

УДК 536.24.621.18

© 2008 г. **А.В. Костенко**, канд. техн. наук,  
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕМБРАННЫХ КОРИДОРНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ**

К настоящему времени выполнено значительное количество экспериментальных работ по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению в мембранных коридорных пучках в поперечном потоке воздуха. Предлагаются алгоритмы и комплексы программ численного моделирования для диапазона малых чисел Рейнольдса.

### **Введение**

Ранее и в настоящее время проводится широкий комплекс теоретических и экспериментальных исследований, конструкторских и технологических разработок по промышленному освоению новых мембранных конвективных и ширмовых поверхностей нагрева для парогенераторов [1, 2].

Применение мембранных коридорных пучков в качестве ширмовых элементов водяных экономайзеров и промежуточных пароперегревателей первой степени ставит задачу получить экспериментально обоснованный материал для расчета теплоотдачи и аэродинамических сопротивлений таких пучков. Расчетные исследования теплообменников, основанные на решениях уравнений Навье-Стокса и энергии, до сих пор носят единичный характер. В основном используют экспериментальные и полуэмпирические интегральные методы, которые приводят к простым критериальным зависимостям. Появление и прогресс персональных программ актуальны [3, 6]. С помощью алгоритмизации системы управлений Навье-Стокса и энергии, разработанного комплекса программы [4] и метода «среднего» Фурье [7] получены результаты по расчету теплоотдачи и аэродинамическим сопротивлениям мембранных регулярных коридорных пучков в ламинарном диапазоне течения. Результаты численного моделирования 28 регулярных пучков могут быть использованы в практике проектирования, теплообменных устройств для ламинарного режима изменения числа Рейнольдса  $40 \leq Re \leq 1000$  и числа Прандтля  $Pr = 0,73$ . В данной работе они приведены в таблице для числа  $Re = 40$ .

Решение задачи предлагается осуществлять с использованием «q» расчетной области, используемой в работе [8].

Отметим, что можно использовать  $Q$  расчетную область, однако возможно появление эффектов нестационарности.

## Постановка задачи

Рассчитывается плоское ламинарное течение и конвективный теплообмен в коридором мембранном регулярном пучке цилиндрических труб кругового сечения, расположенных с продольным и поперечным шагами  $s_2$  и  $s_1$  соответственно, схематическое изображение приведено на рис. 1, а, б.

