

УДК 536.24

## **ОБТЕКАНИЕ СИСТЕМЫ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ РЕБЕР В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ\***

**В.И. ТЕРЕХОВ, Н.И. ЯРЫГИНА, Я.И. СМУЛЬСКИЙ**

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

Приведены результаты экспериментального исследования развития турбулентного отрывного течения и теплообмена при обтекании системы из нескольких поперечных к потоку ребер. Рассмотрены условия низкого и высокого уровня турбулентности набегающего потока. Представлены данные по визуализации, коэффициентам давления и теплоотдачи, проведено сравнение результатов для двух уровней турбулентности. В системе из трех ребер и больше в низкотурбулентном потоке установлено образование очень неустойчивого течения во второй межреберной ячейке. При высоком уровне внешней турбулентности неустойчивость течения наблюдается в первой межреберной ячейке, что подтверждается изменением распределений давления. Показано, что наличие каждого дополнительного ребра способствует сокращению отрывной области за последним ребром, области восстановления давления, а также координаты максимального значения теплоотдачи. В высокотурбулентном потоке во второй межреберной ячейке интенсификация теплоотдачи достигает 30 %.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Работа посвящена экспериментальному исследованию динамики течения и теплообмена в межреберных ячейках, образованных несколькими поперечными к потоку ребрами, при разных уровнях турбулентности. С одной стороны задача связана с необходимостью улучшения методов интенсификации теплообмена с уменьшенными гидравлическими потерями в теплоэнергетическом оборудовании, а с другой - направлена на развитие физических основ процессов тепломассопереноса в высокотурбулентных отрывных потоках.

Существует большое количество экспериментальных работ по интенсификации теплообмена на поверхностях с турбулизаторами типа ребер [1–6]. Имеющиеся методы расчета конвективного теплообмена в условиях отрывных течений или довольно упрощенные, как интегральные, или трудоемкие в реализации, как численные методы на основе многоблочных вычислительных технологий [7, 8].

Изучение отрывного течения за единичной преградой дает возможность определения физических процессов переноса в оторвавшихся сдвиговых слоях и рециркуляционных областях и механизмов управления ими. В предыдущих работах авторов [9, 10] достаточно подробно исследовано вихреобразование и теплообмен за поперечным ребром, обтекаемым турбулентным потоком. Продемонстрировано, что с помощью высоты ребра и внешней турбулентности можно эффективно управлять отрывным потоком и интенсификацией теплообмена. Отрывные течения за уступами [11] и в поперечных полостях [12–14] довольно сильно подвержены

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 04-02-16070 и 06-08-00300).

влиянию внешних условий, включая турбулентность потока. В межреберной ячейке, как показано в работе [13], течение существенно отличается от течения в прямоугольной каверне тех же размеров. К сожалению, исследований по структуре потока и теплоотдаче на начальных участках поверхности с поперечными ребрами недостаточно. Именно на начальных участках влияние внешних условий на отрывное течение максимально [15], и оно может формировать последующие особенности обтекания всей поверхности. С точки зрения эволюции течения также важно установить, когда течение на ребренной поверхности становится автомодельным.

В настоящей работе изучались динамические и тепловые характеристики отрывного течения в системе от двух до пяти ребер при двух уровнях турбулентности. Определены картины вихреобразования, поля температур, давлений и коэффициентов теплоотдачи. Приведены сравнительные данные по визуализации, коэффициентам давления и теплоотдачи для низкой и высокой степени турбулентности набегающего потока. Выполнено сопоставление результатов в системах с разным числом ребер.

### 1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводились в дозвуковом потоке аэродинамической трубы Института теплофизики СО РАН, имеющей прямоугольный рабочий канал сечением  $200 \times 200$  мм и длиной 1000 мм. В рабочий канал помещалась плоская модель шириной 200 мм, длиной 600 мм, приподнятая на высоту 18 мм от нижней стенки, со ступенчатым носиком длиной  $\sim 100$  мм. Носик служил для создания турбулентного пограничного слоя толщиной порядка 10 мм со степенной зависимостью  $1/7$  [9, 10].

