

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
6.4. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

6.4.4. Разработка эффективных компоновок пучков труб воздушных конденсаторов нового поколения (ВКНП)

Клевцов А.В., Пронин В.А.; МЭИ(ТУ)

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. Большинство из этих подходов направлено на улучшение характеристик уже известных компоновок.

Направления исследований. Использование поперечно-омываемых трубных пучков в качестве поверхностей теплообмена накладывает определенные требования, предъявляемые к теплообменным поверхностям — теплообменная поверхность должна быть энергетически эффективной. В связи с этим, существующие методики разработок 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, а также не содержащий оценки энергетической эффективности процессов переноса импульса и тепла в разрабатываемой компоновке.

Известно, что для коридорных и шахматных, т.е. обычных, традиционных компоновок пучков труб в зависимости от шагов труб значения теплоотдачи и сопротивления изменяются в широком диапазоне [12, 13]. Общеизвестны также достоинства и недостатки обычных коридорных и шахматных компоновок пучков труб [12, 13]. Путем формального варьирования значений геометрических характеристик пучков труб и параметров теплоносителей проведена оптимизация трубных коридорных и шахматных пучков [14]. Здесь же представлена шкала распределения теплоносителей по эффективности теплообмена для шахматных и коридорных пучков.

К формальному направлению поиска можно отнести также простой перебор различных вариантов компоновок, корректировку обычных шахматных и коридорных компоновок, чисто техническое (механическое) заполнение ограниченного объема трубами пучка и т.п.

Например, в [15] поиск эффективной компоновки гладкотрубного пучка выполнен на основе шахматного расположения труб путем поворота треугольника шахматной разбивки (рис. 6.28, а) на определенный угол (по отношению к направлению потока воздуха). Проведенные эксперименты показали, что в промежуточных схемах обтекания труб пучка теплоотдача выше, а аэродинамическое сопротивление ниже в сравнении с шахматной компоновкой. Сопоставление исследуемых компоновок пучков при условии, что расход энергии на прокачку и переданный тепловой поток одинаковы, позволяет уменьшить массу и размеры теплообменной поверхности путем оптимальной ориентации пучка относительно направления потока теплоносителя. Аналогично, в [16] получены данные по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению смешанных коридорно-шахматных пучков (рис. 6.28, б) из оребренных труб. Анализ энергетической эффективности исследуемых

компоновок показал, что эффективность оребренного пучка может быть повышена изменением направления набегающего потока на пучок. Установлено также существование максимума энергетической эффективности теплоотдачи в переходном коридорно-шахматном пучке оребренных труб.

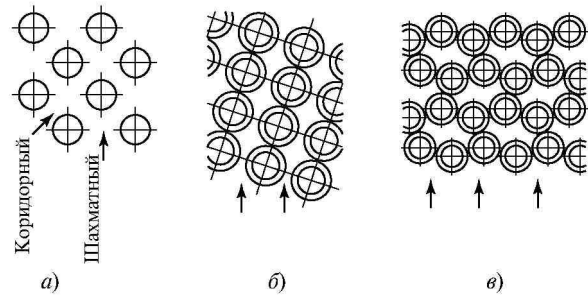


Рис. 6.28. Эффективные компоновки пучков труб (формальное направление)

Многие исследователи, осуществляя перебор вариантов, модифицируют геометрию традиционных компоновок. В результате этого появляются компоновки, принципиально близкие к традиционным, т.е. шахматным и коридорным. Так, в [17] предлагается компоновка зигзагообразного пучка (рис. 6.28, в) для аппарата воздушного охлаждения (АВО). Такая конструкция пучка получается из шахматной равносторонней компоновки путем преобразования прямых поперечных рядов в зигзагообразные при смещении труб по продольной оси в направлении движения воздуха на определенную величину. В зигзагообразных пучках отмечается интенсификация теплоотдачи с одновременным повышением сопротивления пучка. При определенных значениях геометрических соотношений прирост теплоотдачи опережает увеличение сопротивления по сравнению с равнопроходным исходным шахматным пучком. Зигзагообразный пучок сжимается с боковых сторон в «гармошку», увеличивается площадь сжатого проходного сечения при одновременном уменьшении фронтального. Это обеспечивает большее проходное сечение по воздуху, что позволяет удовлетворить невысокие допускаемые значения перепада давления воздуха. Разработанную в [17] зигзагообразную компоновку труб пучка следует рассматривать как модифицированную шахматную компоновку.

