

УДК 536.25

Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Навродская Р.А.,
Блинов Д.Г., Сариогло А.Г.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБТЕКАНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ЭЛЕМЕНТОВ МЕМБРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Розглянуто питання чисельного моделювання складних гідродинамічних процесів переносу тепла в елементах мембранних трубних пучків.

Обсуждены вопросы численного моделирования сложных гидродинамических процессов теплопереноса в элементах мембранных трубных пучков.

The issues of numerical simulation of complex hydro dynamical processes with heat transferring taken place into membrane tube bank was discussed.

Bi – число Био;

H, L – относительные размеры расчетного модуля;

Nu, Re , – числа Нуссельта и Рейнольдса, соответственно;

$R_n, R_{вн}$ – относительные радиусы трубы наруж-

ный и внутренний, соответственно;

Δ – относительная толщина ребра-мембраны;

$\Theta_{вх}$ – относительная средняя температура потока газа во входном сечении;

$\Theta_{ж}$ – относительная средняя температура жидкости в трубе.

Введение

Проектирование теплообменных аппаратов и изучение протекающих в них процессов, как известно, представляют непреходящий интерес для энергетики и многих смежных областей науки и техники. До недавнего времени при исследовании гидродинамики и конвективного теплообмена преобладали в основном эмпирические и полуэмпирические интегральные методы, результатом которых являлись простые критериальные соотношения для характеристик течения и теплообмена [1-4].

Интенсивное развитие вычислительной техники в конце прошлого века привело к появлению целого ряда универсальных и специализированных пакетов прикладных программ, позволяющих проводить намного более детальное численное исследование физических процессов, имеющих место при обтекании и теплообмене различных по форме и геометрическим характеристикам теплообменных элементов.

Экспериментальному и численному исследованию обтекания и теплоотдачи поперечно обтекаемого трубного пучка, посвящено множество теоретических и экспериментальных работ [1-6]. В то же время ввиду крайней слож-

ности течения и теплообмена в трубных пучках вообще и в пучках с мембранными конвективными поверхностями теплообмена в частности, детальные исследования касающиеся этой проблематики, весьма немногочисленны.

Данная работа посвящена численному моделированию процессов тепломассопереноса в теплообменном модуле водотрубного теплоутилизатора мембранного типа (ТВМ). Этот тип теплообменников широко используется для утилизации тепла уходящих газов котельных установок, промышленных печей различного назначения и т. д.

Постановка задачи

Численно анализируется плоское движение вязкой несжимаемой жидкости и конвективный теплообмен в коридорном пакете мембранных труб.

Основным теплопередающим элементом рассматриваемого теплообменного аппарата является поперечно обтекаемый коридорный трубный пучок, набранный из мембранных панелей (рис. 1). Для проведения расчетов стабилизированного тепломассопереноса, ввиду симметрии задачи, выделяется расчетный периодический модуль, выделенный на рис. 1

штриховкой. На проточных границах расчетного модуля AB и CD (рис. 2, а) задаются периодические граничные условия.

Особенности применения постановки задачи с такими граничными условиями рассмотрены в работах [6-8]. На границах AF , ED и BC задаются условия гидродинамической и

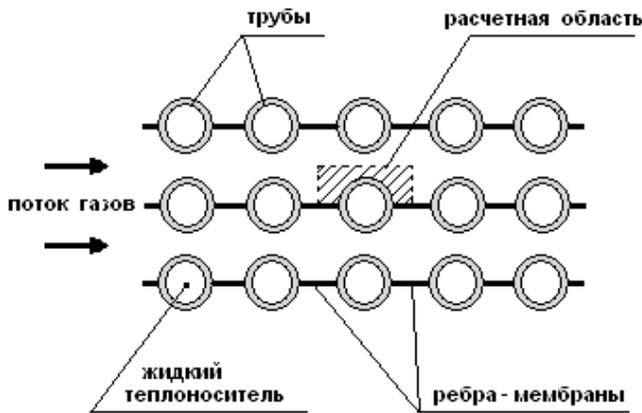


Рис. 1. Элемент теплообменного модуля (схематично).

