

В. А. Пронин<sup>1</sup>, А. В. Дозорцев<sup>2</sup>, В. Е. Тырин<sup>1</sup>

Московский энергетический институт (технический университет), Россия (1)

ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ», Москва, Россия (2)

## ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В МЕЖТРУБНЫХ КАНАЛАХ ГЛАДКОТРУБНЫХ ПУЧКОВ КОРИДОРНО-ДИФFUЗОРНОГО ТИПА\*

### АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты измерения локальных теплоаэродинамических характеристик на поверхности поперечно омываемых цилиндров (труб), составляющих компоновку пучков с межтрубными каналами диффузорного типа. Решение задачи существенного уменьшения аэродинамического сопротивления в таких пучках рассматривается как метод повышения энергетической эффективности при «прочих равных» условиях. Измеренные распределения статического давления, поверхностного трения и теплоотдачи по периметру цилиндров и по рядам труб свидетельствуют о формировании плоской струи с присоединёнными межтрубными вихрями.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность процессов переноса при течении и теплообмене в поперечно омываемых пучках зависит от многих факторов как режимных, так и геометрических. По этой причине разработку и исследование новых компоновок обычно осуществляют, используя множество подходов.

Существующие методики разработок (поиска) новых компоновок трубных пучков можно охарактеризовать двумя направлениями – «формальным» и «энергетическим».

К формальному направлению относится любой метод поиска, не связанный и не ставящий целью разработку физической модели течения и теплообмена в межтрубных каналах, содержащий только формальные оценки энергетической эффективности в разрабатываемой компоновке.

Известно, что для коридорных и шахматных пучков труб теплоотдача и сопротивление изменяются в широком диапазоне [1, 2, 3, 4].

Путем формального варьирования значений геометрических характеристик пучков труб и параметров теплоносителей в работе [5] проведена оптимизация трубных коридорных и шахматных компоновок пучков цилиндров. В работах [6, 7] проведён формальный экспериментальный поиск эффективных компоновок трубных пучков путем создания сверхтесных шахматных гладкотрубных пучков. В результате показана возможность повышения энергетической эффективности шахматной компоновки путём уменьшения эквивалентного диаметра проходного сечения.

К формальному направлению поиска можно отнести также простой перебор различных вариантов компоновок, механическое заполнение ограничен-

ного объема трубами пучка [8] и т.п. Например, в [9] поиск эффективной компоновки гладкотрубного пучка выполнен путем поворота треугольника шахматной разбивки на определенный угол (по отношению к направлению потока воздуха).

Многие исследователи, осуществляя перебор вариантов, модифицируют геометрию традиционных компоновок [9, 10].

Другое направление, энергетическое, связано с разработкой физической модели течения в межтрубных каналах пучков. Для создания физической модели проводятся теплофизические исследования локальных и средних характеристик процессов течения и теплообмена.

Постановка задачи повышения энергетической эффективности и синтеза трубных поверхностей теплообмена при таком подходе включает разработку физической модели течения и теплообмена, применение методов интенсификации теплообмена при течениях в межтрубных каналах, проводится оценка энергетической эффективности теплоаэродинамических процессов.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

#### 2.1. Результаты экспериментов

На рис. 1 представлена схема конструкции экспериментальных пучков, основу которых составляет семеридный коридорный пучок с возможностью поворота продольных рядов труб вокруг оси первых труб каждого ряда. При фиксированных прочих геометрических характеристиках пучков угол поворота рядов является характеристикой степени расширения (диффузорности) коридорно-диффузорных пучков.

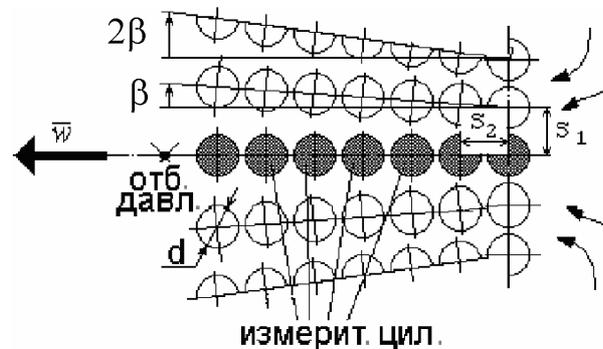


Рис. 1. Схема конструкции экспериментальных пучков

\* Работа выполнена по гранту Совета по поддержке научной школы НШ-5020.2006.8.

