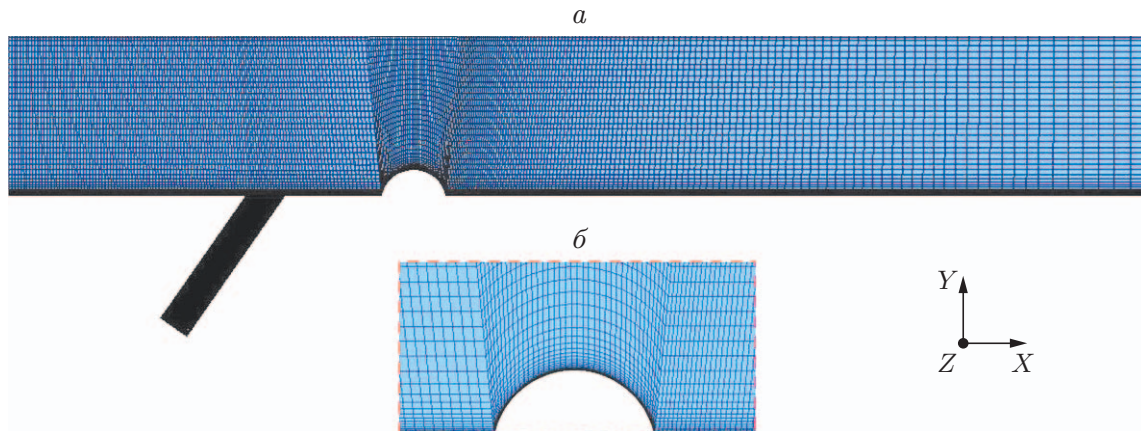


Рис. 2. Расчетная сетка:  
*a* — общий вид, *b* — сетка в окрестности отложения

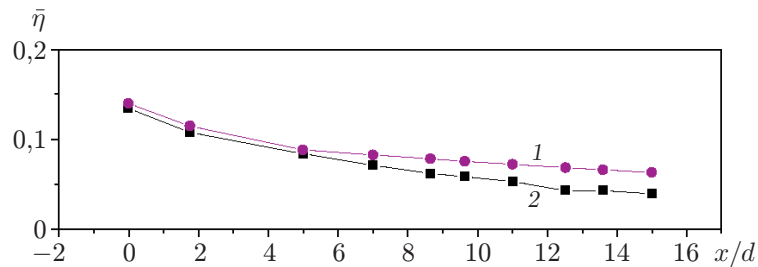


Рис. 3. Зависимость осредненной в поперечном направлении эффективности адиабатического пленочного охлаждения от координаты  $x/d$  при  $y/d = 0$ ,  $\alpha = 55^\circ$ ,  $M = 1$ :  
 1 — результаты расчетов, полученные в настоящей работе, 2 — экспериментальные данные [19]

**Результаты исследования и их обсуждение.** В данной работе для различных значений коэффициента вдува получены значения эффективности адиабатического пленочного охлаждения

$$\eta = (T_\infty - T)/(T_\infty - T_c)$$

и осредненной по поперечной координате  $z$  эффективности адиабатического пленочного охлаждения

$$\bar{\eta} = \frac{1}{L} \int_L \eta dz$$

( $L$  — размер расчетной области в поперечном направлении).

Значения осредненной эффективности адиабатического пленочного охлаждения, полученные в результате численного моделирования, сравнивались с экспериментальными данными [19] (рис. 3). Видно, что результаты численных расчетов, полученные в данной работе, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На рис. 4 показано влияние высоты отложения на эффективность адиабатического пленочного охлаждения при  $x/d = 3$  и различных значениях коэффициента вдува ( $M = 0,5; 1,0; 1,5$ ). Положение отложения не менялось ( $p = d$ ). Во всех рассмотренных случаях максимальные значения эффективности пленочного охлаждения достигаются при  $z/d = 0$  и