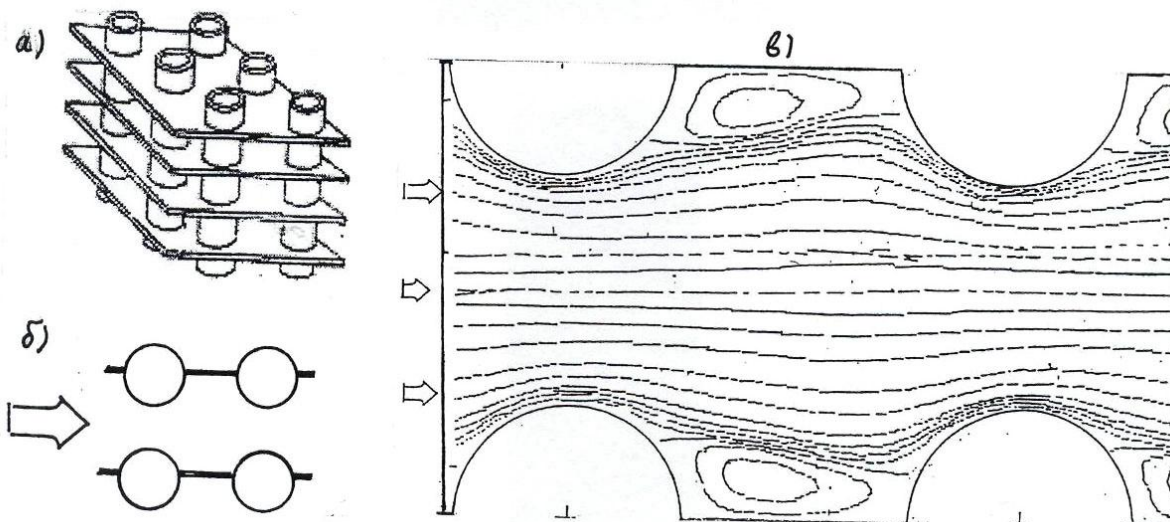


Рис 1. Мембранный регулярный коридорный пучок труб:  
а – общий вид пучка труб ABCD; б – схема изображения мембранного коридорного пучка;  
в – картина течения в виде линий постоянных значений функций тока.

Диаметр  $d$  принят в качестве линейного масштаба, а среднемассовая скорость  $U$  – за характерную. На продольных границах выделенной расчетной области ставятся условия симметрии, а на входной и выходной границах – периодические граничные условия, которые заменяют влияние соседних труб. На участках, смежных с поверхностью цилиндра, и омываемой стенке цилиндра реализуются условия прилипания (смежные участки-проставки есть мембраны) [8]. Для выбранной среды с постоянными физическими свойствами решение топливной задачи рассматривается отдельно от динамической с использованием рассчитанных ранее полей скоростей. Число Рейнольдса изменяется в диапазоне дискретных значений от 40 до  $10^3$ , а число Прандтля принимается равным 0,73. Геометрические размеры расчетной ячейки – равными  $s_1 \times s_2 = 1,25 \times 1,25$ ;  $1,50 \times 1,50$ ; и  $2,0 \times 2,0$  (остальные результаты получены по методу «среднего» Фурье [7]). Стенка цилиндра считается изотермической с нулевой температурой. В качестве характерной температуры принята среднемассовая температура во входном сечении и в размерном виде, равная 293 °К.

Характерные особенности численного моделирования: шаг сетки в тангенциальном направлении  $\pi/120$ ; шаг по времени  $\Delta t = 0,01$ ; точность расчета уравнения изменения количества движения на каждом временном шаге  $10^{-3}$ ; точность расчета уравнения Пуассона для поправки давления  $10^{-4}$ ; коэффициент нижней релаксации при расчете составляющих скорости равен 0,6.

## Алгоритмы аппроксимации и решения исходной системы уравнений

Решение плоской задачи явилось причиной выбора полярной системы координат, в которой записано обобщенное дифференциальное уравнение. Вопрос обеспечения оптимальной дискретизации расчетной области [8] является одним из важных для численной реализации расчетных алгоритмов, основанных на применении конечно-разностных методов. Здесь используется дивергентная форма записи исходных уравнений. Исходя из этого, применяется так называемый метод контрольного объема (КО) расчета обтекания и теплоотдачи мембранного пучка труб (см. рис. 1, а, б). Разбив расчетную область таким образом, обобщенное дифференциальное уравнение интегрируется по каждому (КО), где при вычислении интегралов используются кусочные профили определенной структуры, описывающей изменение переменной  $\Phi$  между узлами, которые определяют порядок точности разностной аппроксимационной схемы. В результате получается дискретный аналог дифференциального уравнения, в который входят значения переменной  $\Phi$  в нескольких соседних узлах. Свойства метода (КО) детально описаны в монографии [9]. Разностная схема, основанная на этом методе, консервативна по массе, количеству движения и энергии. Из этого следуют гарантия получения достаточно точных и физически обоснованных результатов расчета даже на относительно грубых сетках и экономия времени счета. Весьма важен и принцип построения сетки в расчетной области, так как он позволяет точно записать дискретные схемы уравнения неразрывности; точно рассчитать продольные и поперечные градиенты давления в уравнениях количества движения; точно определить конвективные потоки для КО, охватывающих «основные» узлы; корректно задать граничные условия на стенке. Исходя из перечисленных достоинств, выбираем сетку второго типа – полярную [9]. Построив КО для переменной  $\Phi$ , выбираем аппроксимационную противопоточную схему Леонарда [10], которая значительно проще алгоритмируется.

