

УДК 536.24

## **Влияние толщины пограничного слоя перед отрывом потока на аэродинамические характеристики и теплообмен за внезапным расширением в круглой трубе\***

**В.И. Терехов, Т.В. Богатко**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

Представлены результаты численного исследования влияния толщины пограничного слоя на турбулентный отрыв и теплообмен в трубе с внезапным расширением. При расчете использована модель турбулентности Ментера переноса сдвиговых напряжений, реализованная в пакете Fluent. Диапазон чисел Рейнольдса от  $5 \cdot 10^3$  до  $10^5$ . Рабочей жидкостью служил воздух. Степень расширения трубы  $(D_2/D_1)^2 = 1,78$ . Показано существенное влияние толщины отрывающегося пограничного слоя как на динамические, так и на тепловые характеристики потока. В частности, обнаружено, что при увеличении толщины пограничного слоя зона рециркуляции увеличивается, максимальное значение коэффициента теплоотдачи уменьшается.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Отрывные течения с последующим присоединением потока встречаются во многих технических приложениях. Наличие циркуляционного пристеночного слоя в отрывном течении за обратным уступом существенно влияет на процесс теплообмена. Изучению данной проблемы посвящено большое число расчетных и опытных работ [1–8]. Течение в каналах и трубах с внезапным расширением является одним из наиболее простых видов отрывных течений (рис. 1). Приходящий к уступу пограничный слой срывается с вершины острого угла, образуя свободный сдвиговой слой. При симметричном отрыве в трубе поток присоединяется к стенке трубы, образуя при этом зону рециркуляционного течения, протяженность которой зависит как от степени расширения трубы (высоты уступа), так и от толщины пограничного слоя перед точкой отрыва.

Несмотря на относительную простоту данного типа течения, ряд аспектов этой проблемы остается слабоизученным и противоречивым. Это объясняется многофакторностью и сложностью механизма турбулентного отрыва потока в ограниченном канале. Авторы работы [9] выделяют несколько основных параметров, влияющих на отрыв и присоединение потока: 1) состояние отрывающегося пограничного слоя, 2) толщина пограничного перед отрывом слоя, 3) величина турбулентности во внешнем невозмущенном потоке, 4) продольный градиент

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 07-08-00025 и 06-08-00300).

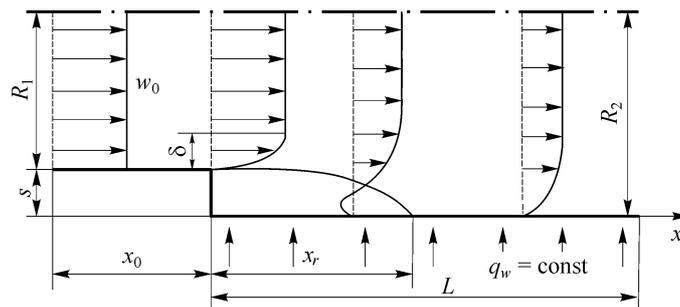


Рис. 1. Схема течения.

давления, 5) степень расширения канала. В задачах с теплообменом может проявляться и тепловая предыстория потока.

Одним из основных параметров авторы [9] выделяют толщину отрывающегося пограничного слоя, хотя некоторые исследователи полностью отрицают наличие такого влияния [2, 4].

Систематические исследования влияния толщины пограничного слоя на характеристики развивающегося после отрыва течения практически отсутствуют. Так, по данным экспериментальных работ [10, 11], в которых изучалось влияние толщины пограничного слоя перед отрывом на длину зоны рециркуляционного течения, показано, что с ростом толщины оторвавшегося слоя размер зоны существенно сокращается за счет более быстрого роста слоя смешения. В то же время, по данным [12], влияние динамической предыстории на положение точки присоединения не сказывается. В этой работе изменение отношения  $\delta/s$  производилось за счет вариации высоты уступа  $s$  при фиксированной толщине пограничного слоя  $\delta$ , что для течения в каналах приводит к изменению степени расширения потока, что тоже может оказать влияние на структуру отрывного течения.

