

**Н.С. ДУШИН,**

канд. техн. наук,

**Н.И. МИХЕЕВ,**

д-р техн. наук,

**О.А. ДУШИНА,**

канд. техн. наук,

**И.А. ДАВЛЕТШИН,**

д-р техн. наук,

**Д.И. ЗАРИПОВ,**

канд. физ.-мат. наук

(ФИЦ КазНЦ РАН, Казань)

ndushin@bk.ru

## Особенности теплообмена в пристеночной области за выступом в канале

*Выдвинута и экспериментально проверена гипотеза о связи теплоотдачи с гидродинамическими характеристиками течения в пристеночной области. Показано, что теплоотдача в отрывной области линейно связана со значениями продольных пульсаций скорости на внешней границе пристеночной области (высота  $y/h=0,12$ ).*

**Одиночный выступ, отрывное течение, интенсификация теплообмена, пограничный слой, метод SIV**

Одним из важнейших вопросов совершенствования газотурбинных двигателей и установок является увеличение их КПД и снижение металлоемкости. Решение данных задач особенно актуально для авиационных газотурбинных двигателей и часто связано с повышением температуры газа перед турбиной. Перспективными являются двигатели, в которых  $T_r^*$  близка к стехиометрическому уровню [1], поэтому исследования направлены на повышение эффективности систем охлаждения газотурбинных двигателей. Сейчас для тепловой защиты и охлаждения лопаток газовых турбин используется сочетание нескольких методов: нанесение жаропрочных покрытий, пленочное охлаждение, организация внутренних каналов охлаждения с интенсификаторами теплообмена. В качестве интенсификаторов теплообмена часто применяют выступы и выемки [1–4], но с точки зрения тепловой напряженности предпочтительным является использование выступов.

Историю развития интенсификации теплообмена с использованием каналов с выступами можно проследить по обзорам [5–8]. На протяжении многих лет основным подходом к повышению значений теплогидравлических характеристик таких каналов была оптимизация формы, размеров и пространственного положения выступов. Результаты этих исследований показывают, что при одинаковой мощности на прокачку теплоносителя, отнесенной к площади теплообменной поверхности, прирост теплоотдачи в канале с выступами увеличивается в 2,5 раза по сравнению с гладким каналом [9, 10].

Варьирование геометрических характеристик каналов в исследованиях обусловлено поиском наиболее эффективных конфигураций для разрушения или возмущения турбулентного пограничного слоя, что приводит к уменьшению толщины вязкого подслоя и снижению термического сопротивления пристеночных слоев теплоносителя. Однако связь между тепловыми и гидродинамическими характеристиками в отрывных течениях изучена мало [11]. Если следовать логике соответствия максимума теплоотдачи точке минимальной толщины вязкого подслоя, то это должна быть точка присоединения потока. Однако результаты экспериментов показывают, что координата положения максимума теплоотдачи часто смещена относительно точки присоединения потока [12–14]. Более того, данные различных авторов в отношении положения максимума теплоотдачи оказываются противоречивыми: в одних работах максимум теплоотдачи находится в точке присоединения, в других он смещен в рециркуляционную область или область релаксации. Этот разброс обосновывается различной длиной и формой отрывной области. Изменение характеристик отрывной области может происходить при изменении формы и относительной высоты выступов, а также толщины пограничного слоя и степени турбулентности натекающего на выступ потока. Связь теплоотдачи в отрывной области со степенью турбулентности натекающего на выступ потока исследовалась в работе [11]. Авторами было показано, что искусственное повышение степени турбулентности обеспечивает рост теплоотдачи в отрывной области примерно на 20 % со смещением максимума теплоотдачи вверх по потоку. Те же особенности характерны для связи степени турбулентности течения и максимума реверсивной скорости. При анализе полученных результатов авторы [11] пришли к выводу, что интерпретировать закон теплообмена в рециркуляционной области достаточно сложно, так как удовлетворительное обобщение удалось получить только в окрестности точки присоединения потока. Также была отмечена некорректность использования для обобщения полученных данных параметров внешнего течения. В связи с этим целью данной работы является анализ связи коэффициента теплоотдачи в отрывной области с гидродинамическими характеристиками течения в пристеночной зоне рециркуляционной области.