При решении разностных уравнений любое из них разделяют на две части: конвективно-диффузионную и источниковую, так как источниковая часть мало влияет на устойчивость и сходимость процесса численного решения. В общем случае, разностный аналог конвективно-диффузионного уравнения имеет вид [10]:

$$\Phi_P = a_N \Phi_N + a_E \Phi_E + a_S \Phi_S + a_W \Phi_W + a_{NN} \Phi_{NN} + a_{EE} \Phi_{EE} + \dots + v_\Phi, \quad (1)$$

где  $\Phi = u, v, T$ ;  $a_N, a_E, a_S, \dots$  – коэффициенты, определяемые способом нахождения конвективных и диффузионных потоков через грани КО;  $v_\Phi$  – источниковая часть разностного уравнения. Уравнение (1) решаем прогонкой по радиальным линиям сетки с использованием метода обращения трехдиагональной матрицы ТДМА.

Одна из основных трудностей при численном интегрировании уравнений Навье-Стокса – расчет поля давлений. Преодолевается она при расчете вязких несжимаемых жидкостей прямым решением уравнения Пуассона

$$\Delta p = s_p, \quad (2)$$

где  $s_p$  – источниковый член. После чего решается уравнение Пуассона для поправки давления и используется процедура SIMPLE (см. блок-схему в работе [9]). При решении уравнения Пуассона для поправки давления  $\delta p_p$  применяем прогон-

ку по радиальным линиям сетки, используя метод ТДМА до тех пор, пока не получим сходящееся решение, что в программе [4] составляет внутренний итерационный цикл. Детализация решения представлена в [10].

При решении тепловой задачи расчет производится для обычной температуры  $T$ , а не для преобразованной. В силу этого никаких дополнительных источников в уравнении энергии не возникает. Безразмерная температура  $\theta$  требуется только для коррекции входной среднemasсовой температуры для реализации периодических граничных условий. Помимо итерационного решения уравнений Навье-Стокса и уравнения для поправки давления, в процедуру глобальных итераций решения задачи входят дополнительные итерационные циклы.

Применение многоблочного алгоритма для моделирования ламинарного режима течения несжимаемой вязкой жидкости и теплообмена в мембранном регулярном коридорном пучке круглых труб связано с возможными сопоставлениями рассчитанных локальных тепловых и динамических потоков по поверхности удаленной трубы пучка с экспериментальными данными работ [1, 2].

### Анализ расчетов моделирования

Основные результаты моделирования получены для  $q$ -расчетной области, так как она позволила получить физически достоверные результаты из-за разделения потока мембраной, что предотвращает развитие нестационарного процесса вихреобразования в межтрубном пространстве.

Все расчетные данные по интегральным характеристикам течения выборочно (так как всех пучков 28) приведены в графическом исполнении для пучков  $s_1 = s_2$ : 1,25; 1,50; 1,8 и 2,0 на рис. 2. На этом рисунке (см. рис. 2а, 2б) зависимости  $C_x(Re)$  и  $C_{xp}(Re)$  имеют отличный от линейного характера распределения коэффициентов лобового сопротивления и составляющей  $C_{xp}$  от числа Рейнольдса для регулярных компоновок коридорных труб. Зависимость числа Эйлера от числа Рейнольдса  $Eu(Re)$ , представленная для указанных пучков труб по аэрогидравлическому сопротивлению (см. рис. 2, в), при варьировании числа Рейнольдса в пределах от 40 до  $10^3$  указывает на линейный регрессирующий характер  $Eu(Re)$  (в логарифмических координатах). Здесь  $Eu = 2\Delta p$ , где  $\Delta p$  – перепад давления между входной и выходной границами рабочей ячейки. Зависимости  $Eu(Re)$  количественно и качественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными или хорошо коррелируют [1, 2] с результатами расчетов, полученных различными методами [10, 11]. Из рис. 2в видно, что по мере разрежения пучка труб его аэрогидравлическое сопротивление уменьшается. Например, сопротивление пучка  $2,0 \times 2,0$  меньше сопротивления пучка  $1,25 \times 1,25$  на 43 %.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по аэрогидравлическим потерям в мембранных коридорных пучках труб подтверждает состоятельность разработанного вычислительного комплекса программ [4]. Наличие мембран между цилиндрами приводит к тому, что для всех рассмотренных компоновок труб для данного диапазона изменения числа  $Re$  от 40 до  $10^3$  реализуются в режимах блокировки течения между последовательными цилиндрами, расположенными по горизонтали, т.е. возникают отрывные зоны и занимают про-