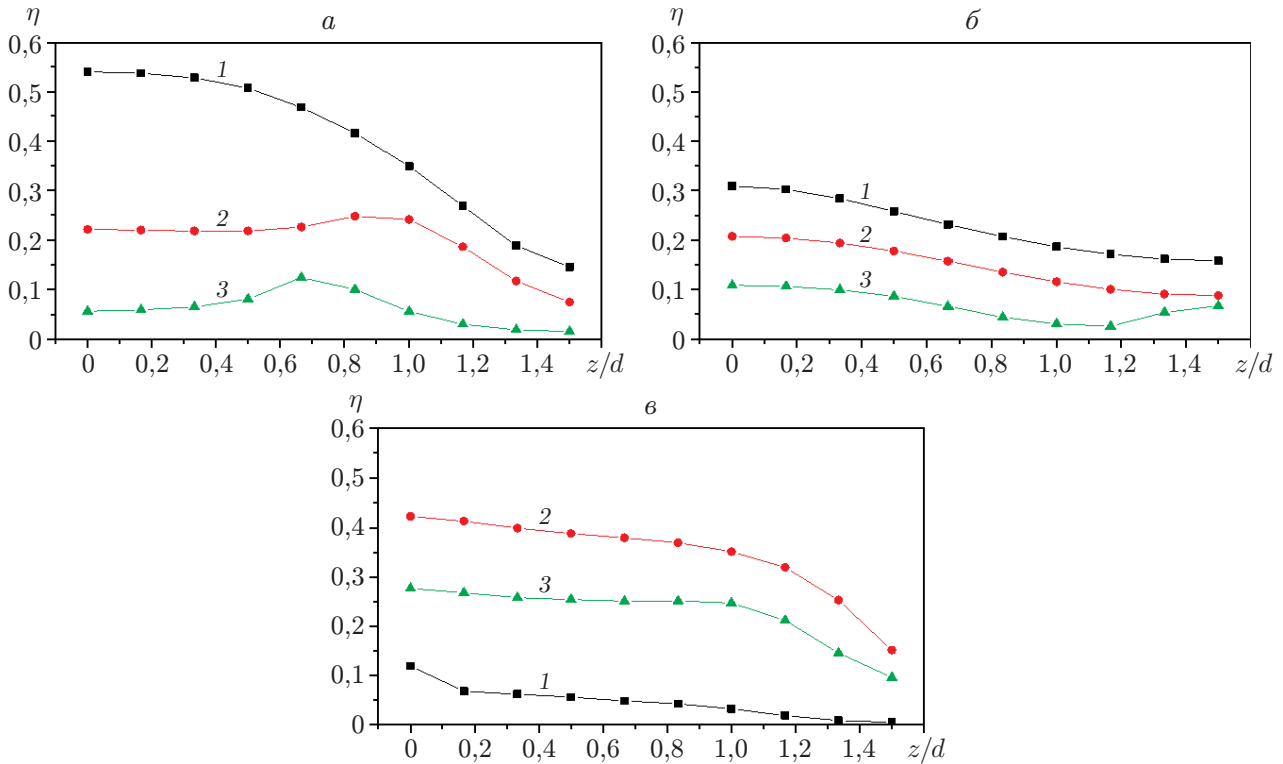


Рис. 4. Распределение эффективности адиабатического пленочного охлаждения по поперечной координате  $z$  при  $y/d = 0$  и различных значениях высоты отложения и коэффициента ддува:

$a$  —  $h = 0,5d$ ,  $б$  —  $h = 0,8d$ ,  $в$  —  $h = 1,1d$ ; 1 —  $M = 0,5$ , 2 —  $M = 1$ , 3 —  $M = 1,5$

уменьшаются в поперечном направлении  $z$ . При высоте отложения  $h = 0,5d$ ;  $0,8d$  максимальное значение эффективности пленочного охлаждения получено при наименьшем значении коэффициента ддува  $M = 0,5$ , в отличие от случая  $h = 1,1d$ , в котором максимальное значение эффективности достигается при  $M = 1$ .

