

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ С ДИАФРАГМАМИ

В.И. Терехов, Т.В. Богатко

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Применение искусственной шероховатости, как известно, позволяет существенно усилить процесс конвективного теплообмена. Интенсификаторами теплообмена могут быть периодически расположенные на поверхности турбулизаторы, обеспечивающие срывы потока с последующим его присоединением. Изучению данной проблемы посвящено большое число опытных и расчетных работ [1 – 6].

В данной работе представлены результаты численного моделирования турбулентных отрывных течений и интенсификации теплообмена. Первая часть работы посвящена исследованию интенсификации теплообмена в трубе с диафрагмами. Полученные данные сравниваются с экспериментальными. Во второй части рассматривается пассивное управление отрывным течением, как способ повышения теплоотдачи. Установлена тенденция роста в зависимости от положения дополнительного турбулизирующего элемента. Расчёт проводился с помощью пакета прикладных программ Fluent 6. Использована модель переноса сдвиговых напряжений Ментера, как наиболее приемлемая для расчёта отрывных течений [4, 6].

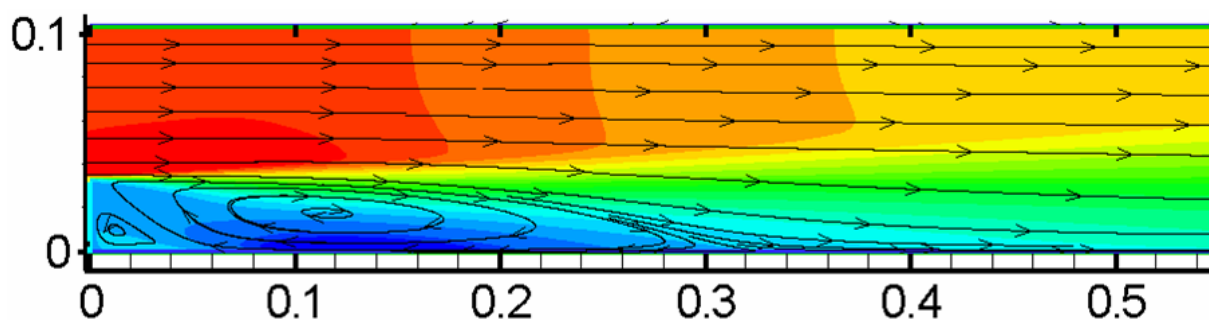


Рис. 1. Картина течения за сопловой вставкой

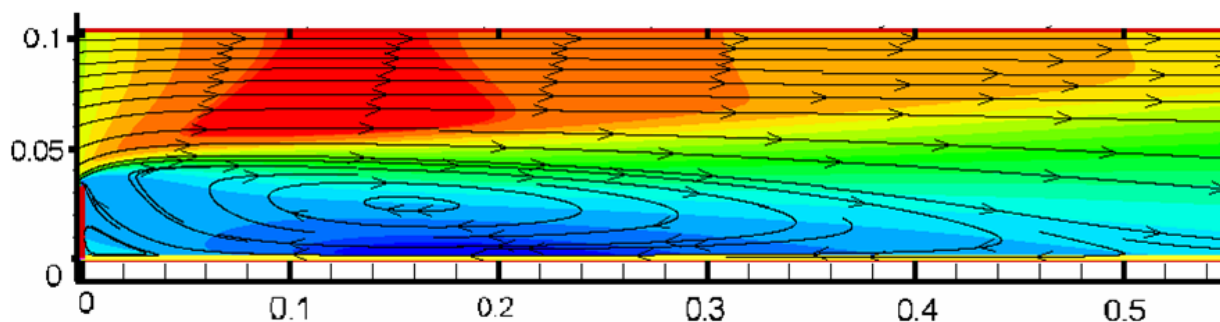


Рис. 2. Картина течения за диафрагмой

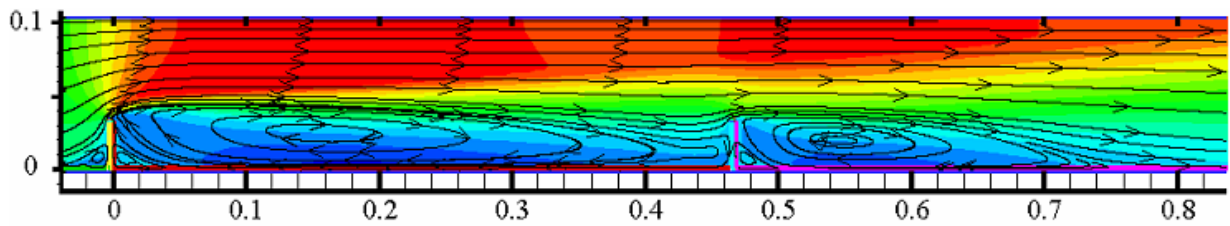


Рис. 3. Картина течения в области двух диафрагм

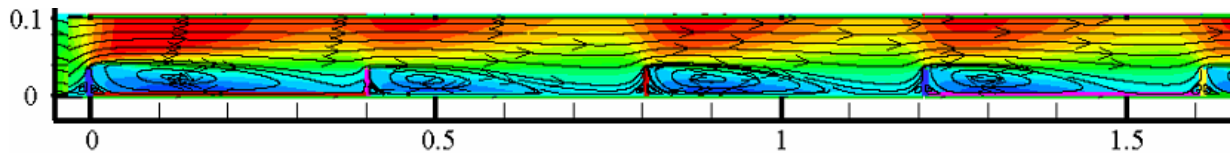


Рис. 4. Картина течения в области шести диафрагм

Расчётная область представляет собой трубу $D=0.207$ м с турбулизаторами на внутренней поверхности. Преградами служили кольцевые диафрагмы шириной 3 мм, с внутренним диаметром $d=0.140$ м, а так же сопловая вставка $d=0.140$ м.

Число Рейнольдса изменялось в диапазоне $Re = (3-5) \cdot 10^4$. Расчёты производились при граничном условии $q_w = \text{const}$. На входе в трубу профили температур и скорости имели развитой характер.