странство между ними с отрывом потока на предыдущем цилиндре и присоединением его на последующем, с образованием вихрей. На рис. 1, в представлена графическая информация в виде картины течения. Течение жидкости между горизонтальными рядами цилиндров и панелей можно отнести к каналному типу. Влияние плотности цилиндров сказывается на динамике вихревых структур в циркуляционных зонах.

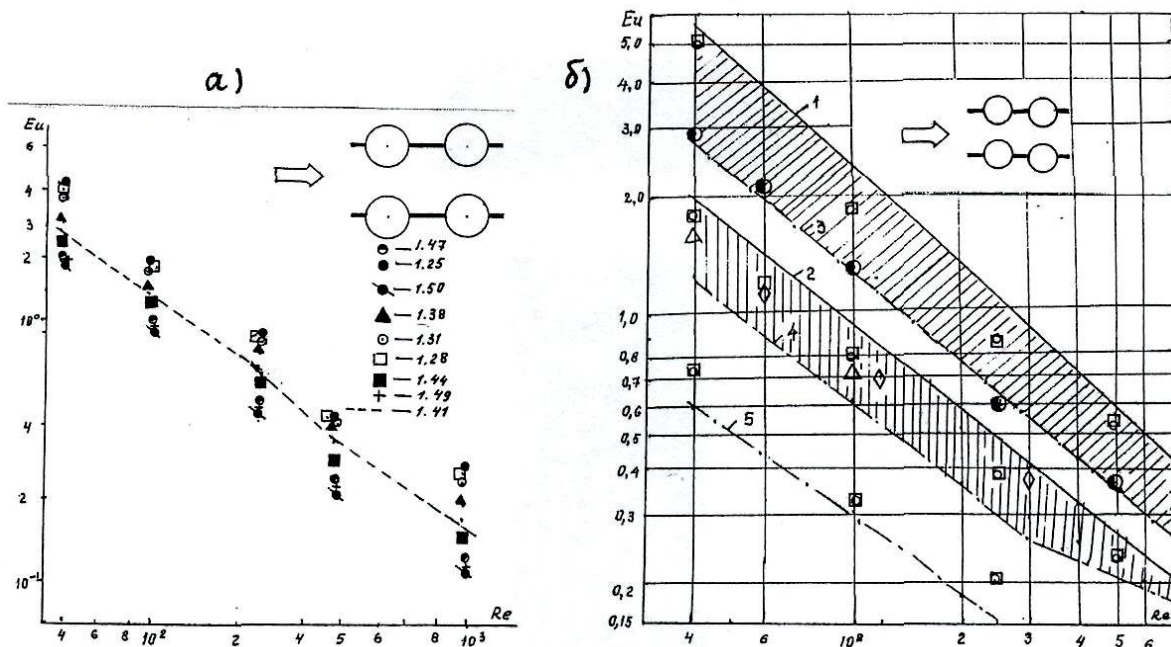


Рис. 2. Влияние числа Рейнольдса на число Эйлера:

а – зависимость  $Eu = f(Re)$  для мембранных пучков различной плотности;

б – зависимость  $E = f(Re)$  для регулярных мембранных пучков: 1,25; 1,50 и 2,0.