Описание конструкции измерительных элементов локальных характеристик – теплоотдачи, поверхностного трения, статического давления представлено в [11].

Продувки экспериментальных пучков осуществлялись при различных степенях расширения:  $\beta = 0^\circ$  (коридорный пучок,  $a \times b = 1,065 \times 1,065$ );  $\beta = 0,5^\circ$ ;  $\beta = 1^\circ$ ;  $\beta = 5^\circ$ ;  $\beta = 10^\circ$  (коридорно-диффузорные пучки); диапазон чисел  $Re = (10 \div 100) \cdot 10^3$ .

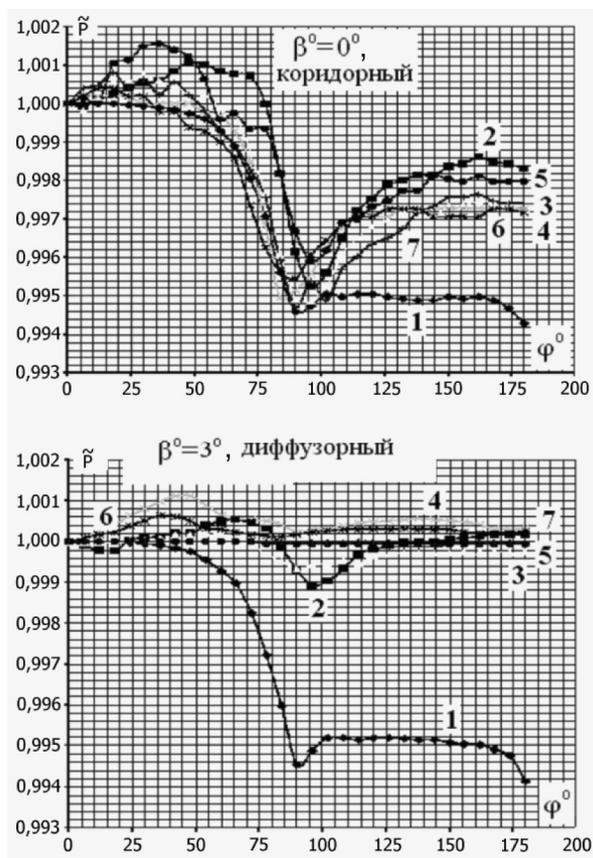


Рис. 2. Распределение статического давления по периметру цилиндров коридорного и диффузорного пучков: 1÷7 – номера рядов труб

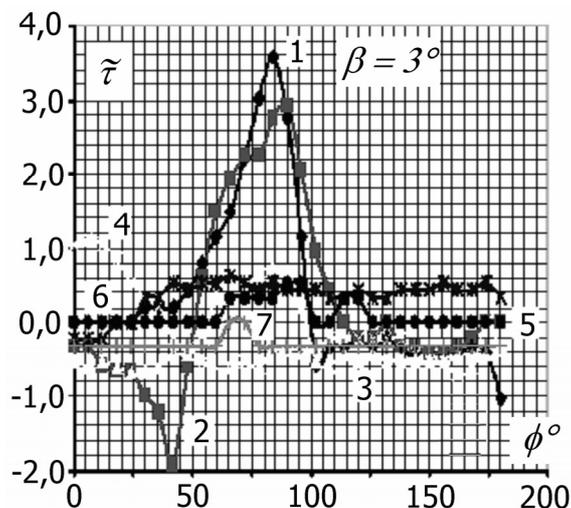


Рис. 3. Распределение поверхностного трения по периметру и по рядам труб диффузорного и коридорного пучков

На рис. 2 и 3 представлены результаты измерения локальных аэродинамических характеристик — распределений статических давлений и поверхностного трения. По представленным данным можно заключить следующее: распределение указанных характеристик имеет немонотонный характер с типичными максимумами и минимумами.

Для коридорного пучка по рисункам можно увидеть отрыв потока при  $\varphi \sim 96^\circ$  ( $\tau \rightarrow 0$ ) для первого по ходу воздуха цилиндра и застойную зону при  $\varphi \sim 96 \div 144^\circ$  ( $\tau \rightarrow 0$ ). Для диффузорного пучка аналогичная картина изменяется, в частности отрыв потока с первого цилиндра происходит уже при  $\varphi \sim 150^\circ$ , а статическое давление вокруг поверхности второго цилиндра практически постоянно.