На рис. 1 показаны линии тока (векторами) и распределения продольной составляющей скорости (цветом) в области отрыва за внезапным расширением трубы. Непосредственно после отрыва наблюдается зона рециркуляции, характеризующаяся наличием возвратных течений и высокой степенью турбулентности. Далее следует область присоединения и участок развития нового пограничного слоя. Картина обтекания одиночной диафрагмы (рис. 2) отличается заметным увеличением зоны рециркуляции, по сравнению с внезапным расширением. Это можно объяснить тем, что в перед диафрагмой происходит поджатие потока к оси трубы, а в случае внезапного расширения линии тока перед отрывом прямые.

Для системы из двух диафрагм картина течения меняется (рис. 3). Большой вихрь наблюдается за первой преградой и намного меньший за второй. Это можно объяснить довольно высокой дополнительной турбулизацией потока за первой диафрагмой. Такая же тенденция имеет место и за первыми двумя преградами в системе из шести диафрагм (рис. 4). Причём отношение длин первого вихря к последующему постепенно уменьшается и течение стремится выйти на автомодельный режим. Но в случае шести диафрагм стабилизации течения ещё не достигается.

За счёт дополнительной турбулизации потока, теплообмен значительно увеличивается (в 2,5 – 3,5 раза по сравнению с гладкой трубой). На рис. 5 - 8 представлены распределения относительных чисел Нуссельта, для всех исследуемых интенсификаторов, в сравнении с экспериментальными данными при схожих условиях. Наблюдается хорошее соответствие данных для одиночной диафрагмы (рис. 6). Для систем двух (рис. 7) и шести (рис. 8) диафрагм тенденция увеличения теплообмена так же сохраняется. Исключением служат области, расположенные непосредственно вблизи диафрагм. Возможно, некоторое несоответствие связано с неточностью задания граничных условий при расчёте, которые недостаточно полно представлены в работе [1]. Это относится прежде всего к тепловым условиям на ребрах, а также влияние предыстории потока перед его отрывом. Известно [7,8], что существенную роль при отрыве может играть предыстория потока, которая в данных расчетах не учитывалась.