Исследовалось обтекание стационарным потоком одиночного выступа сечением  $19 \times 19 \text{ мм}^2$ , расположенного в центральной части гладкого канала (рис. 1).

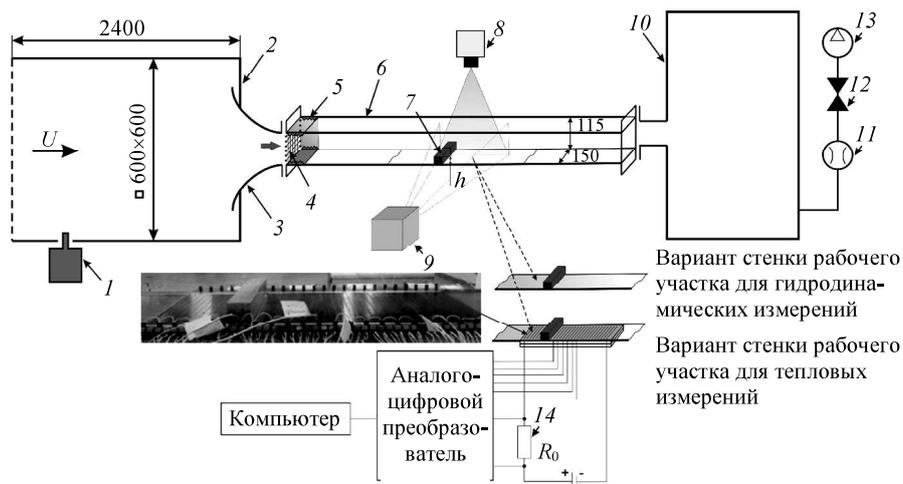


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор дыма; 2 – камера подготовки дыма; 3 – плавный вход; 4 – турбулизирующая сетка; 5 – наждачная бумага; 6 – рабочий участок; 7 – выступ; 8 – непрерывный лазер; 9 – скоростная видеокамера; 10 – ресивер; 11 – критические сопла; 12 – запорная арматура; 13 – воздуходувка; 14 – прецизионный резистор

В работе использовался канал высотой 115 мм, шириной 150 мм и длиной 1,2 м. На входе в канал устанавливался двумерный плавный вход со степенью поджатия 1:6 и турбулизирующая сетка. Для турбулизации пограничного слоя в начале измерительного участка приклеивалась наждачная бумага. Движение рабочей среды (воздуха) в канале создавалось воздуходувкой, работающей на всасывание, а постоянство заданного значения расхода поддерживалось набором критических сопел.

Мгновенные поля скорости измерялись методом SIV [15] при числе Рейнольдса  $Re = 5600$ , рассчитанном по высоте выступа  $h$  и скорости на оси канала. Задымление потока осуществлялось генератором дыма с жидкостью средней плотности «MT-Gravity». Съёмка течения выполнялась с использованием скоростной видеокамеры и непрерывного лазера с диодной накачкой. Съёмки выполнены в окнах шириной  $0,36h$ , высотой  $2,9h$  при частоте 10752 кадр/с. Пространственное разрешение составляло 10,53 пикс/мм, количество пар кадров в каждой съёмке – 41500.

Отношение высоты выступа к высоте канала – 0,165, степень удлинения выступа – 7,9. Это позволило реализовать в плоскости симметрии канала практически двумерное течение [16, 17] и измерить коэффициенты теплоотдачи с большим по отношению к высоте выступа разрешением. Степень турбулентности натекающего на выступ потока составляла 2,9 %. Отношение толщины пограничного слоя к высоте выступа  $\delta/h = 0,5$ .