На рис. 5 представлена зависимость эффективности пленочного охлаждения от высоты отложения при  $M = 0,5$ ,  $p = d$ , полученная в результате численного моделирования. Увеличение эффективности пленочного охлаждения наблюдается при малых и средних значениях высоты отложения ( $h = 0,5d$ ;  $0,8d$ ), что обусловлено равномерным распределением охлаждающей жидкости в поперечном направлении. Однако при большой высоте отложения ( $h = 1,1d$ ) распределение охлаждающей жидкости на пластине является неравномерным, что приводит к уменьшению эффективности пленочного охлаждения. Это можно объяснить существенным отклонением струи вследствие большой высоты отложения, которое действует как вертикальный дефлектор и таким образом способствует прониканию холодной жидкости в горячий основной поток.

Распределение температуры на центральной пластине при  $M = 0,5$ ,  $h = 0,8d$  и различных расстояниях между отложением и выходным отверстием инжектора приведено на рис. 6. При небольшом расстоянии между отложением и выходным отверстием инжектора распределение температуры струи является неравномерным. Наличие отложения способствует смещению холодного и горячего потоков, образованию за отложением зоны рециркуляции вверх по потоку и зоны застоя вниз по потоку. При размещении отложения вдали от выходного отверстия инжектора охлаждающая струя постепенно принимает исходную форму.