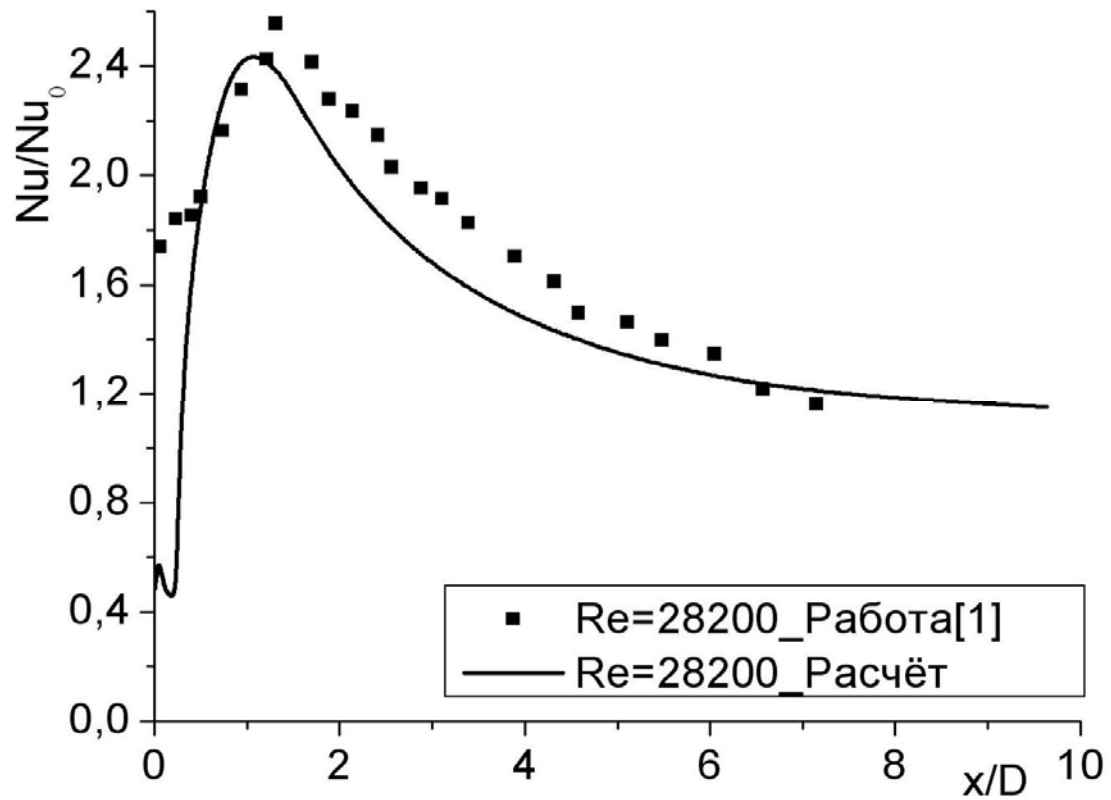


Рис. 5. Распределение относительных чисел Нуссельта за сопловой вставкой

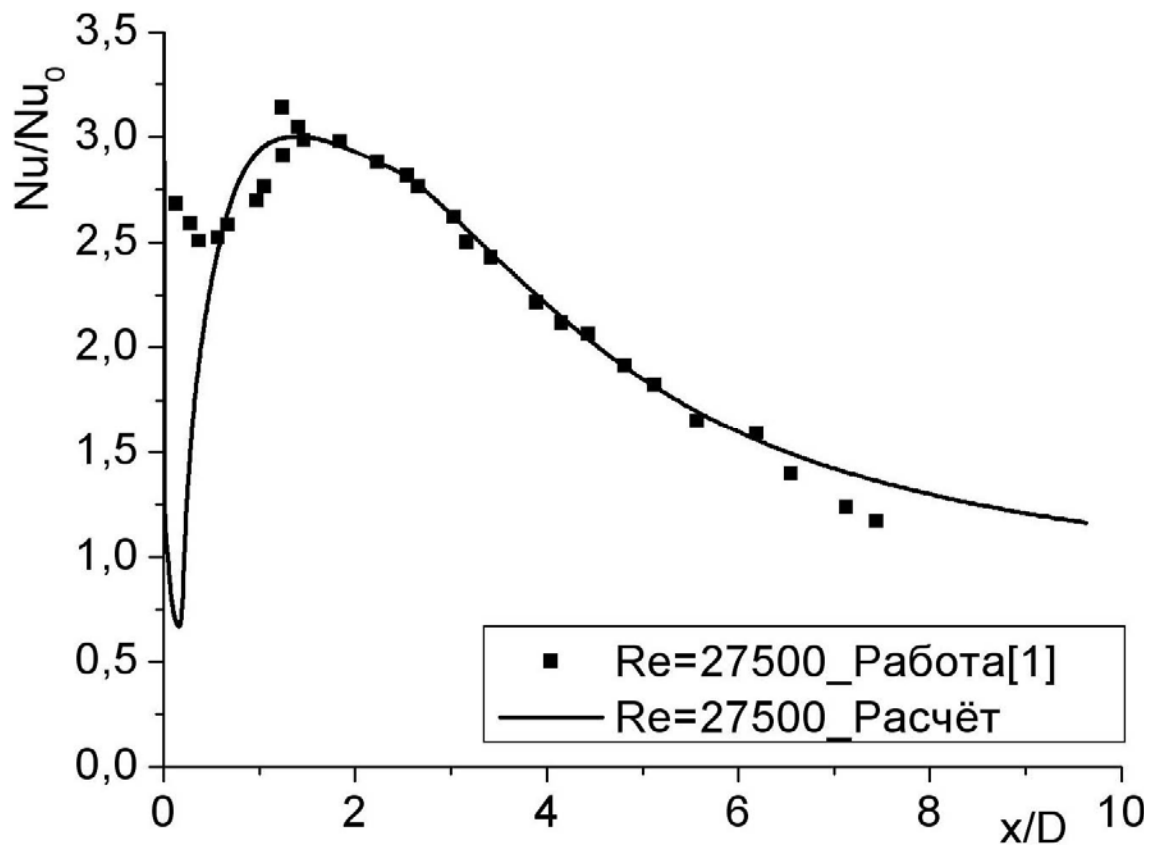


Рис. 6. Распределение относительных чисел Нуссельта за диафрагмой

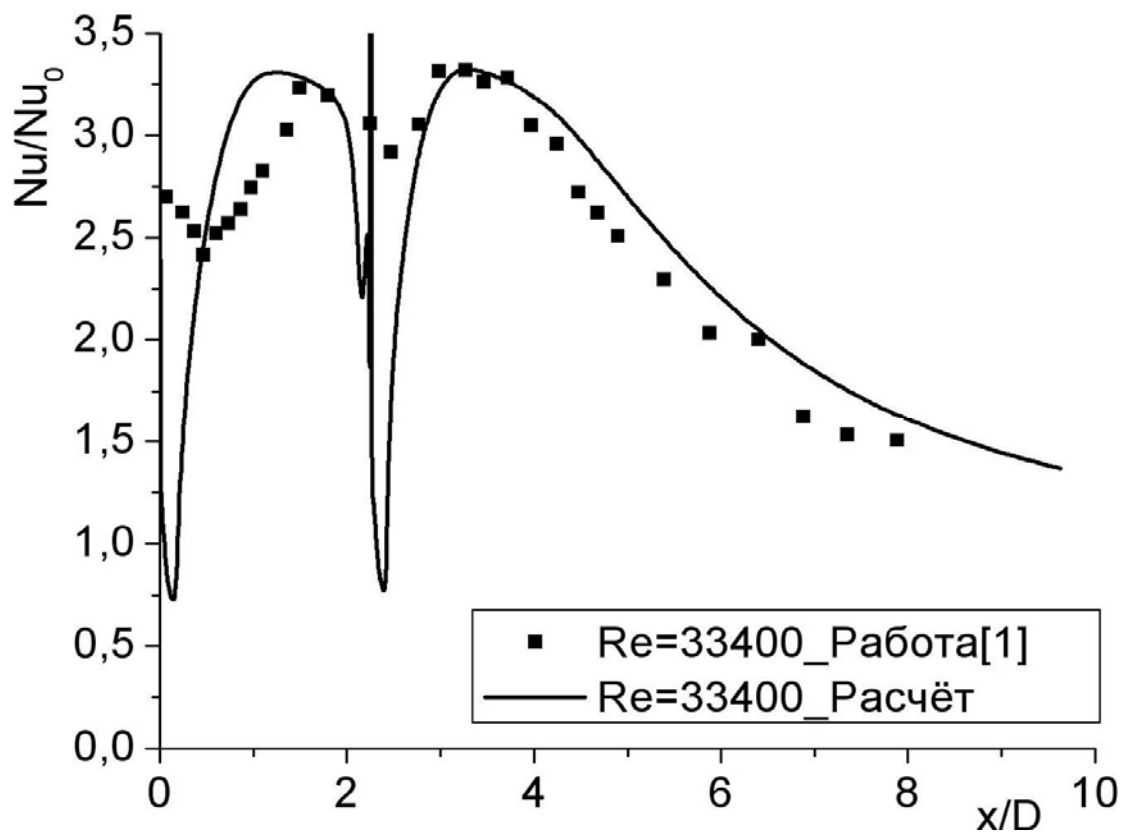


Рис. 7. Распределение относительных чисел Нуссельта в области двух диафрагм

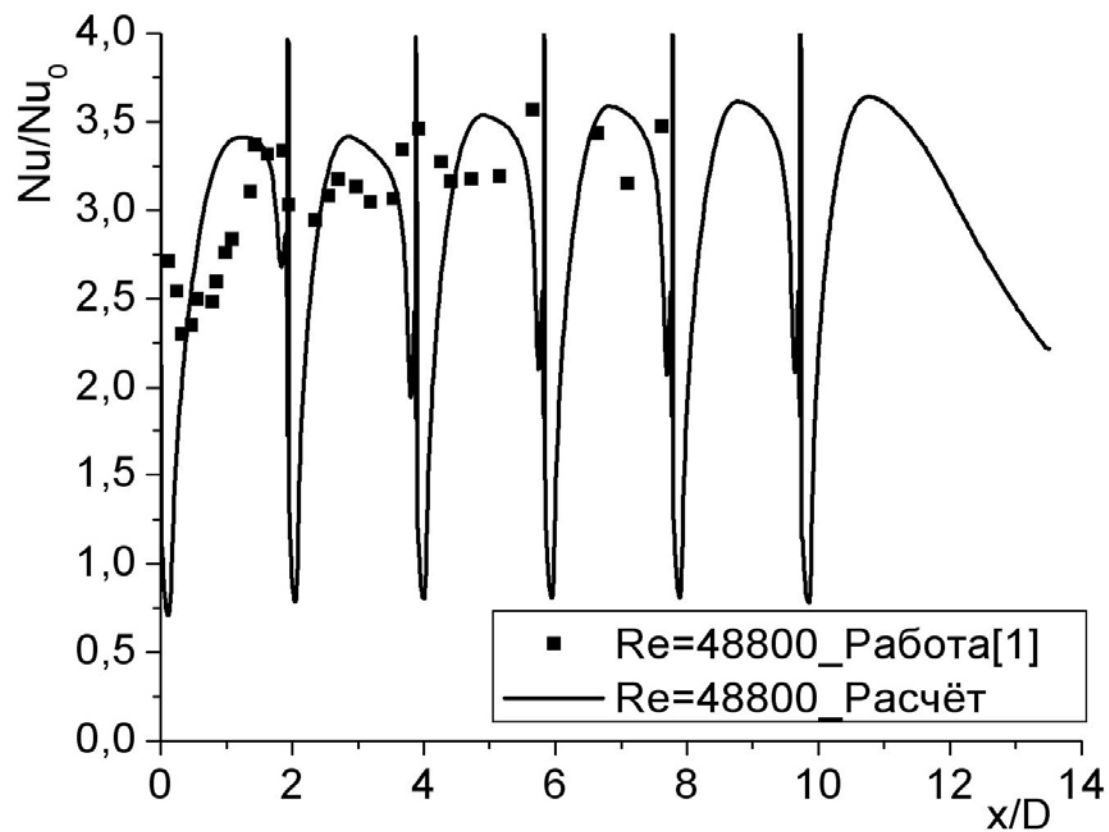


Рис. 8. Распределение относительных чисел Нуссельта в области шести диафрагм

Одной из актуальных задач аэродинамики и тепломассопереноса является разработка методов управления характеристиками тепломассообмена. Интерес к этой проблеме непрерывно возрастает [9-11], однако она, в силу сложности и многофакторности явления, остается не до конца изученной. Наиболее приемлемыми с практической точки зрения являются пассивные методы управления, основанные на использовании