Рассмотренные характеристики позволяют сделать вывод о том, что для диффузорного пучка на первом цилиндре отсутствует застойная зона, т.к. имеет место более поздний отрыв с первого цилиндра. Кроме того, оторвавшийся поток взаимодействует с поверхностью нижележащих цилиндров высокоэнергетической двумерной областью смещения оторвавшегося потока. Таким образом, плоская струя, сформировавшаяся между трубами первого поперечного ряда пучка, свободно проходит вблизи следующих рядов труб по ходу воздуха. При этом в межтрубном пространстве отсутствуют крупномасштабные завихрения. Следовательно, потери энергии будут определяться только мелкомасштабной турбулентностью, т.е. уменьшаться.

Анализ взаимодействия присоединенных вихрей с поверхностью обтекаемых цилиндров можно провести, представив результаты измерения локальной теплоотдачи в виде зависимости от числа Рейнольдса (см. рис. 4):

$$\frac{Nu_\varphi}{Nu} = C \cdot Re_d^m.$$

На этих рисунках в логарифмических координатах нанесена также сетка в виде линий, соответствующих двум показателям степеней  $m = 0,5$  и  $m = 0,8$ . По рисункам при  $\beta = 2^\circ$ , 3-й ряд и  $\beta = 2^\circ$ , 5-й ряд следует отметить наибольшее значение теплоотдачи в области присоединения оторвавшегося потока ( $\varphi = 40 \div 60^\circ$ ). Показатель степени  $m \geq 0,5$  при  $Re_d = (20 \div 60) \cdot 10^3$ . Эта тенденция наблюдается и для 5-го ряда. При  $Re_d > 60 \cdot 10^3$  показатель степени  $m \geq 0,8$ , что свидетельствует о существенной турбулизации течения.

В области отрыва потока ( $\varphi = 120 \div 140^\circ$ ) локальная теплоотдача имеет наименьшие значения и общая тенденция увеличения показателя степени  $m$  с возрастанием  $Re_d$  сохраняется и для кормовой области цилиндров. Аналогичную картину можно увидеть и для коридорного пучка (см. рис. 5), где также сохраняется показатель степени  $m \sim 0,8$ .

Полученные результаты и их анализ свидетельствуют о формировании течения в виде присоединенных вихрей с характерными точками отрыва и присоединения, между которыми формируется теп-

ловой пограничный слой, нарастающий по течению циркулирующего теплоносителя.

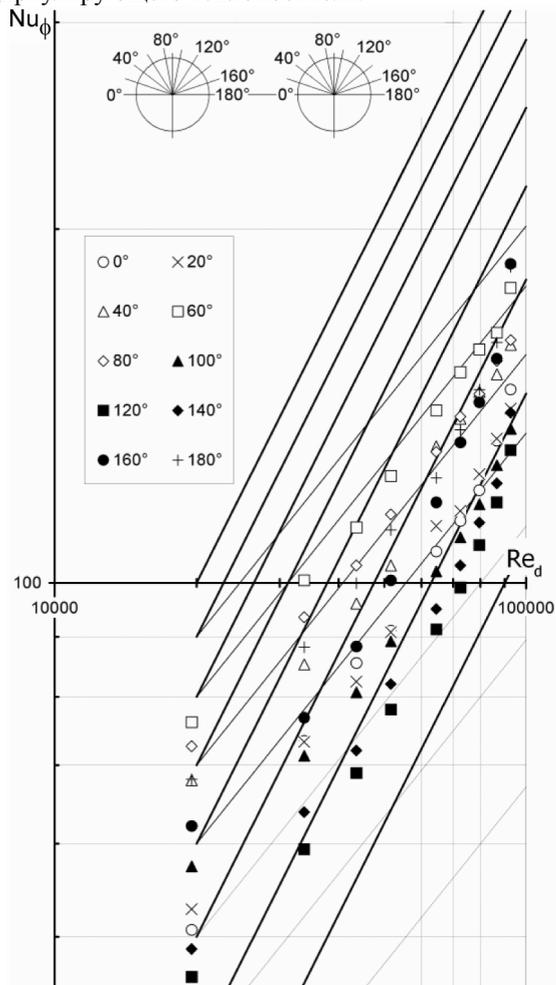


Рис. 4. Локальная теплоотдача коридорно-диффузорного пучка,  $\beta = 2^\circ$ , 5-й ряд

Очевидно, что как при увеличении скорости течения струи в межтрубных диффузорных каналах, так и при организации диффузорного течения происходит повышение степени турбулентности, которая поддерживается на первоначальном уровне и поддерживает уровень средней теплоотдачи.