Для измерения и динамических, и тепловых характеристик использовались идентичные по размерам модели. Обе модели сделаны из текстолита толщиной 20 мм. На динамической модели в пяти продольных сечениях по ширине канала (в центральном сечении на расстоянии 50 мм от центра с одной стороны и на расстоянии 25 мм, 50 мм, 75 мм с другой стороны) имелись отборы давления с шагом 5 мм на начальной длине 300 мм сразу за носиком и на остальной части пластины длиной 200 мм – с шагом 10 мм. Тепловая модель нагревалась в режиме  $q_w = \text{const}$  с помощью электрического ленточного нагревателя из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм, расположенного по всей поверхности модели, кроме носика. В центральном сечении вдоль потока заподлицо с поверхностью были заделаны 20 термопар, первая — на расстоянии 60 мм от носика. Утечки тепла за счет теплопроводности модели рассчитывались по перепаду температуры на ней. Распределение температуры по всей поверхности теплообмена определялось методом термографии с помощью тепловизора “Сова”. Оцифровка полученного поля температур выполнялась по опорным термопарам с помощью специальных программ.

Для визуализации отрывного течения на поверхности в системе ребер методом нанесения сажемаслянной пленки использовалась еще одна модель аналогичных размеров с покрытием из оргстекла толщиной 3 мм. Визуализирующая смесь состояла из смеси черной офсетной краски и осветительного керосина.

На поверхность модели перпендикулярно потоку крепилось ребро или система ребер от двух до пяти, равных ширине канала, первое ребро — на расстоянии 50 мм от переднего края кромки. Ребра были выполнены из оргстекла и имели высоту  $H = 60$  мм, толщину — 4 мм. Расстояние между ребрами, как и высота, равнялось 60 мм, используемые ячейки имели квадратную форму. Скорость основного потока в большинстве экспериментов составляла 20 м/с. Соответствующее число Рейнольдса, рассчитанное по высоте препятствия, равнялось  $1,2 \cdot 10^5$ .

Эксперименты проводились при низкой и высокой степенях турбулентности набегающего потока  $Tu_0$ : 1,5 и 15 %. Высокую турбулентность обеспечивал флажковый генератор турбулентности, установленный на расстоянии 330 мм перед первым ребром. Полиэтиленовые флажки были прикреплены к перфорированной решетке с диаметрами отверстий 20 мм, которая перекрывала все сечение канала.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Визуализация течения

Визуализация картин течения у дна межреберных ячеек была получена для всех систем ребер от одного до пяти. Характерная картина для систем из четырех и пяти ребер при низком и высоком уровнях турбулентности приведена на рис. 1. Течение направлено слева направо. Вихреобразование в первой ячейке при  $Tu_0 = 1,5$  % (рис. 1, *a, c*) идентично тому, что имеет место в прямоугольной каверне [12]. У задней стенки ячейки сформирован основной вихрь, а у ее передней стенки расположен вторичный вихрь. Подобные картины наблюдаются в третьей, и в четвертой ячейках, только с более устойчивым течением. Крайне неустойчивое вихреобразование можно отметить во второй ячейке, что связано с образованием встречного течения к основному потоку из третьей ячейки во вторую. Этот эффект был замечен в ранних исследованиях авторов [13]. Неустойчивость течения во второй ячейке отмечается также и для системы из трех ребер. Течение за последним ребром в системе всегда такое же, как за единичным ребром.

Под влиянием внешней турбулентности течение во второй ячейке стабилизируется, оно становится наиболее устойчивым из всех ячеек (рис. 1, *b, d*). Неустойчивость вихреобразования смещается в первую ячейку, а соответственно возвратный поток имеет место над вторым ребром, при этом менее интенсивный, чем