дополнительных турбулизирующих элементов, но существенно меньших геометрических масштабов, чем основное препятствие, вызывающее отрыв потока.

Управление отрывным течением осуществляется за счет введения в отрывную зону дополнительного вихревого слоя, приводящего к кардинальным изменениям структуры рециркуляционной зоны, смещению точки присоединения потока и, соответственно, к перераспределению коэффициентов тепломассоотдачи [9]. Поиск оптимальных размеров вихреобразователей, их местоположение в совокупности с масштабами основного отрывного течения представляет собой сложную многопараметрическую задачу.

В данном исследовании расчётная область представляет собой трубу $d=0.12$ м с внезапным расширением до $D=0.2$ м. Таким образом, высота уступа составляла $h=0.04$ м. Длина трубы после расширения была равной $L=1.6$ м. Для дополнительного возмущения пограничного слоя, в трубу малого калибра устанавливалась плоская диафрагма с внутренним диаметром $d_{dfg}=0.1$ м. Соответственно высота диафрагмы равна $h_{dfg}=0.01$ м. Рассматривались несколько случаев: 1) без дополнительного возмущения (отсутствие диафрагмы – базовый вариант); 2) установка диафрагмы непосредственно перед отрывом. 3) установка диафрагмы за 0.05 м до отрыва; 4) установка диафрагмы за 0.1 м до отрыва; 5) установка диафрагмы за 0.15 м до точки отрыва. Число Рейнольдса, определенное по параметрам входного участка трубы было равно $Re=6700$. Расчеты производились при нагреве трубы после внезапного расширения при граничном условии $q_w = \text{const}$. На входе в трубу профили температур и скорости имели равномерный характер.

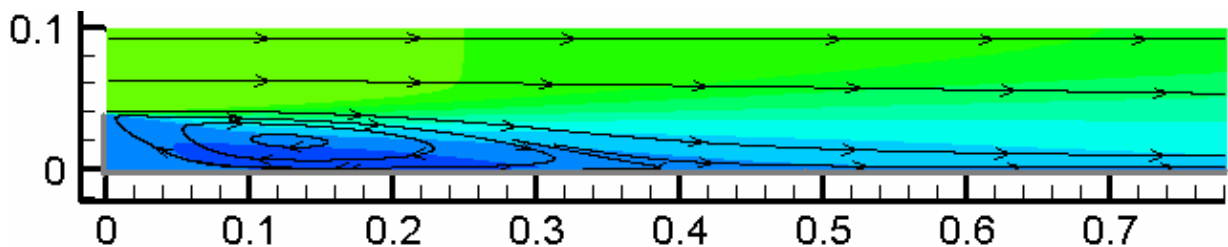


Рис. 9. Картина после внезапного расширения (координаты в метрах)