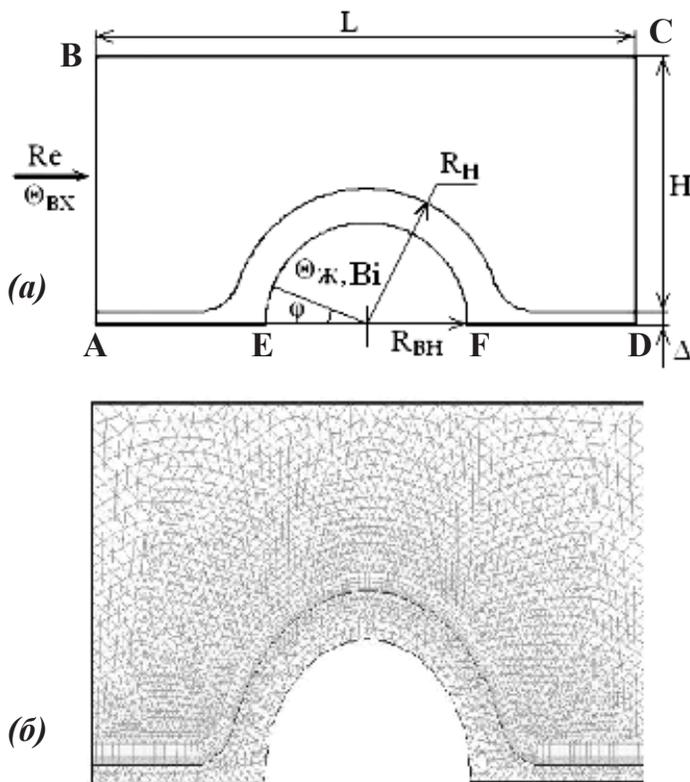


Рис. 2. К постановке задачи (а) и дискретизация расчетной области (б) для периодического модуля.

тепловой симметрии. На внутренней поверхности трубы задаются граничные условия третьего рода.

Трубы в пределах модуля располагаются с относительными продольными и поперечными шагами L и $2H$. Наружный диаметр трубы принимался в качестве линейного масштаба, средняя скорость в минимальном проходном сечении – как характерная скорость, избыточная по отношению к температуре жидкости в трубе среднemasсовая температура газа во входном сечении рассматривалась в качестве характерной температуры.

Моделирование исследуемого процесса проводилось с использованием универсального вычислительного комплекса FLUENT и программы генерации расчетных сеток (дискретизации расчетной области) – Gambit. Базовая расчетная сетка имеет неструктурированный характер, обеспечивающий хорошее моделирование криволинейных областей (рис. 2, б). На границе теплообменной поверхности со стороны газа задавался сеточный пограничный слой, причем размер первого слоя выбирался таким, чтобы обеспечить значение относительной координаты Y^+ близким к единице ($Y^+ = yV^*/\nu$, где y – расстояние от стенки (м), V^* – динамическая скорость (м/с), ν – кинематическая вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$)). При данном значении Y^+ , как известно, выполняется условие включения специальной пристеночной функции для моделирования пристеночных профилей скорости.

Тестирование

Перед проведением численных экспериментов был выполнен ряд тестовых расчетов, целью которых являлись выбор геометрических характеристик расчетной сетки и верификация модели турбулентности для расчета смешанного режима обтекания криволинейной поверхности, который наиболее характерен для промышленных теплообменных аппаратов. Тестирование проводилось для ряда значений чисел Re – 5×10^3 , 10^4 , 2×10^4 , 3×10^4 , характерных для смешанного режима течения. Сравнение полученных тепловых и гидродинамических характеристик с экспериментальными данными

[5, 8] показало, что наиболее близкое совпадение с экспериментом обеспечивает использование $RNG-k\epsilon$ модели турбулентности. Относительная погрешность по средним значениям Nu составила 5...7%. Высокая эффективность $k-\epsilon$ модели турбулентности в модификации RNG для рассматриваемой физической ситуации вполне соответствует характеристикам данной модели, приведенным в [9].

Обсуждение результатов

В данной работе делается акцент на анализе локальных характеристик процессов течения и теплопереноса в элементах мембранных теплообменников. Приводимые ниже данные отвечают следующим относительным значениям исходных параметров: $Re = 10^4$, $Pr = 0,73$, $Bi = 1,2$, $\theta_{вх} = 1$, $\theta_{ж} = 0$, $H = 1$, $L = 2$, $R_H = 0,5$, $R_B = 0,1875$, $\Delta = 0,02344$.