Рассматриваемая картина формируется в условиях «работы» присоединенных вихрей со средним положительным градиентом давления. При этом область смещения, т.е. область взаимодействия присоединенного вихря и основного потока, в значительной степени неустойчива. Это значит, что обновление вихрей с частотой Струхала в условиях положительного градиента давления происходит с повышением уровня турбулентности. Кроме того, формирование отрывного течения в первом ряду диффузорной компоновки приводит к синхронизации частот автоколебательного процесса в межтрубных полостях нижележащих рядов труб.

Причину снижения аэродинамического сопротивления диффузорных пучков, отмеченного в [12], можно увидеть на рис. 6. Распределение равнодействующей силы давления по рядам труб пучка показывает, что полное аэродинамическое сопротивление

ние всего пучка определяется первыми рядами труб. Кроме того, для второго ряда равнодействующая сил давления стремится к минимуму как для исходной коридорной компоновки, так и для диффузорных пучков.

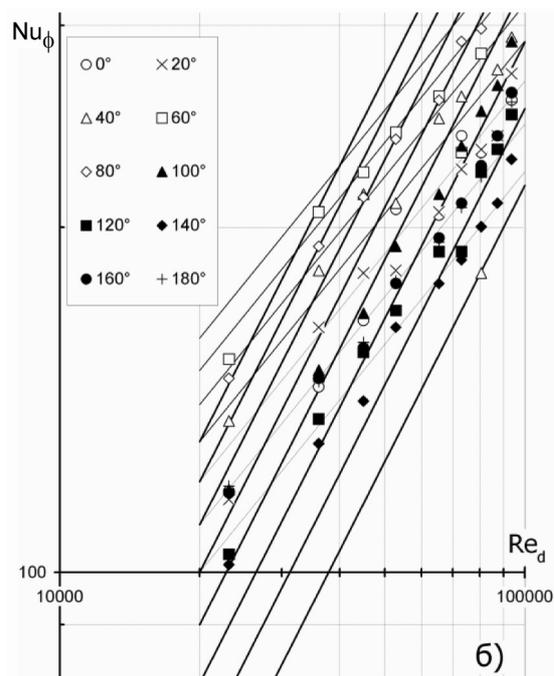
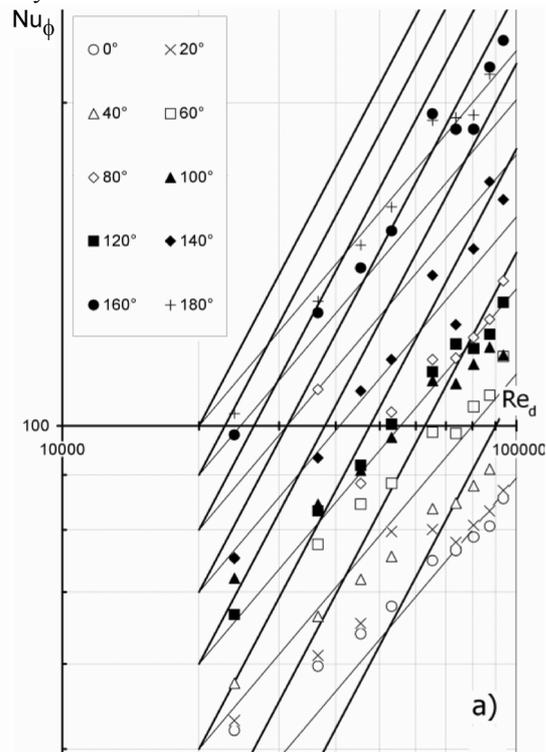


Рис. 5. Локальная теплоотдача коридорного пучка,  $\beta = 0^\circ$ ; а – первый ряд труб; б – второй ряд труб

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс экспериментальных исследований локальных теплоаэродинамических характеристик позволяет существенно улучшить энер-

гетические характеристики поперечно омываемых пучков труб.