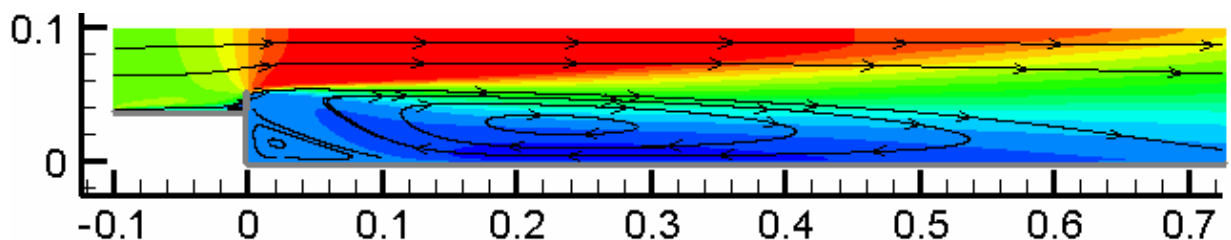


Рис. 10. Картина в области внезапного расширения, диафрагма установлена непосредственно перед отрывом

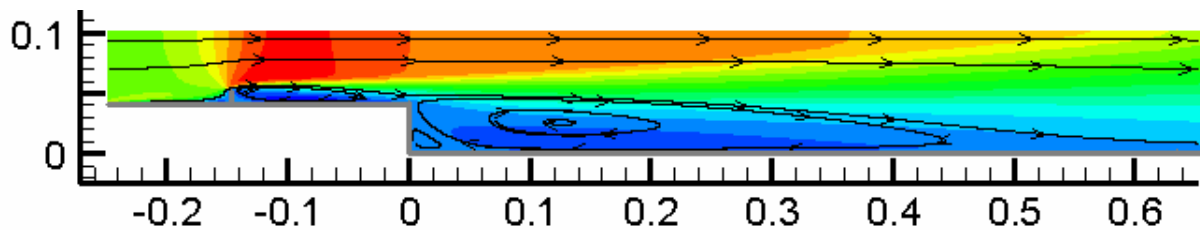


Рис. 11. Картина в области внезапного расширения, диафрагма установлена за 0.15 м до точки отрыва

На рисунке 9 показаны линии тока (векторами) и распределения продольной составляющей скорости (цветом) за внезапным расширением, при отсутствии дополнительного возмущения, 1-й случай. Непосредственно после внезапного расширения наблюдается зона рециркуляции, характеризующаяся наличием возвратных течений и высокой степенью турбулентности. Далее следует область присоединения и участок развития нового пограничного слоя. Картина течения в области внезапного расширения при наличии дополнительного возмущения, расположенного непосредственно перед точкой отрыва (2-й случай), представлена на рис. 10. Увеличение рециркуляционной зоны происходит почти в два раза. С удалением диафрагмы от точки отрыва навстречу основному потоку (рис.11, случай 5) наблюдается образование зоны возвратных течений непосредственно за малой преградой и сокращение длины рециркуляционной зоны основного отрывного течения.

Профили скорости в различных сечениях, до и после отрыва, показаны на рисунке 13. Для сопоставления взяты случаи 1, 2 и 5: при отсутствии возмущения, диафрагма максимально удалена от края уступа и случай, когда диафрагма расположена непосредственно при отрыве.

Сравнение относительных длин зоны присоединения для всех рассмотренных случаев представлено на рисунке 13. Можно отметить, что точка присоединения сдвигается вниз по потоку при приближении диафрагмы к краю уступа. При этом наибольшие градиенты скорости в сдвиговом слое также наблюдаются в случае установки диафрагмы непосредственно перед точкой отрыва потока. Это и приводит к большей протяженности рециркуляционной области и интенсификации теплоотдачи.

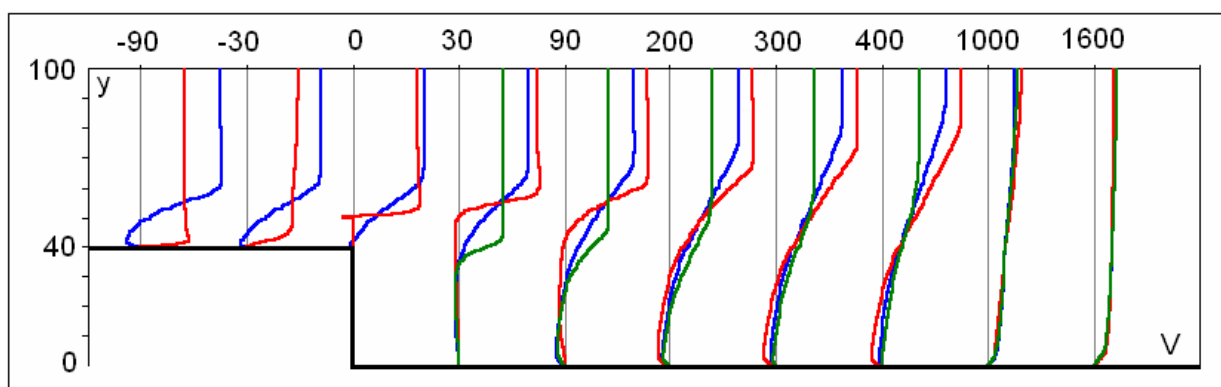


Рис. 12. Профили скорости в области внезапного расширения в различных поперечных сечениях трубы (координаты в миллиметрах). Зелёный контур – Отсутствие дополнительного возмущения, 1-й случай; Красный контур – Диафрагма установлена непосредственно перед отрывом, Синий контур – Диафрагма установлена за 150 мм до точки отрыва,