Авторами работы [13] проведено численное исследование влияния толщины ламинарного пограничного слоя на динамические характеристики и теплообмен при обтекании двумерного уступа. Относительная толщина набегающего пограничного слоя  $\delta/s$  (отношение толщины пограничного слоя к высоте уступа) варьировалась от 0 до 3. Было показано, что при увеличении параметра  $\delta/s$  точка присоединения сдвигается по потоку, величина максимального значения коэффициента теплоотдачи является убывающей функцией отношения  $\delta/s$ .

Наиболее подробное экспериментальное исследование массообмена в области отрывного течения за уступом с различной толщиной пограничного слоя в прямоугольном канале проведено в работе [5]. В этой работе для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения сделаны прямые сопоставления коэффициентов массоотдачи при отсутствии и наличии концентрационного слоя при одной и той же аэродинамике отрывного потока. Показано, что динамическая и тепловая предыстории сильно сказываются на масштабах отрывных пузырей и интенсивности тепломассопереноса. Однако отсутствие таких важных параметров как размеры канала, толщин пограничных слоев перед отрывом и других параметров, затрудняют проведение детальных сопоставлений с этими опытными данными.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния толщины отрывающегося пограничного слоя на динамические характеристики потока и местный теплообмен в турбулентном режиме течения. Геометрические параметры рабочей области, такие, как степень расширения и высота ступеньки, были зафиксированы, поэтому в данной работе численно изучалось влияние только толщины динамического пограничного слоя, которая варьировалась за счет увеличения длины стабилизационного участка.

## 1. СХЕМА ТЕЧЕНИЯ. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Схема расчетной области представлена на рис. 1. Диаметр входной трубы  $D_1 = 120$  мм, длина до расширения варьировалась; диаметр канала после расширения составлял  $D_2 = 160$  мм, так что высота уступа равнялась  $s = (D_2 - D_1)/2 = 20$  мм. Длина трубы после расширения составляла 80 высот уступа, что являлось вполне достаточным для стабилизации возмущенного течения.

Для исследования влияния относительной толщины набегающего пограничного слоя на турбулентное обтекание обратного уступа было выбрано несколько значений этого параметра. Соответственно выбранным значениям рассчитывались длины стабилизационных участков, дающие для определенного значения скорости нужную толщину пограничного слоя. Иными словами, задавая на входе равномерный профиль скорости, увеличивали толщину пограничного слоя удлинением стабилизационного участка. Отношения толщины пограничного слоя к высоте уступа изменялись в диапазоне  $(\delta/s) = 0 \div 3$ , начиная от отсутствия пограничного слоя перед отрывом до развитого течения со смыканием пограничных слоев на оси трубы. Число Рейнольдса в численном эксперименте изменялось в диапазоне  $Re_{D1} = \bar{u} \cdot D_1 / \nu = 6,7 \cdot 10^3 \div 1,3 \cdot 10^5$ .

Для расчета выбрана модель турбулентности  $k-\omega$  SST [14], как наиболее приемлемая при расчете отрывных течений [15]. Предыдущие исследования авторов также подтверждают, что из всех моделей, реализованных в пакете Fluent, результаты, полученные с использованием последней, лучше всего соответствуют физике данного вида течения [16]. Расчетная сетка являлась неравномерной, сгущение производилось в равной степени ко всем твердым поверхностям, как к стенкам трубы, так и к поверхности уступа.

Граничные условия на входе: равномерный профиль скорости и степень турбулентности потока. В результате, при различных толщинах пограничного слоя среднерасходное значение скорости оставалось постоянным. Температура воздуха была постоянной  $10^\circ\text{C}$  и изменением теплофизических свойств в расчетах пренебрегалось. На выходной границе вниз по потоку задавались нулевые производные по нормали к границе для всех искомых величин, что соответствует области течения, в которой влияние внезапного расширения не сказывается. Тепловые граничные условия на стенках: постоянный тепловой поток на стенке за уступом и его отсутствие на стенке входной трубы.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показано распределение локальных параметров вдоль стенки после внезапного расширения — коэффициента давления  $C_p = 2\Delta p / \rho \bar{u}^2$  (рис. 2, *a*), коэффициента трения  $C_f / 2 = \tau_w / \rho \bar{u}^2$  (рис. 2, *b*) и теплоотдачи  $Nu = \alpha S / \lambda$  (рис. 2, *c*). Для наглядности представления показана начальная область формирования отрывного течения ( $x/s \leq 30$ ). При больших удалениях от входа ( $x/s \rightarrow 80$ ) влияние отрыва вырождается, и данные для различных толщин пограничного слоя совпадают между собой.