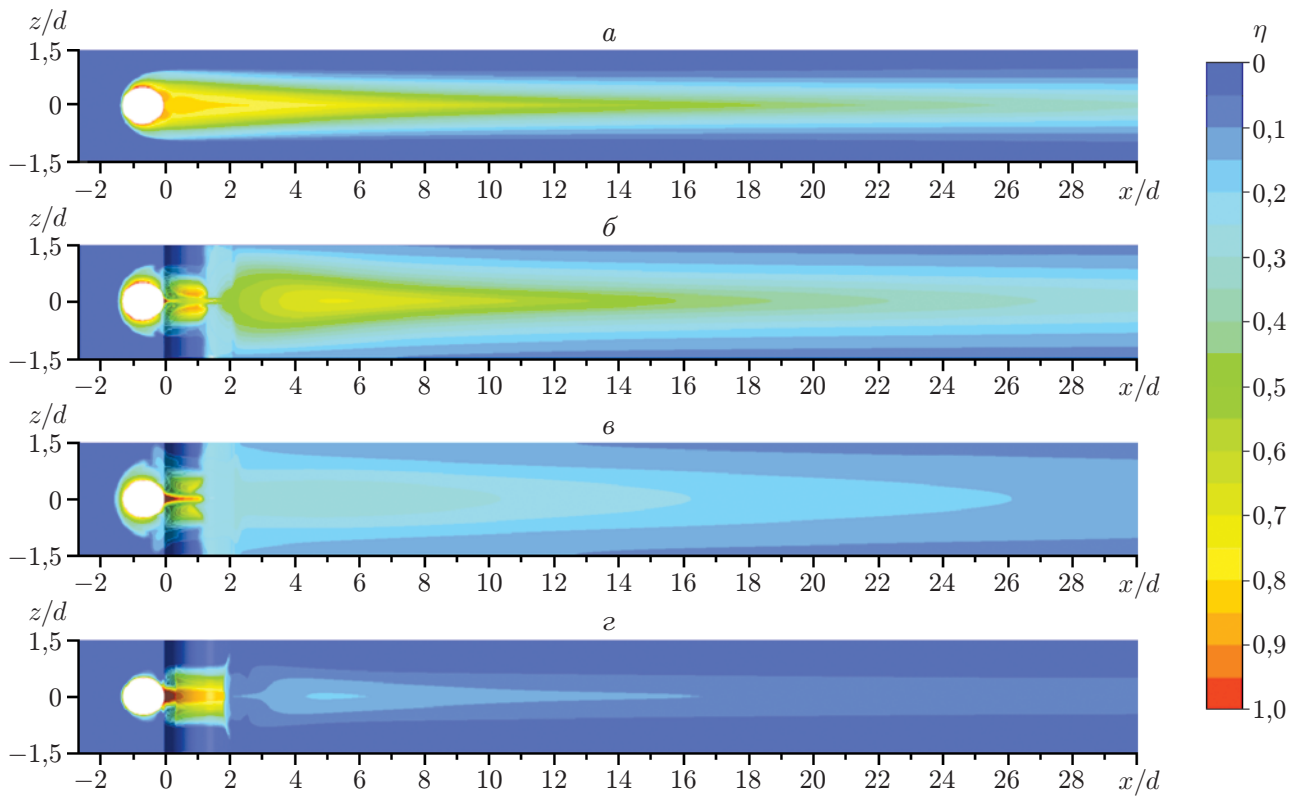


Рис. 5. Распределение эффективности пленочного охлаждения вдоль поверхности при  $M = 0,5$ ,  $p = d$  и различных значениях высоты отложения:

$a$  —  $h = 0$ ,  $б$  —  $h = 0,5d$ ,  $в$  —  $h = 0,8d$ ,  $г$  —  $h = 1,1d$

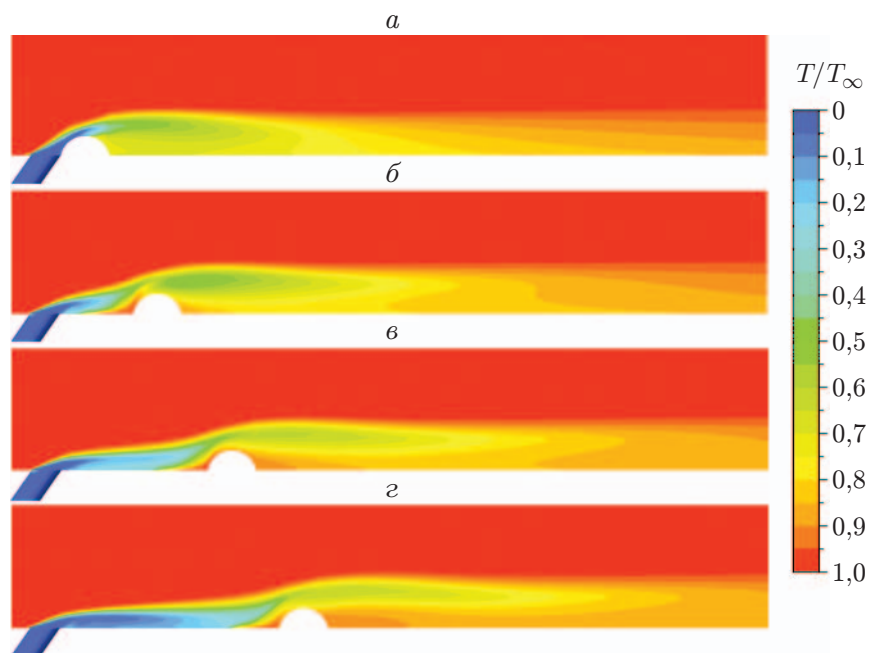


Рис. 6. Распределение температуры при  $M = 0,5$ ,  $h = 0,8d$  и различных расстояниях между отложением и выходным отверстием инжектора:

$a$  —  $p = d$ ,  $б$  —  $p = 4d$ ,  $в$  —  $p = 7d$ ,  $г$  —  $p = 10d$

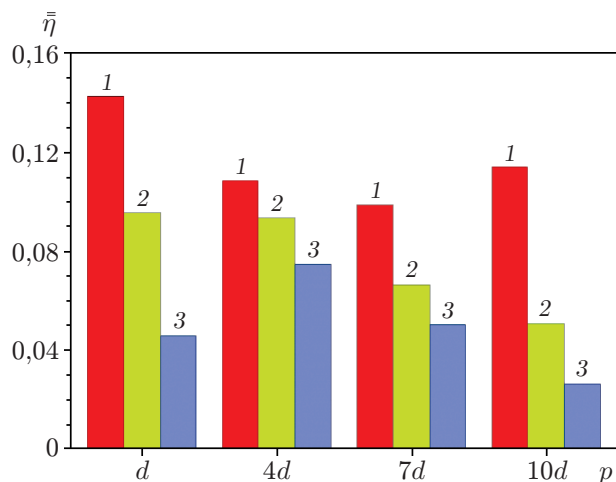


Рис. 7. Средняя по площади охлаждаемой поверхности эффективность охлаждения при  $h = 0,8d$  и различных значениях коэффициента вдува: 1 —  $M = 0,5$ , 2 —  $M = 1$ , 3 —  $M = 1,5$