Анализ развития с ростом числа  $Re$  температурных полей в регулярных мембранных коридорных пучках различной плотности позволяет сделать вывод о тенденции к нагреву жидкости (воздуха) в пределах отрывной зоны. В ядре потока температурное поле в продольном направлении выравнивается, приобретая слоистый характер. Количественная и качественная зависимости распределения местного числа Нуссельта на поверхности трубы регулярных мембранных пучков приведены на рис. 3а, 3б.

Следует отметить, что проведенный анализ расчетов результатов моделирования течения и теплоотдачи коридорных регулярных мембранных пучков и сравнение распределений поверхностного давления, трения и относительного теплового потока позволяет глубже исследовать динамику гидродинамических и тепловых процессов с ростом числа  $Re$ . При анализе обнаружена топологичность профилей указанных характеристик, несмотря на количественные различия. Независимо от  $Re$  и плотности пучков в области отрыва потока за цилиндром образуется зона разрежения с локальным минимумом на тыльной стороне в окрестности точки отрыва. Локальный максимум давления реализуется в точке присоединения потока, а по мере приближения к передней критической точке давление падает. С ростом  $Re$  для всех исследованных пучков наблюдается тенденция к выравниванию давления на передней и задней сторонах цилиндра. Число  $Re$  влияет

на трение обычным образом, т.е. с увеличением  $Re$  уровень трения монотонно уменьшается.