Как видно на рис. 2, изменение толщины пограничного слоя при фиксированном числе Рейнольдса значительно влияет на распределение параметров течения в рециркуляционной зоне. Утолщение пограничного слоя ведет к росту разрежения в вихревой зоне (рис. 2, *a*) и более затянутому процессу релаксации. По абсолютному значению трение на стенке (рис. 2, *b*), так же как и теплоотдача (рис. 2, *c*), снижается при росте толщины пограничного слоя  $\delta/s$ . Подобная тенденция имеет место и при других числах Рейнольдса.

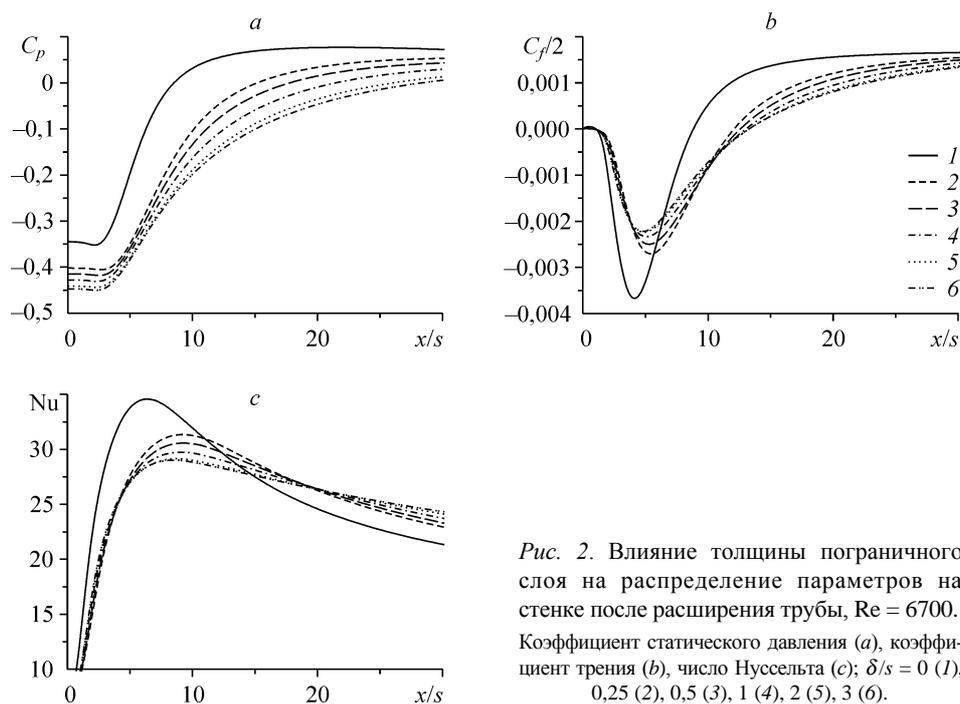


Рис. 2. Влияние толщины пограничного слоя на распределение параметров на стенке после расширения трубы,  $Re = 6700$ . Коэффициент статического давления (а), коэффициент трения (б), число Нуссельта (с);  $\delta/s = 0$  (1), 0,25 (2), 0,5 (3), 1 (4), 2 (5), 3 (6).