Рисунок 3 иллюстрирует характерное распределение числа Nu/Nu_{max} вдоль поверхности теплообмена мембранного трубного пучка для случая $Re = 10^4$. Здесь стрелки в зонах 1 – 6 указывают направление возрастания толщины пограничного слоя (ПС) в каждой зоне. На рис. 4 представлены линии постоянных

значений функции тока в межтрубном пространстве с характерными вихревыми зонами, а также схематично показаны отмеченные направления роста толщины ПС между зонами его отрыва и присоединения.

Как видно из рис. 4, рассматриваемое течение характеризуется наличием устойчивого первичного вихря над ребром в межтрубном пространстве – зона 2 на рисунке и двумя небольшими вторичными вихрями в местах примыкания ребер к трубе – зона 3 на рисунке. Для указанных вихревых зон характерны существенно более низкие значения скорости течения по сравнению с ядром потока (зона 1 на рисунке), что является причиной существенно более низкой интенсивности теплообмена в данных зонах – до 40% от максимального значения числа Nu .

Выделим шесть точек на границе стенка-поток рассматриваемого периодического модуля (см. рис. 4): B, C, D, E, F, G , в которых структура течения у стенки претерпевает изменение, а именно, в окрестности каждой из выделенных точек происходит торможение потока в пристеночной области, последующее его расслоение и образование в пристеночной об-

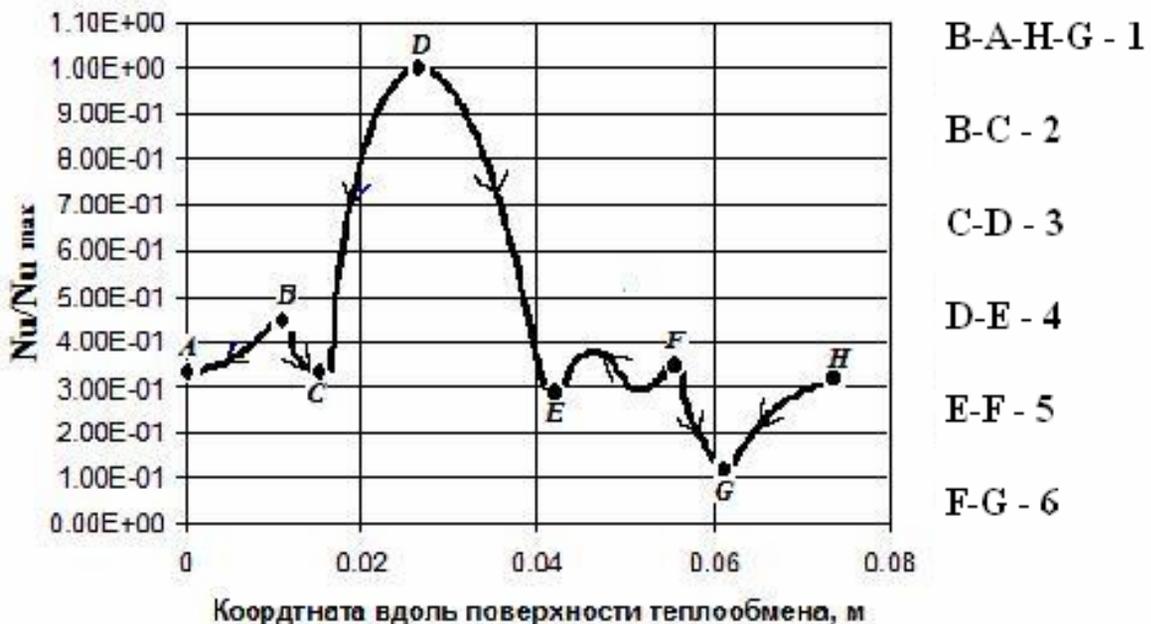


Рис. 3. Распределение величины Nu/Nu_{max} при $Re = 10^4$ вдоль теплообменной поверхности периодического модуля.

ласти зон с обратным течением или обратных вихрей (зоны 2 и 3 на рис. 4).