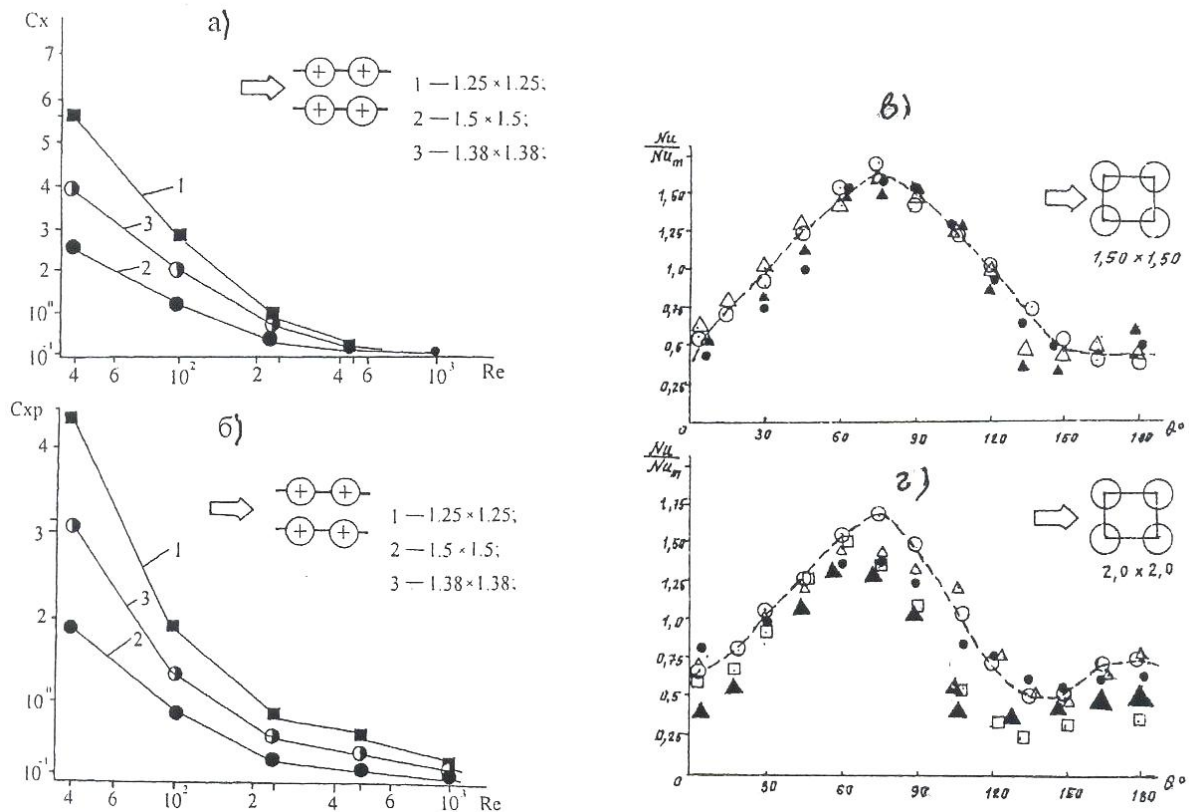


Рис. 3. Зависимости  $C_x$  и  $C_{xp}$  от числа  $Re$  (а-б) и распределение местного числа Нуссельта (в-з).

Профили относительных тепловых потоков по контуру цилиндра оказываются согласованными с профилями напряжения трения. Наибольшие значения  $Nu/Nu_m$  соответствуют экстремумам трения.

### Заключение

Моделируя процесс течения и теплоотдачи в мембранном коридорном регулярном пучке круглых труб, анализируя численные результаты рассмотренного процесса, можно сделать выводы, свидетельствующие о том, что разработанный вычислительный алгоритм является достаточно эффективным и позволяет с высокой степенью точности моделировать сложные динамические и тепловые процессы, развивающиеся в межтрубном пространстве и мембранном пучке; сравнительный анализ расчетных результатов данной работы с результатами работы [10] дает возможность прогнозировать допустимость применения сетки, более грубой по сравнению с используемой здесь.

Для наиболее корректного расчета теплоотдачи мембранного пучка труб необходимо решать сопряженную задачу. Целесообразность моделирования подобных задач исследования мембранных конвективных поверхностей нагрева актуальна в связи с применением результатов расчетов для постройки пароперегревателей, используемых как в котлостроении, так и тепловых устройствах, эконо-

мичных в экологических аппаратах очистки нефти и газа при переработке и добыче нефти.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Локишин В.А., Лисейкин И.Д., Аронов Д.И.* Исследование и расчет теплоотдачи и аэродинамических сопротивлений мембранных коридорных пучков труб // Теплоэнергетика. – 1975. – № 11. – С. 75-77.
2. Конвективный теплообмен и температурный режим мембранного экономайзера / А.Ю. Вески, А.И. Гольдберг, А.М. Копелиович, В.В. Марченков // Энергомашиностроение. – 1979. – № 12. – С. 9-11.
3. *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. – Т.11, № 1. – С. 87-106.
4. *Костенко А.В.* Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613241 «Трубные пучки». – М.: 04.09.06.
5. *Костенко А.В.* Использование алгоритмической блок-схемы при расчете аэродинамического сопротивления и теплоотдачи мембранного коридорного пакета труб. – М., 1998. – 32 с. – Деп. в ВИНТИ 29.02.88. – № 1628-В88.
6. *Костенко А.В.* Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612330 «Корреляция Эйлер-Нуссельт». – М.: 04.07.07.
7. *Костенко А.В.* Построение корреляционных зависимостей с использованием рядов и комплексного преобразования Фурье в исследовании течения и теплообмена в круговых пучках труб // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. – 2007. – №3. – С. 103-107.
8. *Костенко А.В.* Алгоритмы и программы численного моделирования неизотермического течения в элементах теплообменников // Информатика и системы управления. – 2008. – №1(15). – С.46-55.
9. *Пантакар М.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
10. *Белов И.А., Кудрявцев Н.А.* Теплопередача и сопротивление пакетов труб. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
11. *Жукаускас А.А.* Конвективный перенос в теплообменниках – М.: Наука, 1982.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Олейниковым.*