Наличие пограничного слоя перед точкой отрыва кардинально сказывается на характерных линейных масштабах (на координате точки присоединения, где  $C_f = 0$ , рис. 3, а, на местоположении максимума теплоотдачи, рис. 3, б) и величине этого максимума, рис. 3, с. Отметим, что с ростом толщины пограничного слоя размер отрывного пузыря вдоль по потоку возрастает вначале интенсивно, а затем

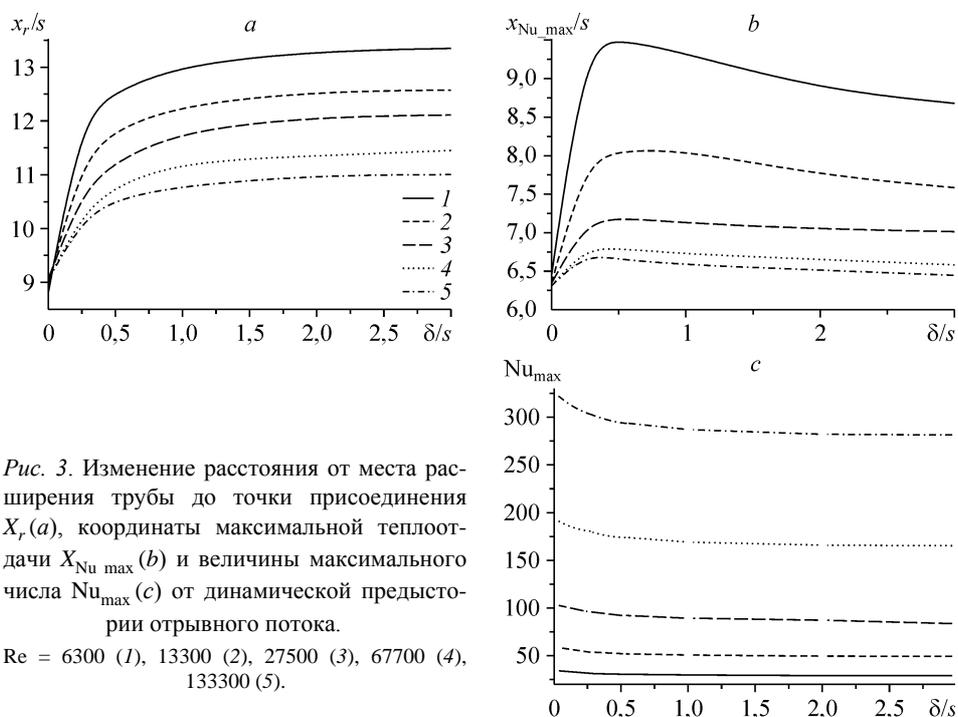


Рис. 3. Изменение расстояния от места расширения трубы до точки присоединения  $X_r$  (а), координаты максимальной теплоотдачи  $X_{Nu_{max}}$  (б) и величины максимального числа  $Nu_{max}$  (с) от динамической предыстории отрывного потока.  $Re = 6300$  (1), 13300 (2), 27500 (3), 67700 (4), 133300 (5).

более замедленно (см. рис. 3, *a*). Координата максимального значения теплоотдачи (см. рис. 3, *b*) ведет себя немонотонно и с ростом толщины пограничного слоя вначале увеличивается, достигает максимума, а затем снижается. Сопоставляя данные рис. 3, *a* и 3, *b*, следует отметить, что координаты точки присоединения пограничного слоя и максимальной теплоотдачи не совпадают между собой и наибольший теплообмен достигается при значительно меньших расстояниях от точки отрыва, чем происходит его присоединение. В ламинарном режиме течения [17] максимум коэффициента теплоотдачи при малых числах Рейнольдса располагается за точкой присоединения вниз по потоку. С ростом числа Рейнольдса он смещается вверх по потоку, как это имеет место при турбулентном режиме течения.

Для исследованной геометрии канала с большой степенью расширения, равной  $ER = (D_2 / D_1)^2 = 1,78$ , изменение максимального числа Нуссельта от толщины пограничного слоя невелико. Это следует из рис. 3, *c*, на котором представлены данные для широкого диапазона чисел Рейнольдса и толщин пограничного слоя. Видно, что с увеличением толщины пограничного слоя значение  $Nu_{Lmax}$  снижается.