При тепловых измерениях оптически прозрачная стенка рабочего участка заменялась на специальную теплообменную стенку. Для измерения локальных значений коэффициента теплоотдачи использован метод, основанный на электрическом нагреве стенки и измерении ее температуры одним и тем же элементом, выполненным из тонкой металлической пленки с высоким температурным коэффициентом сопротивления [18]. Конструктивно стенка для тепловых измерений представляла собой двуслойную стеклотекстолитовую плату с тонкими зигзагообразными медными дорожками. С внешней стороны платы была предусмотрена двуслойная воздушная теплоизоляция. Разъемы для подключения измерительных и питающих линий выводились на боковые поверхности платы. Измерение средней температуры потока выполнялось термометром с абсолютной неопределенностью не более 0,1 К. Измерение падения напряжения на дорожках платы осуществлялось четырнадцатиразрядным аналого-цифровым преобразователем, работающим в режиме вольтметра.

Представим результаты измерения коэффициентов теплоотдачи (рис. 2) и осредненных по времени профилей гидродинамических характеристик течения в пристеночной зоне вдоль рециркуляционной области (рис. 3). Как видно из рис. 2, 3, в окрестности максимума теплоотдачи средние значения продольной компоненты скорости во всем диапазоне поперечной координаты  $y/h < 0,16$  близки к нулю, т.е. мак-

симум теплоотдачи располагается практически в точке присоединения потока. При движении пристеночного потока к выступу толщина пограничного слоя (показана пунктиром) растет, а коэффициент теплоотдачи снижается, что согласуется с общепринятыми представлениями. Однако значительное влияние на теплообмен в рециркуляционной области могут оказывать гидродинамические процессы на внешней границе пограничного слоя.

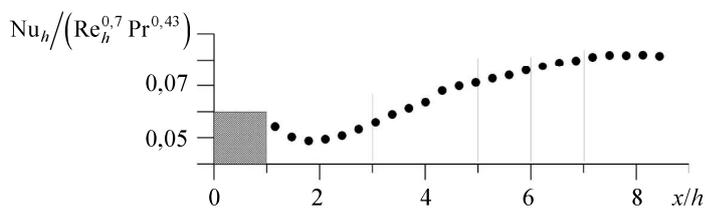


Рис. 2. Профили коэффициента теплоотдачи

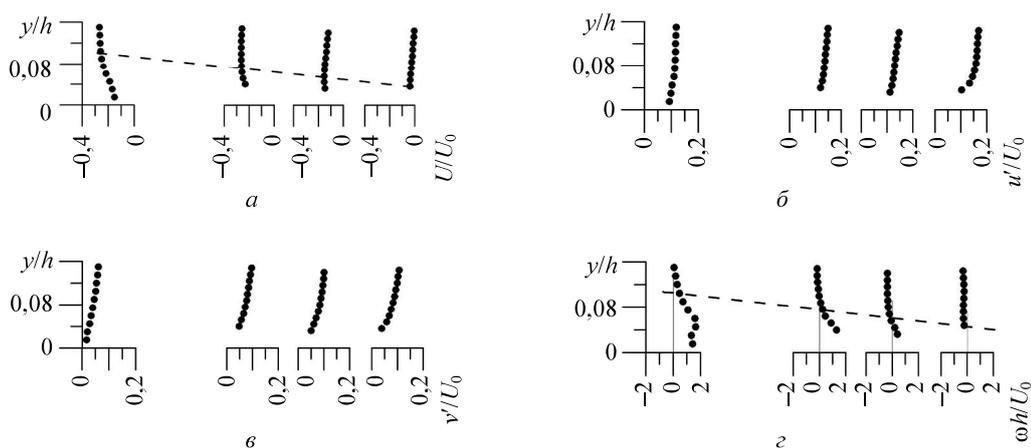


Рис. 3. Профили гидродинамических характеристик течения в пристеночной области за выступом: *a* – среднего значения продольной скорости; *б* – пульсаций продольной компоненты скорости; *в* – поперечной компоненты скорости; *г* – завихренности

