

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ СИСТЕМЫ РЕБЕР

АННОТАЦИЯ

В докладе представлены результаты экспериментального исследования развития турбулентного течения и теплообмена в системе из нескольких поперечных к потоку ребер. Приведены данные по визуализации, коэффициентам давления и теплоотдачи. В системе из трех ребер и больше установлено возникновение сильно неустойчивого течения во второй межреберной ячейке. Показано, что наличие каждого дополнительного ребра способствует сокращению отрывной области за последним ребром, области восстановления давления, а также координаты максимального значения теплоотдачи.

1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах авторов [1, 2] достаточно подробно исследовано вихреобразование и теплообмен за поперечным ребром, обтекаемым турбулентным потоком. Продемонстрировано, что высотой ребра и внешней турбулентностью можно эффективно управлять отрывным потоком и интенсификацией теплообмена. Отрывные течения за уступами [3] и в поперечных полостях [4, 5] еще более сильно подвержены влиянию внешних условий и особенно предьстории потока. В межреберной ячейке, как было показано в работе [6], течение существенно отличается от течения в прямоугольной каверне тех же размеров. К сожалению, мало исследований по структуре потока и теплоотдаче на начальных участках поверхности с поперечными ребрами. Именно на начальных участках влияние внешних условий на отрывное течение максимальное [7], и оно может формировать последующие особенности обтекания всей поверхности. Интересно также проследить, когда течение на оребренной поверхности становится автотельным. В данной работе проведено экспериментальное исследование динамических и тепловых характеристик отрывного течения в системе двух, трех, четырех и пяти ребер. Определены картины вихреобразования, поля температур, давлений и коэффициентов теплоотдачи.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводились в дозвуковом потоке аэродинамической трубы Института теплофизики СО РАН, имеющей прямоугольный рабочий канал сечением 200 мм на 200 мм и длиной 1000 мм. В рабочий канал помещалась одна из моделей длиной 600 мм, приподнятая на высоту 18 мм от нижней стенки. Ступенчатый носик модели длиной ~ 100 мм служил для создания турбулентного по-

граничного слоя толщиной порядка 10 мм со степенной зависимостью $1/7$ [1,2].

Для измерения и динамических, и тепловых характеристик использовались идентичные по размерам модели. Обе модели были сделаны из текстолита толщиной 20 мм. На динамической модели в пяти продольных сечениях по ширине канала имелись отборы давления с шагом 5 мм на начальной длине 300 мм и на остальной части пластины с шагом 10 мм. Тепловая модель нагревалась в режиме $q_{ст} = const$ с помощью электрического ленточного нагревателя из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм, расположенного по всей поверхности модели. В центральном сечении вдоль потока заподлицо с поверхностью были заделаны 20 термопар. Утечки тепла за счет теплопроводности модели определялись по перепаду температуры на ней. Для этого две термопары были установлены на нижней стороне экспериментальной модели. Распределение температуры по всей поверхности теплообмена определялось методом термографии с помощью тепловизора "Сова". Оцифровка полученного поля температур выполнялась по термопарам программой T3W версии 3.5 для операционной системы Windows.

Для визуализации отрывного течения на поверхности в системе ребер методом сажемазляной 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 на расстоянии 50 мм от носика. Высота ребра H равнялась 60 мм, а толщина – 4 мм. Расстояние между ребрами, как и высота, равнялось 60 мм, так что рассматривались квадратные межреберные ячейки. Скорость основного потока в большинстве экспериментов равнялась 20 м/с. Соответствующее число Рейнольдса, рассчитанное по высоте препятствия, равнялось $1,2 \cdot 10^5$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Визуализация течения

Визуализация картин течения у дна межреберных ячеек была проведена для всех систем ребер от одного до пяти. Характерная картина для системы из пяти ребер дана на рис.1. Течение направлено слева направо.

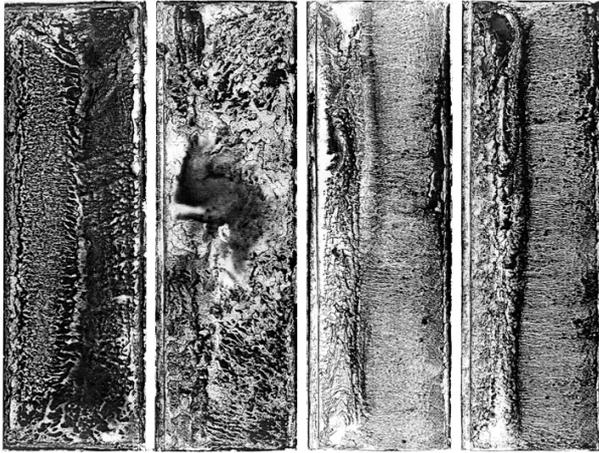


Рис. 1. Картина вихреобразования у поверхности дна при обтекании системы из пяти ребер

Вихреобразование в первой ячейке идентично тому, что имеет место в прямоугольной каверне [3]. У задней стенки сформирован основной вихрь, а у передней стенки расположен вторичный вихрь. Аналогичные картины наблюдаются в третьей и в четвертой ячейке, только течение в них более устойчивое. Неустойчивое течение можно видеть во второй ячейке, что связано с образованием встречного течения основному потоку из третьей ячейки во вторую. Этот эффект отмечался в ранних работах авторов, например в [6]. Неустойчивость течения во второй ячейке отмечается также во второй ячейке для систем из трех и четырех ребер. Течение за последним ребром всегда такое же, как за единственным ребром.