На рис. 4 расчетные данные представлены в часто используемой при анализе отрывных течений обработке в виде зависимости  $Nu_{Lmax} = f(Re_L)$ , где  $Nu_{Lmax} = \alpha_{max} L / \lambda$ , а величина  $L = \sqrt{s^2 + X_{max}^2}$  — есть линейный масштаб, определяющий расстояние между точкой отрыва и координатой максимального значения коэффициента теплоотдачи. Как видно, в такой обработке расчетные данные для различных толщин пограничного слоя и чисел Рейнольдса хорошо обобщаются между собой и располагаются достаточно близко к эмпирической корреляции [18]

$$Nu_{Lmax} = 0,0803 Re_L^{0,72} \cdot Pr^{0,43} \quad (1)$$

и лежат на 30–40 % ниже обобщающей формулы, предложенной в работе [19],

$$Nu_{Lmax} = 0,192 Re_L^{0,665} \cdot Pr^{0,333} \quad (2)$$

Возможным объяснением причины обобщения данных в представленном виде является тот факт, что с ростом толщины пограничного слоя максимальный теплообмен снижается, а расстояние от точки отрыва до точки максимума теплоотдачи возрастает. В результате взаимного влияния факторов число Нуссельта, рассчитанное по данному линейному масштабу, практически не зависит от толщины пограничного слоя, и для расчетных оценок можно воспользоваться формулой (1).

Хорошее обобщение расчетных данных наблюдается и для такого важного в инженерных расчетах параметра как средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$ , в области от основания уступа до точки присоединения потока  $X_r$ . Эта величина позволяет непосредственно определять степень интенсификации теплообмена в зоне рециркуляции потока. Результаты

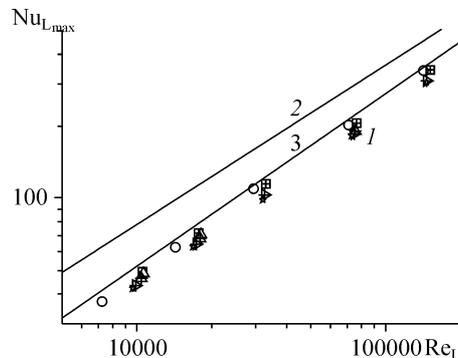


Рис. 4. Максимальное число Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса.

Данные численных расчетов (1), эмпирические соотношения работ [18] и [19] — 2 и 3 соответственно.

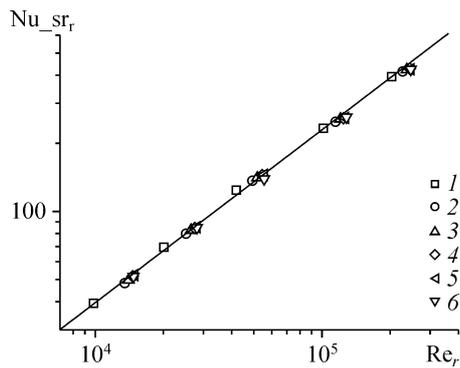


Рис. 5. Обобщение расчетных данных по средней теплоотдаче в зоне рециркуляции отрывного потока.

1–6 — расчетные данные,  $\delta/s = 0$  (1), 0,25 (2), 0,5 (3), 1 (4), 2 (5), 3 (6); линия — корреляционная формула (3).

расчетов представлены на рис. 5 в виде зависимости среднего числа Нуссельта  $Nu_r = \bar{\alpha}_r \cdot X_r / \lambda$  от числа Рейнольдса  $Re_r = \bar{u} \cdot X_r / \nu$  при вариации толщины пограничного слоя и числа Рейнольдса в трубе. Как видно, расчетные данные хорошо обобщаются и описываются следующим корреляционным соотношением:

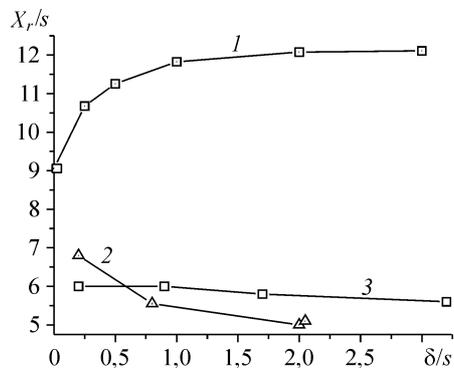
$$Nu_r = 0,0351 \cdot Re_r^{0,763}. \quad (3)$$

По структуре соотношение (3) близко к (1) и совместно с ним, а также с данными по величине линейных масштабов отрывных зон (см. рис. 3) можно оценить уровень теплообмена в области рециркуляции оторвавшегося пограничного слоя.