Сравнение относительных длин координаты точки максимума теплоотдачи, значения этого максимума, а также протяженности рециркуляционной зоны для всех рассмотренных случаев представлено на рис.13. Можно отметить, что все эти величины снижаются по мере удаления от уступа. Наибольшее влияние местоположения

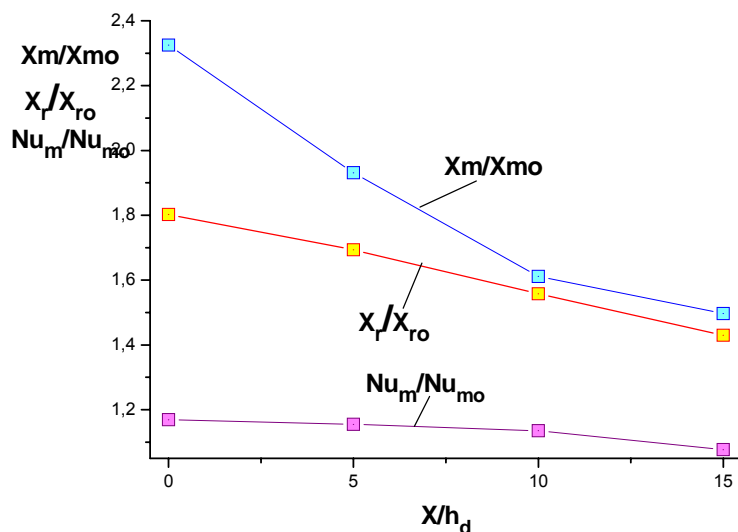


Рис. 13. Относительная длина зоны присоединения

диафрагмы наблюдается для координаты максимума теплоотдачи X_m/X_{mo} , причем его координата не совпадает с точкой присоединения потока и располагается значительно дальше по потоку.

Наиболее слабые изменения претерпевает величина максимального коэффициента теплоотдачи. Это наглядно демонстрирует рис.13. В тоже время, распределение локальных значений числа Нуссельта, представленное на рис.14, свидетельствует о принципиально ином характере распределения локальных коэффициентов теплоотдачи

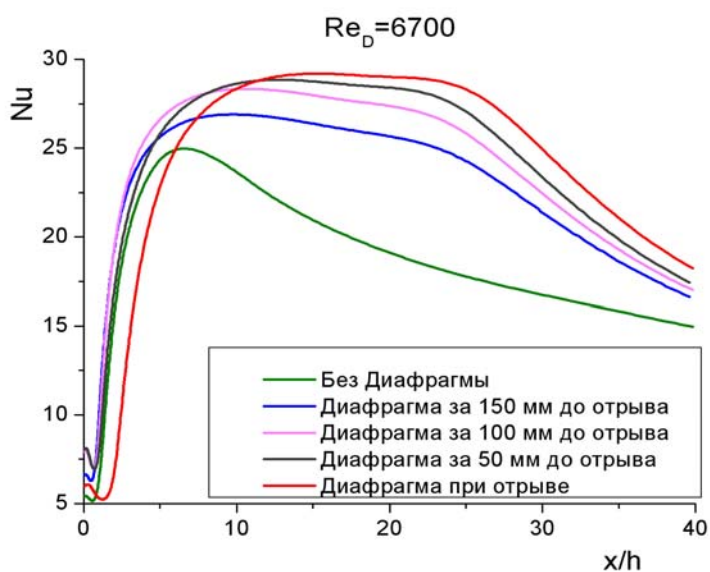


Рис. 14. Распределение чисел Нуссельта на стенке после внезапного расширения

в зависимости от местоположения вихреобразующей диафрагмы. При обычном отрыве потока без диафрагмы распределение имеет ярко выраженный максимум с последующей релаксацией течения до развитого. При наличии диафрагмы, начиная с района присоединения потока имеется достаточно протяженное «плато» с практически постоянным коэффициентом теплоотдачи. Очевидно, что интегральный теплообмен, рассчитанный по участку трубы длиной $0 < X/h < 25 \div 30$, где наблюдается интенсифицированная теплоотдача, как это наглядно следует из Рис.14, будет значительно превышать его величину без вихреобразующей диафрагмы. При этом, значения Nu тем больше, чем ближе к краю уступа установлена преграда. Таким образом, можно предположить, что теплообмен увеличивается в связи с дополнительным воздействием турбулизированного следа от диафрагмы на структуру отрывного потока за уступом или внезапным расширением трубы. Происходит увеличение масштабов рециркуляционной зоны и скорости вращения потока в нем.