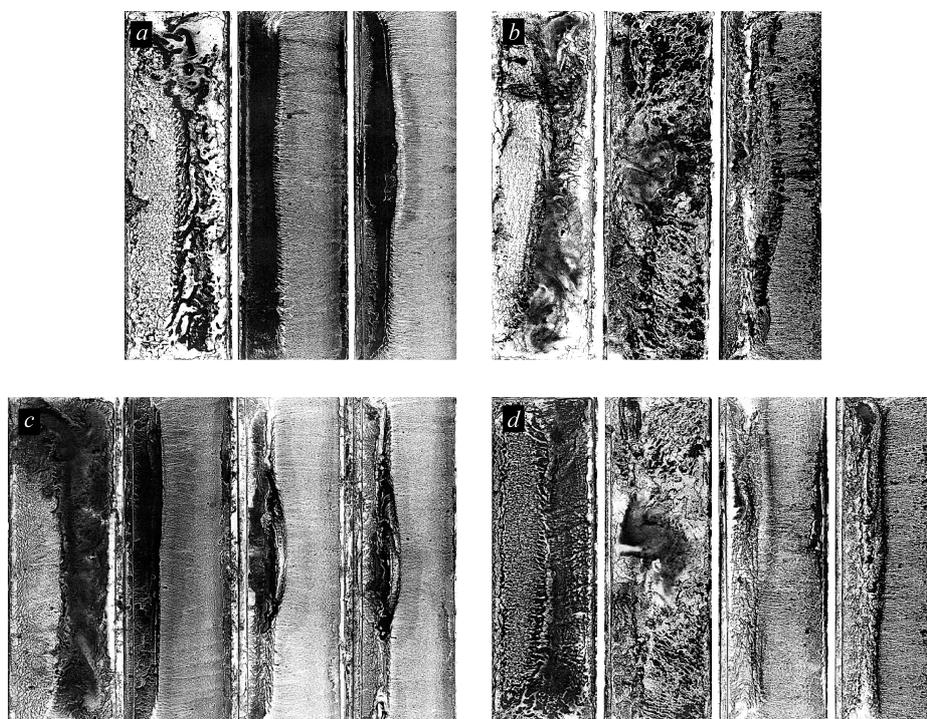


Рис. 1. Картина вихреобразования у поверхности дна при обтекании системы из четырех (*a, b*) и пяти (*c, d*) ребер.  $Tu_0 = 1,5$  (*a, c*), 15 (*b, d*) %.

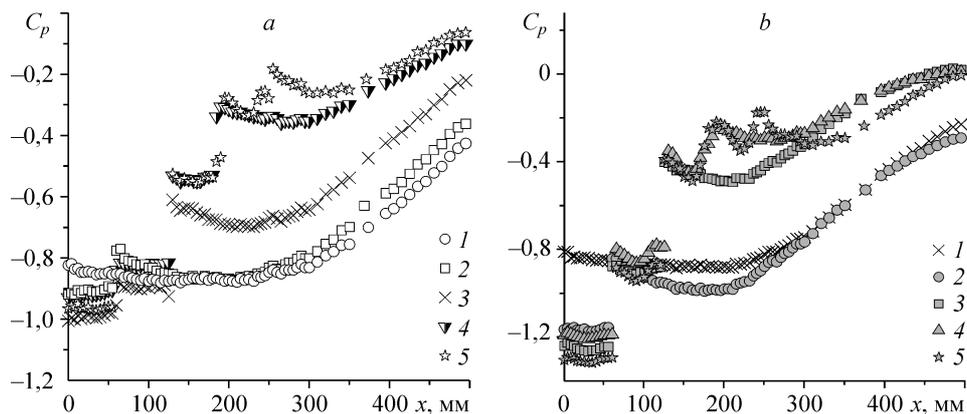


Рис. 2. Распределение коэффициентов давления в межреберных ячейках для систем из различного количества ребер при двух уровнях турбулентности.  
 $Tu_0 = 1,5$  (a),  $15$  (b) %. 1–5 — число ребер.

в низкотурбулентном потоке. Достаточно ощутимая перестройка вихревой структуры произошла во вторичном течении в третьей и четвертой ячейках с образованием по центру большого пузыря.