В то же время следует подчеркнуть, что результаты расчета настоящей работы находятся в противоречии с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Это относится, прежде всего, к зависимости координаты точки присоединения оторвавшегося пограничного слоя от его толщины. Эти сопоставления показаны на рис. 6 для достаточно близких чисел Рейнольдса в опытах и расчетах. Виден принципиально иной характер зависимости  $X_r$  от толщины пограничного слоя в расчете и эксперименте. В расчетах он возрастает с увеличением  $\delta/s$ , а в опытах падает, либо практически не изменяется. Причин такого несоответствия данных может быть много. В частности, в работе [13] отношение  $\delta/s$  изменялось за счет вариации высоты уступа  $s$ , что для течения в ограниченных каналах приводит к изменению степени расширения потока и продольного градиента давления. Согласно опытным данным [20], влияние этого параметра может привести к сильному изменению структуры отрывного течения и, соответственно, тепломассоотдачи. Это требует более детального исследования указанных факторов с целью выяснения механизма аэродинамических и тепловых процессов при турбулентном отрыве потока при совместном воздействии на структуру рециркуляционного течения широкого спектра геометрических и термогазодинамических параметров.

Рис. 6. Длина зоны присоединения турбулентного отрывного потока по данным различных авторов.

1 — расчет авторов настоящей работы, 2 и 3 — эксперименты [9] и [12] соответственно.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты численного исследования влияния относительной толщины пограничного слоя на турбулентное отрывное течение в трубе с внезапным расширением. Результаты показали, что исследуемый параметр оказывает влияние как на динамические характеристики потока, так и на местный коэффициент теплоотдачи за участком внезапного расширения. Исследования проводились в широком диапазоне чисел Рейнольдса и полученные зависимости для всего спектра имеют сходный характер. Было установлено, что при увеличении относительной толщины пограничного слоя длина рециркуляционной зоны увеличивается, максимальное значение коэффициента теплоотдачи уменьшается.

### Список обозначений

$ER = (D_2/D_1)^2$ — степень расширения трубы, $s$ — высота уступа, $\bar{u}$ — среднемассовая скорость во входном участке трубы, $\delta$ — толщина пограничного слоя, $L = \sqrt{s^2 + X_{\max}^2}$ — расстояние между точкой отрыва и координатой максимального значения коэффициента теплоотдачи, $Nu = aD_1/\nu$ — число Нуссельта, $Nu_{L\max} = \alpha_{\max} \cdot L/\lambda$ — максимальное число Нуссельта, $N\bar{u}_r = \bar{\alpha}_r X_r/\lambda$ — среднее число Нуссельта в отрывной зоне, $\alpha = \frac{q}{T_w - T_0}$ — коэффициент теплоотдачи,	$\bar{\alpha}_r$ — средний коэффициент теплоотдачи в зоне рециркуляции, $q_w$ — плотность теплового потока, $\nu$ — кинематическая вязкость, $T$ — температура, $D_1$ — диаметр входной трубы, $D_2$ — диаметр трубы после расширения, $Re_{D1}$ — число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру входного участка трубы, $Re_r = \bar{u} X_r / \nu$ — число Рейнольдса, рассчитанное по длине зоны рециркуляции, $C_p = 2(p-p_0)/\rho\bar{u}^2$ — коэффициент давления, $C_f/2 = \tau_w/\rho\bar{u}^2$ — коэффициент трения, $\tau_w$ — касательное напряжение, $X_r$ — координата точки присоединения, $X_{\max}$ — координата максимального значения $Nu$ .
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // *Inter. J. Heat Mass Transfer.* — 2003. — Vol. 46. — P. 4535–4551.
2. Гурей А.М., Уоткинс С.Б., Аунг В. Расчет теплообмена в турбулентном потоке при обтекании обратного уступа в трубе с внезапным расширением // *Теплопередача.* — 1985. — Т. 107, № 1. — С. 65–72.
3. Алемасов В.Е., Глебов Г.А., Козлов А.П. Термоанемометрические методы исследования отрывных течений. — Казань: Казанский филиал АН СССР, 1989. — 178 с.
4. Эббот Д.Е., Клайн С.Дж. Экспериментальное исследование дозвукового турбулентного течения при обтекании одинарных и двойных уступов // *Техническая механика. Сер. Д.* — 1962. — Т. 84, № 3. — С. 20–28.
5. Kottke V. Influence of temperature and concentration boundary layers at separation on heat and mass transfer in separated flows // *Proc. Inter. Heat Transfer Conf., Munich.* — 1982. — Vol. 3. — P. 177–182 (Paper FC32).
6. Бон Д.В., Хоффман М.А., Такахаси Р. К., Лондер Б.Е. Местный теплообмен за резким расширением круглого канала при постоянной плотности теплового потока на стенке // *Теплопередача.* — 1984. — № 4. — С. 91–98.
7. Комаров П.Л, Поляков А.Ф. Исследование характеристик турбулентности и теплообмена за обратным уступом в щелевом канале. — Препринт ИВТАН № 2-396. — М., 1996. — 70 с.
8. Webb R.L., Eckert E.R.G., Goldstein R.J. Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness // *Inter. J. Heat and Mass Transfer.* — 1971. — Vol. 14. — P. 601–617.