Рассмотрим последовательно физический смысл каждого экстремума на кривой распределения безразмерной величины Nu/Nu_{max} (рис. 3). В зонах *A-B* и *G-H*, которые соответствуют поверхности межтрубной мембраны, наблюдается рост толщины ПС в направлении движения потока и соответственно уменьшение интенсивности теплообмена. В зонах вторичных вихрей также наблюдается снижение интенсивности теплообмена, очевидно, это связано с увеличением толщины ПС во вторичном вихре. Первичный вихрь в этих зонах не достигает стенок, а проскальзывает вдоль внешних сторон вторичных вихрей от точек отрыва *C* и *G* до точек *B* и *F* присоединения ПС вторичных вихрей. Следует также отметить волнообразный всплеск интенсивности теплоотдачи в зоне *E-F*, что вероятно можно объяснить, главным образом, резким возрастанием интенсивности турбулентности в зоне отрыва за точкой *E* (см. рис. 3, 5).

Проведенные вычислительные эксперименты показали также, что в исследуемом диапа-

зоне значений числа *Re* максимум интенсивности теплообмена при обтекании мембранных конвективных поверхностей приходится на область точки *D* (см. рис. 3) – точки присоединения основного потока к трубе, что согласуется с экспериментальными исследованиями [5, 8]. В случае коридорных мембранных пучков, для глубинного ряда пучка, точка столкновения располагается в лобовой зоне трубы при значениях угла $\varphi \sim 45...65^\circ$ в зависимости от величины числа *Re*, причем с ростом *Re* точка присоединения смещается по направлению к кормовой зоне, а точка отрыва (точка *E* на кривой, рис. 3) смещается по направлению к лобовой зоне. То есть с ростом *Re* в рассматриваемом диапазоне его изменения, критические точки *D* и *E* смещаются навстречу друг к другу. Вышеизложенное иллюстрируется данными на рис. 5, где приведены распределения величины числа *Nu* вдоль теплообменной поверхности при различных числах *Re*. Обращает на себя внимание также тот факт, что характер кривой Nu/Nu_{max} коррелируется с кривой изменения интенсивности турбулентности *I* в пристеночной зоне (см. рис. 4, 6).

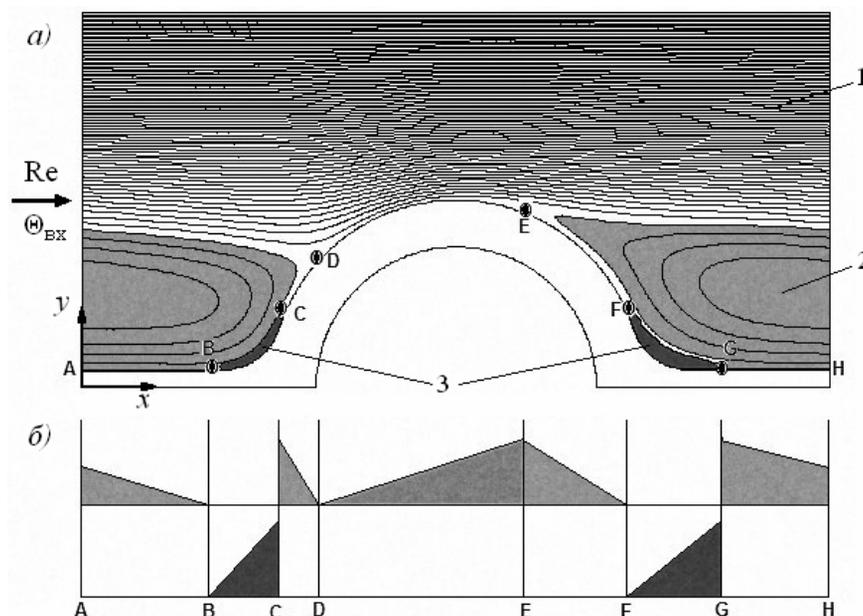


Рис. 4. Вид линий постоянных значений функции тока для $Re = 10^4$ (а) и схематическое изображение эпюры изменения направления роста толщины пограничного слоя в пристеночной области (б): 1 – зона ядра потока, 2 – зона первичного вихря, 3 – зоны вторичных вихрей на стыке ребро-труба.