## 2.2. Распределения коэффициентов давления

Как показали опыты, распределения давления в межреберных ячейках в различных поперечных сечениях по ширине канала практически одинаковы. Распределение коэффициентов давления  $C_p = 2(p_i - p_0)/\rho U^2$  по длине на дне в межреберных полостях представлено на рис. 2. Здесь  $p_i$  — давление на стенке;  $p_0$ ,  $U$  — опорное давление и скорость в ядре потока над первым ребром. Координата  $x$  отсчитывается от места установки первого ребра на расстоянии 60 мм от носика. За последним ребром имеет место характерное распределение давления, схожее с распределением за единичным ребром. Восстановление давления за ребром происходит примерно на 14 калибрах [9, 10]. Как видно на рис. 2, а, с появлением каждого нового ребра происходит все более быстрое восстановление давления. Для системы из четырех и из пяти ребер длины области восстановления давления сравниваются и равняются около 9 калибров от начала первого ребра.

В турбулизированном потоке (рис. 2, б) наблюдается уменьшение  $C_p$  в первой межреберной ячейке и во всех остальных, кроме второй. Из-за перестройки течения во второй ячейке коэффициенты давления оказались для обоих уровней турбулентности очень близкими. Восстановление давления за последним ребром при высокой турбулентности происходит заметно быстрее. Если при  $Tu_0 \sim 15\%$  в начальных сечениях, за исключением второй ячейки, коэффициенты давления ниже, чем при  $Tu_0 = 1,5\%$ , то на расстоянии 500 мм они становятся выше.

## 2.3. Теплообмен

На рис. 3 изображено характерное температурное поле, полученное термографическим методом при естественной турбулентности, в системе из пяти ребер и за последним ребром. Видно, что неустойчивость течения во второй межреберной ячейке в большей степени сказалась и на распределении температур в ней. Температурное поле во второй ячейке симметрично полю в первой ячейке. Происходит слабая перестройка температурных распределений в третьей и четвертой ячейках, а за последним ребром распределение изотерм такое же, как и за единичным ребром.

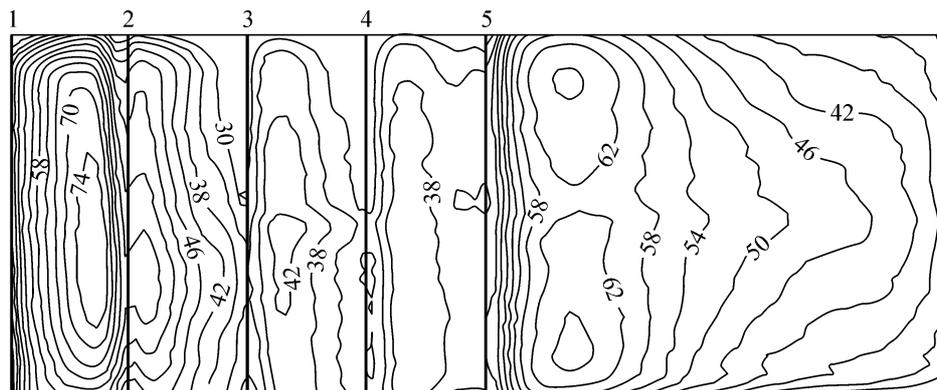


Рис. 3. Изотермы нагреваемой поверхности модели при обтекании пяти ребер.

По температурным полям были рассчитаны локальные коэффициенты теплоотдачи

$$\alpha_i = (q_w - q_{\text{потерь}}) / (T_{wi} - T_0).$$

Продольные распределения локальных по длине  $\alpha_i$  в центральном сечении (выборка сделана из термографических данных) для разного количества ребер (рис. 4) показали, что для обоих уровней турбулентности во второй ячейке наблюдается сильный рост теплоотдачи, особенно в системе из пяти ребер. В последующих ячейках рост коэффициента теплоотдачи несколько ослабевает. При обтекании пяти ребер в низкотурбулентном потоке теплоотдача достигает максимума в двух последних ячейках. В высокотурбулентном потоке максимум теплоотдачи имеет место и во второй ячейке. Как и ожидалось, коэффициенты теплоотдачи при высокой внешней турбулентности выше, чем при низкой. Об этом же свидетельствует и рис. 5, на котором приведен средний по поверхности каждой ячейки коэффициент теплоотдачи. В соответствии с картиной вихреобразования наиболее сильная под действием внешней турбулентности интенсификация теплоотдачи