9. **Итон Дж.К., Джонстон Дж.П.** Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // Ракетная техника и космонавтика. — 1981. — Т. 19, № 10. — С. 7–19.
10. **Etheridge D.W., Kemp P.H.** Measurements of turbulent flow downstream of a rear warding-facing step // J. Fluid Mechanics. — 1978. — Vol. 86, pt.3. — P. 545–566.
11. **Eaton J.K., Johnston J.P., Jeans A.N.** Measurements in a reattaching turbulent shear layer // Proc. of the 2nd Symp. of Turbulent Shear Flows. — London, 1979.
12. **Narayanan M.A.B., Khadgi Y.N., Viswanath P.** Similarities in pressure distribution in separated flow behind backward-facing steps // Aeronautical Quarterly. — 1974. — Vol. 25. — P. 305–312.
13. **Батенко С.Р., Терехов В.И.** Влияние динамической предыстории потока на аэродинамику отрывного течения за обратным прямоугольным уступом // ПМТФ. — 2002. — № 6. — С. 84–92.
14. **Menter F.R.** 2-equation eddy- viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. — 1994. — Vol. 32, No. 8. — P. 1598–1605.
15. **Быстров А.Ю., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.** Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. — СПб.: Судостроение, 2005. — 392 с.
16. **Богатко Т.В.** Численное исследование теплообмена в трубе с диафрагмами // IX Всероссийская школа-конференция молодых ученых: Материалы конференции. — Новосибирск, 2006. — С. 22–24.
17. **Kondoh E., Nagano Y., Tsuji T.** Computational study of laminar heat transfer downstream of a backward-facing step // Inter. J. Heat Mass Transfer. — 1993. — Vol. 36. — P. 577–591.
18. **Леонтьев А.И., Ивин В.И., Грехов Л.В.** Полуэмпирический способ оценки уровня теплообмена за точкой отрыва пограничного слоя // Инженерно-физический журнал. — 1984. — Т. 47, № 4. — С. 543–549.
19. **Ota T., Nishiyama H.** A correlation of maximum turbulent heat transfer coefficient in reattachment flow region // Inter. J. Heat and Mass Transfer. — 1987. — Vol. 30, No. 6. — P. 1193–1200.
20. **Кюн Д.М.** Влияние положительного градиента давления на характеристики присоединяющегося течения несжимаемой жидкости над уступом // Ракетная техника и космонавтика. — 1980. — Т. 18, № 4. — С. 268–269.

*Статья поступила в редакцию 12 октября 2007 г.*