Выводы

В данной работе на основе CFD – моделирования выполнен анализ особенностей образования вихревых структур при поперечном обтекании мембранных трубных пучков. Установлен факт существования вдоль поверхности теплообмена шести характерных зон, отвечающих различному характеру течения, получены

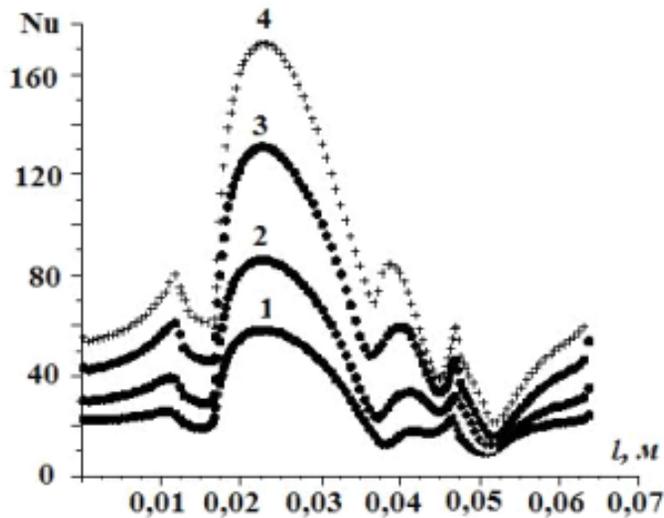


Рис. 5. Изменение числа Nu вдоль поверхности теплообмена: 1 – $Re = 5000$; 2 – $Re = 10000$; 3 – $Re = 20000$; 4 – $Re = 30000$.

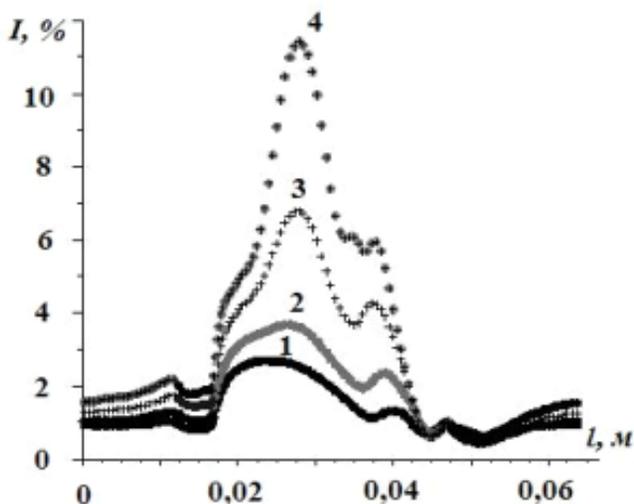


Рис. 6. Изменение интенсивности турбулентности I в пристеночной области: 1 – $Re = 5000$; 2 – $Re = 10000$; 3 – $Re = 20000$; 4 – $Re = 30000$.

соответствующие данные для локальных значений комплекса Nu . Изучены эффекты влияния числа Re на местоположение указанных зон и характеристики течения и теплообмена в них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А. Численное моделирование теплообмена при турбулентном течении с отрывом в пакетах труб. Теплофизика высоких температур, – 2004, – том 42, №2, – С. 291 – 301.

2. Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачев А.Е. Ретроспективный анализ полуэмпирических дифференциальных моделей турбулентности для расчета отрывных течений // Мат. третьей Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». М.: МЦНМО, – 2003. – С. 54.

3. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. – СПб: БГТУ, – 2001, – 107 с.

4. Ермишин А.В., Исаев С.А. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки. – М.: МГУ, – 2003. – 360 с.

5. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, – 1982.

6. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплопередача и сопротивление пакетов труб. – Л.: Энергоатомиздат, – 1987.

7. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Баранова Т.А. Численное моделирование влияния чисел Рейнольдса и Прандтля на ламинарный теплообмен в коридорном пакете круглых труб различной плотности. Теплофизика и аэромеханика, – 2004, том 11, №1. – с. 87 – 106.

8. Локшин В.А., Лисейкин И.Д., Аронов Д.И. Исследование и расчет теплоотдачи и аэродинамических сопротивлений мембранных коридорных пучков. Теплоэнергетика, – 1975, №11, – С. 75 – 77.

9. Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В. Групповые методы в теплофизике. Киев: Наукова думка, – 2003, – С. 385 – 402.

Получено 14.09.2010 г.