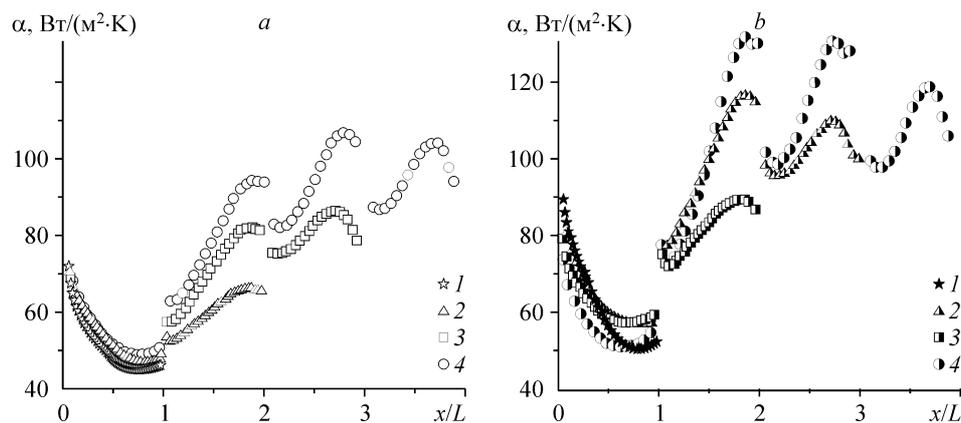


Рис. 4. Продольное распределение локальных коэффициентов теплоотдачи, осредненных в поперечном направлении, для систем из разного количества ребер.

$Tu_0 = 1,5$  (a),  $15$  (b) %. 1–4 — количество ячеек.

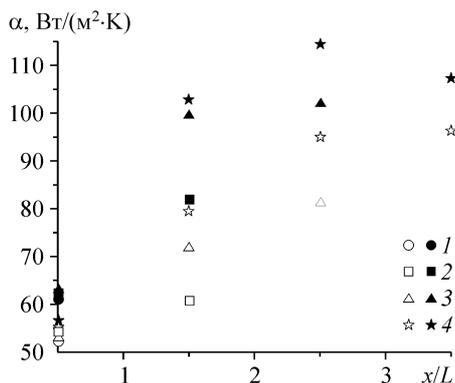


Рис. 5. Распределение осредненного по поверхности ячейки коэффициента теплоотдачи при обтекании системы ребер (от двух до пяти).

$Tu_0 = 1,5$  (a) (светлые значки), 15 (темные) %, 1-4 — количество ячеек.

(до 30 %) наблюдается во второй ячейке. В настоящей работе впервые было показано, что в отрывных потоках состояние течения вниз по потоку оказывает существенное влияние на вихреобразование и теплообмен вверх по потоку. Это выражается в возникновении над ребрами встречных потоков, влияющих на распределения давления и теплоотдачи.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование формирования вихревых структур, полей давления и температуры в межреберных ячейках системы ребер при двух уровнях турбулентности 1,5 % и 15 %.

Визуализация показала, что при низкотурбулентном обтекании системы из трех ребер и больше наблюдается очень неустойчивое течение во второй ячейке, связанное с подсосом массы из-за низкого давления за вторым ребром и возникновением возвратного течения над третьим ребром. При высокой турбулентности набегающего потока неустойчивость смещается в первую ячейку.

Определено, что каждое дополнительное ребро приводит к сокращению отрывной области за последним ребром и области восстановления давления.

Установлено резкое возрастание теплоотдачи во второй межреберной ячейке. Максимум теплоотдачи при обтекании пяти ребер в низкотурбулентном потоке достигается в третьей ячейке на расстоянии 3 калибров по высоте ребра, в высокотурбулентном потоке во второй ячейке — на расстоянии 2 калибров, в то время как за единичным ребром это расстояние составляет 15 калибров. Высокая турбулентность интенсифицирует теплоотдачу. Во второй ячейке интенсификация теплоотдачи составляет 30 %.

Обнаружен интересный факт: в отрывном течении условия вниз по потоку в виде дополнительных ребер оказывают влияние на вихреобразование, давление и теплообмен вверх по потоку.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментов и обработке данных Р.Ф. Жданову и О.В. Рудаковой (ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН).

### СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$C_p$  — коэффициент давления,

$$C_p = 2(p_i - p_0) / \rho U^2,$$

$H$  — высота ребра, мм,

$L$  — расстояние между ребрами,

$p$  — давление, Кг/м<sup>2</sup>,

$q$  — тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>,

$Re$  — число Рейнольдса,

$$Re_H = UH/\nu,$$

$U$  — скорость основного потока, м/с,

$x$  — продольная координата, м, мм,

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К,

$\rho$  — плотность, Кг/м<sup>3</sup>,

$\nu$  — кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с.

### ИНДЕКСЫ

$\overline{\phantom{x}}$  — средние значения,

$o$  — условия в основном потоке,

$i$  — локальные значения,

$w$  — условия на стенке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомелаури В. И., Канделаки Р. Д., Кипшидзе М. Е. Интенсификация конвективного теплообмена под воздействием искусственной шероховатости // Вопросы конвективного теплообмена и чистоты водяного пара. — Тбилиси: Мецниереба, 1970. — 194 с.
2. Han J.-C. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls // J. Heat Transfer. — 1984. — Vol. 106, No. 2. — P. 774–781.
3. Chandra P. R., Fontenot M. L., Han J.-C. Effect of rib profiles on turbulent channel flow heat transfer // J. Thermophysics: technical notes. — 1998. — Vol. 12, No 1. — P. 116–118.
4. Ligrani P. M., Oliveira M. M. Comparison of heat transfer augmentation techniques // AIAA J. — 2003. — Vol. 41, No 3. — P. 337–361.
5. Олимпиев В. В., Романовский В. Л., Новиков А. В., Ковальников Н. И. Термоанемометрическое исследование структуры потока в канале с выступами // Изв. Вузов. Авиационная техника. — 1993. — № 1. — С. 74–78.
6. Олимпиев В. В. Ламинарно-турбулентный переход в каналах теплообменников с выступами — интенсификаторами теплообмена // Теплоэнергетика. — 2001. — № 7. — С. 52–56.
7. Дрейцер Г. А., Исаев С. А., Лобанов И. Е. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. — Т. 11, № 2. — С. 28–35.
8. Дрейцер Г. А., Исаев С. А., Лобанов И. Е. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43, № 2. — С. 223–230.
9. Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2003. — Vol. 46. — P. 4535–4551.
10. Терехов В. И., Ярыгина Н. И., Жданов Р. Ф. Особенности течения и теплообмена при отрыве турбулентного потока за уступом и ребром. 2. Теплообмен в отрывном течении // ПМТФ. — 2003. — Т. 44, № 4. — С. 83–94.
11. Батенко С. Р., Терехов В. И. Влияние динамической предыстории потока на аэродинамику отрывного течения в канале за прямоугольным уступом // ПМТФ. — 2002. — Т. 43, № 6. — С. 84–92.
12. Terekhov V. I., Yarygina N. I., Dyachenko A. Yu. Turbulent heat transfer in a cross flow cavity with inclined sidewalls // Heat Transfer 2002: Proc. of the 12th Int. Conf. Heat Transfer. Grenoble, France: Elsevier. — 2002. — P. 615–621.
13. Терехов В. И., Третьяков С. П., Ярыгина Н. И. Теплоотдача в турбулентных отрывных течениях за крупными препятствиями // Тепломассообмен, ММФ-92: Труды минского международного форума. — Минск: ИТМО БАН. — 1992. — Т. 1, Ч. 1. — С. 10–13.
14. Аунг В. Интерферометрическое исследование вынужденной конвекции при отрывном обтекании выемок ламинарным потоком // Теплопередача. — 1983. — Т. 105, № 3. — С. 78.  
Первоисточник: Aung W. An interferometric investigation of separated forced convection in laminar flow past cavities // Trans. ASME. J. Heat Transfer. 1983. — Vol. 105.
15. Маскинская А.Ю., Мотулевич В.П., Сергиевский Э.Д. Экспериментальные исследования теплоотдачи в канале с лунками на нижней поверхности // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Тр. 2-ой Росс. конф. — М.: МЭИ, 2005. — 1 электрон. опт. диск (CD-Rom).

*Статья поступила в редакцию 12 мая 2006 г.*