Для проверки этой гипотезы оценим связь локальных коэффициентов теплоотдачи с локальными гидродинамическими характеристиками течения в пристеночной зоне рециркуляционной области. Будем рассматривать значения средней скорости течения, пульсаций продольной и поперечной компонент скорости течения и завихренности. Из рис. 3 видно, что в прилегающей к внешней границе пограничного слоя области эти характеристики в рассматриваемом сечении  $x/h$  практически не изменяются по координате  $y$ . Следовательно, значения характеристик можно выбрать для фиксированной координаты по высоте, лишь немного превышающей максимальную толщину пограничного слоя возвратного течения в отрывной области. Так как максимальная толщина пограничного слоя в диапазоне продольной координаты  $(3...7)h$  равна  $0,1h$ , то значения гидродинамических характеристик удобно определить на ближайшей к ней координате, в качестве которой была выбрана координата  $y/h = 0,12$ .

Как видно из рис. 2, 3, относительные среднеквадратичные пульсации  $u'/U_0$  и  $v'/U_0$  изменяются по длине отрывной области в первом приближении пропорционально коэффициенту  $c$  в критериальной зависимости  $Nu = cRe^{0.7}Pr^{0.43}$ . Коэффициент пропорциональности  $c/b$  представлен на рис. 4. Здесь через  $b$  обозначены гидродинамические характеристики  $U/U_0$ ,  $u'/U_0$ ,  $v'/U_0$ ,  $\omega h/U_0$ .

Как видим (см. рис. 4), наиболее постоянное значение коэффициента пропорциональности для локального значения коэффициента теплоотдачи наблюдается с локальными значениями продольных пульсаций скорости на внешней границе пристеночной зоны. Коэффициент пропорциональности этой связи составляет 0,5, а среднеквадратичное отклонение 0,029. Также отметим, что близкие к константе значения наблюдаются для связи между коэффициентами теплоотдачи и поперечными пульсациями скорости. Коэффициент пропорциональности в этом случае равен 0,87, а среднеквадратичное отклонение – 0,1.

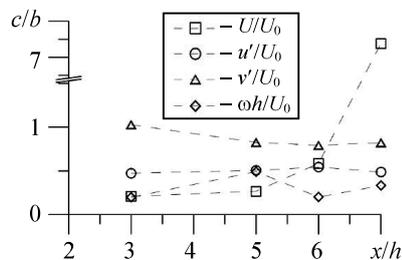


Рис. 4. Связь теплоотдачи за выступом с гидродинамическими характеристиками течения в рециркуляционной области на высоте  $y/h = 0,12$

Также существует точка зрения [19], в соответствии с которой увеличение теплоотдачи в рециркуляционной области связывается с высокими значениями кинетической энергии турбулентности при минимальном градиенте скорости, вследствие чего возмущения затрагивают вязкий пристеночный слой. По экспериментальным данным, полученным в работе, можно сделать вывод о пропорциональности конвективного теплообмена в отрывной зоне интенсивности турбулентных пульсаций на внешней границе формирующегося пограничного слоя возвратного течения.

Таким образом, полученные в работе результаты показали, что локальный теплообмен в области рециркуляционного течения в отрывной области пропорционален относительным пульсациям скорости на внешней границе пограничного слоя возвратного течения. Значение коэффициента пропорциональности между локальными значениями теплообмена и относительными пульсациями продольной скорости составляет 0,5 при среднеквадратическом отклонении 0,029.

Эта закономерность может быть использована для прогнозирования теплоотдачи в каналах с интенсификаторами теплообмена в виде выступов, в том числе в каналах охлаждения лопаток газовых турбин, и для усовершенствования моделей расчета процессов тепломассообмена в отрывных течениях.