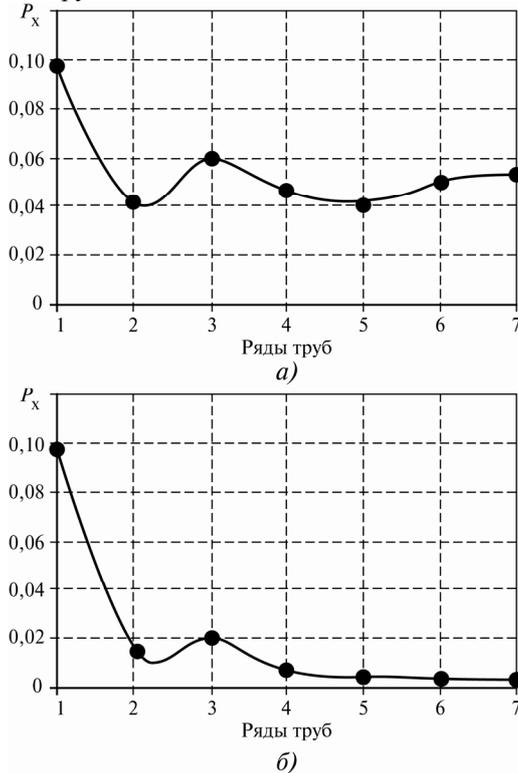


Рис. 6. Распределение равнодействующей силы давления по рядам труб пучка: а – коридорный пучок  $\beta = 0^\circ$ ; б – коридорно-диффузорный пучок  $\beta = 1^\circ$

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $s_1, s_2$  – поперечный и продольный шаги пучка, м;  
 $d, L$  – диаметр и длина несущей трубы, м;  
 $\varphi$  – угол отсчета от лобовой критической точки цилиндра, град;  
 $\alpha$  – коэффициент локальной и средней теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\bar{p} = (p_0 - p(\varphi)) / (p_0 - p(\varphi = 0))$  – коэффициент давления;  
 $p_0$  – давление перед трубой, Па;  
 $p$  – местное давление на поверхности трубы, Па;  
 $Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot w^2}$  – число Эйлера;  
 $Re = \frac{w \cdot d}{\nu_{ж}}$  – число Рейнольдса;  
 $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{ж}}$  – число Нуссельта;  
 $Sh = \frac{f \cdot d}{w}$  – число Струхаля;  
 $f$  – частота колебаний;  
 $\tau$  – касательное напряжение.

$$P_x = \sum_{\varphi=0}^{360} \tilde{P}(\varphi) \cdot \cos(\varphi) - \text{равнодействующая сила давления.}$$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Н. В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973.
3. Аэродинамический расчет котельных установок. Нормативный метод / Под ред. С. И. Мочана. Л.: Энергия, 1977.
4. Кейс В. М., Лондон А. Л. Компактные теплообменники. М.: Энергия, 1967. 224 с.
5. Калафати Д. Д., Попалов В. В. Оптимизация теплообменников по эффективности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Величко В. И., Коваленко Н. А., Пронин В. А. Теплоотдача, аэродинамическое сопротивление, энергетическая эффективность в супертесных поперечно обтекаемых гладкотрубных пучках шахматной компоновки // Тр. Первой Российской национальной конференции по теплообмену. 1994. Т. 8.
7. Пронин В. А., Клевцов А. В., Лавров Д. А., Косолапов Д. М. Повышение энергетической эффективности плоских сеточно-ребристых каналов // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Издательство МЭИ, 1998.
8. Аэродинамические сопротивления поперечно омываемых пучков труб с неравномерными шагами / В.А. Локшин, В. Н. Фомина, Е. Н. Ушаков, Б. А. Агресс // Теплоэнергетика. 1976. № 12. С. 30–34.
9. Евенко В. И., Анисин А. К. Повышение эффективности теплоотдачи поперечно обтекаемых пучков труб / Теплоэнергетика. 1976. №7. С. 37–40.
10. Основы расчёта и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш и др.; Под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
11. Пронин В. А. Измерение гидродинамических характеристик и теплоотдачи в тесных поперечно обтекаемых трубных пучках. Энергетически эффективный способ размещения труб в пучке: Дис.... канд. техн. наук. М., 1989.
12. Григорьев Б. А., Пронин В. А., Дозорцев А. В. Улучшение теплоаэродинамических характеристик поперечно обтекаемых пучков труб // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Издательство МЭИ, 1998.