Осредненная по площади охлаждаемой поверхности эффективность пленочного охлаждения при  $h = 0,8d$  и различных расстояниях между отложением и выходным отверстием инжектора и значениях коэффициента вдува показана на рис. 7. Видно, что при  $M = 0,5$  эффективность охлаждения при  $p = 4d, 7d$  меньше, чем при  $p = d, 10d$ . При  $M = 1$  средняя по площади эффективность пленочного охлаждения уменьшается с увеличением расстояния между отложением и выходным отверстием инжектора. Среди всех рассмотренных вариантов расположения отложения наименьшие значения средней по площади эффективности пленочного охлаждения получены при коэффициенте вдува  $M = 1,5$ .

**Заключение.** В работе проведено численное исследование влияния твердых отложений, расположенных вниз по потоку за выходным отверстием инжектора, на эффективность пленочного охлаждения. Рассмотрено четыре варианта расположения отложения ( $p = d, 4d, 7d, 10d$ ) различной высоты ( $h = 0,5d; 0,8d; 1,1d$ ). Для моделирования трехмерного поля потока и эффективности пленочного охлаждения с помощью пакета программ ANSYS CFX использована турбулентная модель сдвиговых напряжений (SST-модель). Результаты расчетов хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными. Представлены распределения эффективности пленочного охлаждения при различных значениях коэффициента вдува ( $M = 0,5; 1,0; 1,5$ ). На основе полученных результатов можно сделать вывод, что твердое отложение, расположенное ниже по потоку от выходного отверстия инжектора, оказывает существенное влияние на эффективность пленочного охлаждения. В случае если отложение находится вблизи выходного отверстия инжектора ( $p = d$ ), при  $M = 0,5$  эффективность пленочного охлаждения при малых и средних значениях высоты отложения ( $h = 0,5d; 0,8d$ ) увеличивается, что обусловлено равномерным распределением охлаждающей жидкости в поперечном направлении. Однако при большой высоте отложения ( $h = 1,1d$ ) распределение охлаждающей жидкости на пластине является неравномерным, что приводит к уменьшению эффективности пленочного охлаждения. Также установлено, что при  $h = 0,8d$  наличие отложения, расположенного на небольшом расстоянии от выходного отверстия инжектора, способствует смешению холодного и горячего потоков вследствие образования зоны рециркуляции перед отложением и зоны застоя вниз по потоку. Это может привести к уменьшению эффективности пленочного охлаждения. Кроме того, при  $M = 0,5$  средняя по площади эффективность охлаждения при  $p = 4d, 7d$  меньше, чем при  $p = d, 10d$ . При  $M = 1$  средняя по площади эффективность охлажде-