3.2. Распределения коэффициентов давления

Как показали опыты, распределения давления в межреберных ячейках в различных поперечных сечениях по ширине канала практически одинаковы. Распределение коэффициента давления $C_p = 2(p_i - p_0)/\rho U^2$ 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 ребром. Имеет место характерное распределение давления за единственным ребром. Восстановление давления за ребром происходит примерно на 14 калибрах [1, 2]. Как видно на рис. 2, с появлением каждого нового ребра происходит все более быстрое

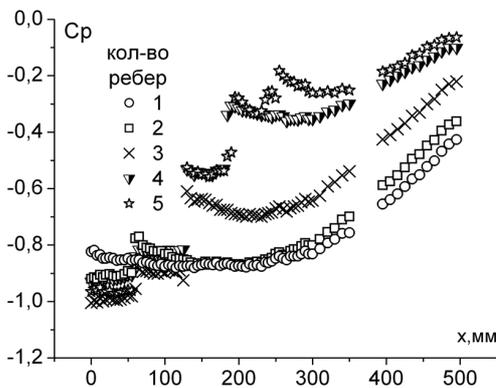


Рис. 2. Распределение коэффициента давления в межреберных ячейках для систем из разного количества ребер

восстановление давления. Для системы из четырех и из пяти ребер длины области восстановления давления сравниваются и равняются около 9 калибров от начала первого ребра. Это, можно ожидать, имеет место и для полностью оребренной поверхности.

3.3. Теплообмен

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

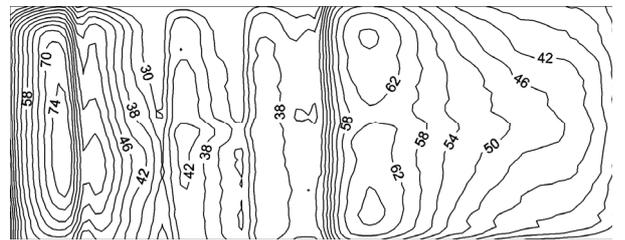


Рис. 3. Изотермы нагреваемой поверхности модели при обтекании пяти ребер

По температурным полям были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи α . Продольные распределения локальных по длине α для разного количества ребер представлены на рис. 4. 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 двух последних ячейках теплоотдача достигает максимума.

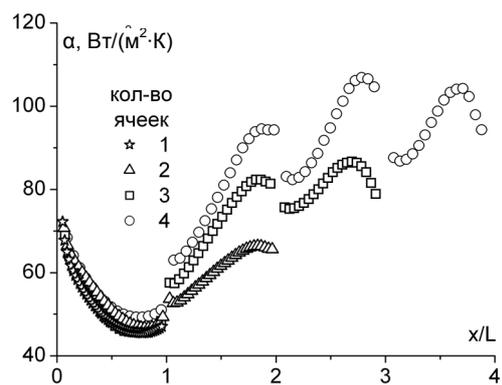


Рис. 4. Продольное распределение локальных коэффициентов теплоотдачи, осредненных в поперечном направлении, для систем из разного количества ребер

Более наглядно это видно на рис. 5, где показан средний по поверхности каждой ячейки коэффициент теплоотдачи.

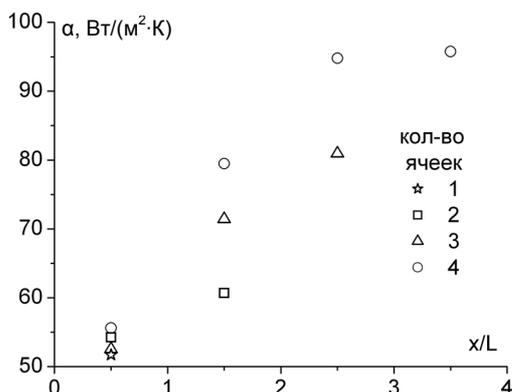


Рис. 5. Распределение осредненного по поверхности ячейки коэффициента теплоотдачи при обтекании от двух до пяти ребер

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование формирования вихревых структур, полей давления и температуры в межреберных ячейках системы ребер.

Визуализация показала, что в системах из трех ребер и больше наблюдается сильно неустойчивое течение во второй ячейке, связанное с подсосом массы из-за низкого давления за вторым ребром и возникновением возвратного течения над третьим ребром.

Определено, что каждое дополнительное ребро приводит к сокращению отрывной области за последним ребром, областей восстановления давления и достижения максимума коэффициента теплоотдачи.

Установлено резкое возрастание теплоотдачи во второй межреберной ячейке. Максимум теплоотдачи при обтекании пяти ребер достигается в третьей ячейке на расстоянии 3 калибров по ширине полости или в данном случае и высоте ребра, в то время как за единичным ребром это расстояние составляет 15 калибров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-02-16070).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

C_p — коэффициент давления, $C_p = 2(p_i - p_0) / \rho U^2$;
 H — высота ребра, мм;
 L — расстояние между ребрами, мм;
 p — давление, Па;
 Re — число Рейнольдса;
 $Re_H = U \cdot H / \nu$;
 U — скорость основного потока, м/с;
 x — продольная координата, м, мм;
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 ρ — плотность, кг/м³;
 ν — кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Индексы:

о — условия в основном потоке;
ст — условия на стенке.

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 // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2003. V. 46. P. 4535-4551.
2. 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 // *Прикладная механика и техническая физика*. 2003. Т. 44. № 4. С. 83-94.
3. 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.
4. Батенко С.Р., Терехов В.И. Влияние динамической предыстории потока на аэродинамику отрывного течения в канале за прямоугольным уступом // *Прикладная механика и техническая физика*. 2002. Т. 43. № 6. С. 84-92.
5. Аунг В. Интерферометрическое исследование вынужденной конвекции при отрывном обтекании выемок ламинарным потоком // *Теплопередача*. 1983. Т. 105. № 3. С. 78.
6. 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.
7. 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: Труды 2-й Российской конф. М.: Издательство МЭИ*. 2005.