О кардинальном влиянии предотрывной турбулизации на аэродинамические характеристики и, соответственно, на пристеночное трение свидетельствуют данные, представленные на рис 15.

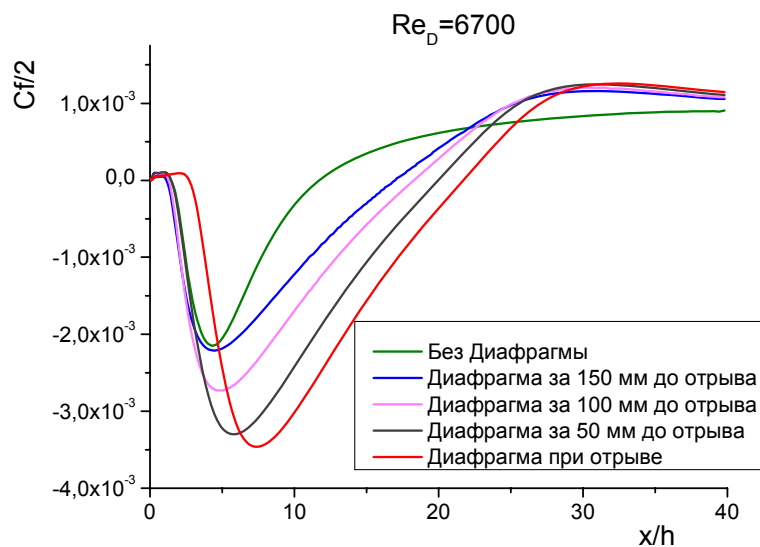


Рис. 15 Влияние диафрагм на коэффициент трения.

Уровень отрицательных касательных напряжений в рециркуляционной зоне возрастает по мере приближения диафрагмы к точке отрыва пограничного слоя. В таком случае уровень интегральных гидравлических потерь, обусловленных только трением на стенке, будет снижаться при введении турбулизированного следа в зону рециркуляции. Однако вопрос о суммарных гидравлических потерях остается открытым, поскольку градиенты давления в рассматриваемых условиях могут сыграть определяющую роль.

В целом, в этой задаче остается много неизученных и, особенно в экспериментальном плане, вопросов. В частности это относится к влиянию геометрического масштаба турбулизатора по сравнению с размером основного отрывного элемента, числа Рейнольдса потока и т.д. Однако, первые данные численного эксперимента говорят о значительных потенциальных возможностях подобного метода управления тепломассообменом.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 06-08-00300).

Литература

- [1] Кталхерман М.Г. Исследование турбулентных отрывных течений в канале.// Диссертация на соискание ст. канд. техн. наук. Новосибирск, 1970 г. 137 с.
- [2] 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.
- [3] Webb R.L., Eckert E.R.G., Goldstein R.J. Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1971. V. 14. pp. 601-617.
- [4] Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб/Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев.- СПб.: Судостроение, 2005.- 392 с.
- [5] Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Моделирование предельного теплообмена при комбинированной интенсификации теплообмена кольцевыми турбулизаторами и ленточными завихрителями. // *Известия РАН, сер. Энергетика*, №1. 2005. с. 92-100.
- [6] Богатко Т.В., Терехов В.И. Численное исследование интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании одиночных диафрагм различной формы в трубе. Труды XVI Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках».– М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Том 2, с. 420-424.
- [7] Батенко С.Р., Терехов В.И. Влияние динамической предыстории потока на аэродинамику отрывного течения за обратным прямоугольным уступом. // *ПМТФ*, №6, 2002, с 84-92.
- [8] Терехов В.И., Богатко Т.В. Влияние толщины пограничного слоя перед отрывом потока на аэродинамические характеристики и теплообмен за внезапным расширением в круглой трубе.// *Теплофизика и аэромеханика*, №1, 2008.
- [9] Neumann J., Wengle H. DNS and LES of Passively Controlled Turbulent Backward-Facing Step Flow.// *Flow, Turbulent and Combustion* 71, 2003. Pp 297-310.
- [10] Greiner M., Fisher P.F., Tufo H. Numerical simulation of resonant heat transfer of augmentation at low Reynolds numbers// *J. of Heat Transfer*, 2002, V. 124, Pp. 1169-1175.
- [11] Итон Дж.К., Джонстон Дж.П. Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // *Ракетная техника и космонавтика*. Т. 19, № 10, октябрь 1981, с. 7 - 19.