ния уменьшается с увеличением расстояния между отложением и выходным отверстием инжектора. Среди всех рассмотренных вариантов расположения отложения наименьшие значения средней по площади эффективности пленочного охлаждения получены при большом значении коэффициента вдува.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ammari H. D., Hay N., Lampard D.** The effect of density ratio on the heat transfer coefficient from a film cooled flat plate // *ASME J. Turbomachinery*. 1990. V. 112. P. 444–450. DOI: 10.1115/1.2927679.
2. **Sinha A. K., Bogard D. G., Crawford M. E.** Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio // *ASME J. Turbomachinery*. 1991. V. 113. P. 442–449. DOI: 10.1115/1.2927894.
3. **Drost U., Böls A.** Investigation of detailed film cooling effectiveness and heat transfer distributions on a gas turbine airfoil // *ASME J. Turbomachinery*. 1999. V. 121. P. 233–242. DOI: 10.1115/1.2841306.
4. **Liu C. L., Zhu H. R., Zhang Z. W., Xu D. C.** Experimental investigation on the leading edge film cooling of cylindrical and laid-back holes with different hole pitches // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2012. V. 55. P. 6832–6845. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.090.
5. **Khorsi A., Guelailia A., Hamidou M. K.** Improvement of film cooling effectiveness with a small downstream block body // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2016. V. 57, N 4. P. 666–671.
6. **Tian K., Wang J., Zhanxiu C., Guelailia A.** Effect of hole blockage configurations on film cooling in gas turbine components // *Chem. Engng Trans.* 2017. V. 61. P. 229–234. DOI: 10.3303/CET1761036.
7. **Guelailia A., Khorsi A., Hamidou M. K.** Computation of leading edge film cooling from a console geometry (converging slot hole) // *Thermophys. Aeromech.* 2016. V. 23, N 1. P. 33–42. DOI: 10.1134/S0869864316010042.
8. **Sargison J. E., Guo S. M., Oldfield M. L. G., et al.** A converging slot-hole film-cooling geometry. Pt 2. Transonic nozzle guide vane heat transfer and loss // *ASME J. Turbomachinery*. 2002. V. 124. P. 461–471.
9. **Goldstein R. J., Eckert E. R. G., Chiang H. D., Elovic E.** Effect of surface roughness on film cooling performance // *ASME J. Engng Gas Turbines Power*. 1985. V. 107. P. 111–116. DOI: 10.1115/1.3239669.
10. **Schmidt D. L., Bogard D. G.** Effects of free-stream turbulence and surface roughness on film cooling. S. l., 1996. (Paper / ASME; N 96-GT-462).
11. **Schmidt D. L., Sen B., Bogard D. G.** Effects of surface roughness on film cooling. S. l., 1996. (Paper / ASME; N 96-GT-299). DOI: 10.1115/96-GT-299.
12. **Yuen C. H. N., Martinez-Botas R. F.** Film cooling characteristics of a single round hole at various streamwise angles in a crossflow. Pt 1. Effectiveness // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2003. V. 46. P. 221–235.
13. **Yuen C. H. N., Martinez-Botas R. F.** Film cooling characteristics of a single round hole at various streamwise angles in a crossflow. Pt 2. Heat transfer coefficients // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2003. V. 46. P. 237–249.
14. **Yuen C. H. N., Martinez-Botas R. F.** Film cooling characteristics of rows of round holes at various streamwise angles in a crossflow. Pt 1. Effectiveness // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2005. V. 48. P. 4995–5016.



15. **Yuen C. H. N., Martinez-Botas R. F.** Film cooling characteristics of rows of round holes at various streamwise angles in a crossflow. Pt 2. Heat transfer coefficients // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2005. V. 48. P. 5017–5035.
16. **Guelailia A., Khorsi A., Boudjemai A. M.** Thermal protection of rocket nozzle by using film cooling technology — effect of lateral curvature // Intern. J. Heat Technol. 2018. V. 36. P. 1070–1074.
17. **Sundaram N., Thole K. A.** Effects of surface deposition, hole blockage, and thermal barrier coating spallation on vane endwall film cooling // J. Turbomachinery. 2007. V. 129. P. 599–607.
18. **Wang J., Cui P., Vujanovic M., et al.** Effects of surface deposition and droplet injection on film cooling // Energy Convers. Management. 2016. V. 125. P. 51–58.
19. **Nasir H., Ekkad S. V., Acharya S.** Effect of compound angle injection on flat surface film cooling with large streamwise injection angle // Experiment. Thermal Fluid Sci. 2001. V. 25, N 1/2. P. 23–29.
20. **Menter F. R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32, N 8. P. 1598–1605.

*Поступила в редакцию 13/V 2019 г.,  
после доработки — 5/IX 2019 г.  
Принята к публикации 30/IX 2019 г.*

---