Гидродинамические исследования методом SIV выполнены в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН. Данные по теплоотдаче были получены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №18-48-160030.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chyu M.K., Siw S.C.* Recent Advances of Internal Cooling Techniques for Gas Turbine Airfoils // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2013. Vol. 5. Iss. 2. P. 021008-1–021008-12.
2. *Ильинков А.В. и др.* Интенсивность вихревых структур в диффузорных выемках // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. P. 75–80.
3. *Kwak J.S., Han J.-C.* Heat Transfer Coefficients and Film-Cooling Effectiveness on a Gas Turbine Blade Tip // Journal of Heat Transfer. 2003. Vol. 125. Iss. 3. P. 494–502.
4. *Xie G. et al.* A Numerical Study of Flow Structure and Heat Transfer in a Square Channel with Ribs Combined Downstream Half-Size or Same-Size Ribs // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 61. Iss. 2. P. 289–300.
5. *Goldstein R.J. et al.* Heat Transfer – a Review of 2000 Literature // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002. Vol. 45. Iss. 14. P. 2853–2957.
6. *Webb R.L., Kim N.-H.* Principle of Enhanced Heat Transfer. USA: Taylor and Francis, 1994. 818 p.
7. *Jensen M.K., Bergles A.E., Shome B.* The Literature on Enhancement of Convective Heat and Mass Transfer // Journal of Enhanced Heat Transfer. 1997. Vol. 4. № 1. P. 1–6.
8. *Bergles A.E., Manglik R.M.* Current Progress and New Developments in Enhanced Heat and Mass Transfer // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2013. Vol. 20. Iss. 1. P. 1–6.
9. *Щукин А.В., Ильинков А.В.* Пристенная интенсификация теплообмена при сложных граничных условиях. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. 252 с.
10. *Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А.* Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 p.
11. *Терехов В.И. и др.* Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: НГТУ, 2016. 247 p.
12. *He C. et al.* Measurement of Flow Structures and Heat Transfer behind a Wall-Proximity Square Rib Using TSP, PIV and Split-Fiber Film // Experiments in Fluids. 2016. Vol. 57. Iss. 11. P. 165–182.
13. *Li S. et al.* An Experimental and Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Ribbed Channels with Large Rib Pitch-To-Height Ratios // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2013. Vol. 20. Iss. 4. P. 305–319.

14. Ali M.S., Tariq A., Gandhi B.K. Role of Chamfering Angles and Flow Through Slit on Heat Transfer Augmentation behind a Surface-Mounted Rib // Journal of Heat Transfer. 2016. Vol. 138. Iss. 11. P. 111901-1–111901-16.
15. Михеев Н.И., Душин Н.С. Метод измерения динамики векторных полей скорости турбулентного потока по видеосъемке дымовой визуализации // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 114–122.
16. Coletti F., Cresci L., Arts T. Spatio-Temporal Analysis of the Turbulent Flow in a Ribbed Channel // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2013. Vol. 44. P. 181–196.
17. Cardwell N.D., Vlachos P.P., Thole K.A. Developing and Fully Developed Turbulent Flow in Ribbed Channels // Experiments in Fluids. 2011. Vol. 50. Iss. 5. P. 1357–1371.
18. Душин Н.С. и др. Снижение методических погрешностей измерения локального коэффициента теплоотдачи методом электронагрева плоской стенки // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 4. С. 97–103.
19. Пядишюс А., Шланчяускас А. Турбулентный теплоперенос в пристенных слоях. Вильнюс: Мокслас, 1987. 239 р.

Поступила в редакцию 5.02.19

После доработки 22.03.19

Принята к публикации 22.03.19

## Near-Wall Heat and Mass Transfer in a Channel behind a Rib

N.S. DUSHIN, N.I. MIKHEEV, O.A. DUSHINA, I.A. DAVLETSHIN, AND D.I. ZARIPOV

Kazan Scientific Center Russian Academy of Sciences, Kazan

*The present paper puts forward and experimentally tests a hypothesis of correlation between heat transfer and flow characteristics in the near-wall region. Heat transfer in the separation region has been shown to depend linearly on streamwise fluctuations of velocity at the external boundary of the near-wall region (height  $y/h = 0.12$ ).*

**Single rib, separated flow, heat transfer enhancement, boundary layer, Smoke Image Velocimetry (SIV) technique**