В [15—17] не рассматривается физическая рабочая модель процессов течения и теплообмена в межтрубных каналах. В них содержится только общефизический комментарий к полученным положительным результатам, связанным с энергетическим выигрышем. В связи с этим выбранный этими авторами путь поиска может привести к необходимости перебора бесконечного числа вариантов компоновок трубных пучков.

Существуют также поисковые формальные направления, связанные с возможностями технологии изготовления теплотехнических конструкций, содержащих трубный пучок в качестве поверхности теплообмена, разрабатываются пучки из оребренных труб эллиптические

ского профиля, необычными формами оребрения [18] и т.п.

Рассматриваемое формальное поисковое направление имеет объективную основу. Например АВО, производство которых начато в 30-х годах прошлого столетия, ориентированы на использование пучков оребренных труб с шахматной компоновкой. Проектировщикам необходимо было разработать воздухо-охлаждаемый пучок оребренных труб с компактной компоновкой, который бы имел пониженное аэродинамическое сопротивление. Такому требованию удовлетворяет шахматная компоновка с малым числом рядов труб (не более восьми рядов). В связи с этим разработки конструкций пучков труб для АВО остаются традиционно шахматными, привязанными к стандартной конструкции аппаратов. Однако именно при проектировании и эксплуатации оборудования возникают задачи, решение которых может дать энергетический выигрыш при работе теплотехнического устройства. При этом постановка задачи может содержать невыполнимые требования, поскольку применение новой компоновки предполагает внесение существенных конструктивных изменений.

Между тем известно, что коридорная компоновка отличается от шахматной гораздо меньшим значением аэродинамического сопротивления. Таким образом, используя достоинства коридорной компоновки труб пучка или ее модификации, можно увеличить число рядов труб, сохраняя прежнее аэродинамическое сопротивление. Такой упрощенный взгляд требует, конечно, анализа энергетической эффективности. Однако в плане постановки задачи исследования при разработке высокоэффективных трубных поверхностей теплообмена, выбор исходной позиции имеет важное значение.

Другое направление, энергетическое, связано с разработкой физической модели течения в межтрубных каналах пучков. При этом проводятся теплофизические исследования локальных характеристик процессов течения и теплообмена. Постановка задачи повышения энергетической эффективности и синтеза трубных поверхностей теплообмена включает разработку физической модели течения и теплообмена, применение методов интенсификации теплообмена в межтрубных каналах с оценкой энергетической эффективности теплоаэродинамических процессов.

Рассмотренные в [19—21] методы повышения энергетической эффективности в теплообменных каналах могут быть реализованы при разработке новых высокоэффективных компоновок пучков труб. В этом случае при разработке физической модели течения и теплообмена необходимо проводить анализ процессов обтекания не только отдельных цилиндров, но также анализировать крупномасштабные процессы в системе межтрубных каналов, образованных группами труб.

Интенсификация теплообмена обычно достигается посредством воздействия на пограничный слой. При этом форма поверхности теплообмена создает течение в каналах с благоприятной гидродинамической обстановкой, способствующей интенсификации теплообмена.

Методика, использованная при разработке интенсифицированных трубных поверхностей теплообмена, сводится к созданию перетеканий через межтрубные проходы, расположенные под некоторым углом к направлению движения теплоносителя. Реализация этого принципа осуществляется в виде системы прямоугольных зигзагообразных каналов. Проходы для теплоносителя образуются прямолинейными элементами (группами труб), кото-

рые располагаются под некоторым углом к первоначальному направлению движения потока и находятся на определенном расстоянии один от другого.

Теплоноситель, протекая по межтрубным каналам, образованным трубными рядами, последовательно омывает вихревые полости и конфузур. Это еще один из методов интенсификации процесса теплообмена. В [22] приведены экспериментальные результаты по теплообмену и сопротивлению при движении воздуха по каналу с вихревыми полостями. Повышение интенсивности теплообмена при умеренном росте сопротивления достигается в рассматриваемом случае при организации течения в поле продольных знакопеременных градиентов давления. Эта идея конструктивно обеспечивается выполнением канала в виде последовательно чередующихся плоских прямолинейных диффузоров и конфузур. Повышенный уровень турбулентности потока, генерируемой в диффузорах, полезно используется в расположенных за ними конфузорах. При этом средняя интенсивность теплообмена в конфузорах может оказаться выше, чем в диффузорах. В вихревых полостях образуются стоячие вихри, приводящие к уменьшению вихреобразования во внешнем течении и, следовательно, диссипации энергии вниз по потоку. Вихревые полости со стоячими вихрями выполняют функции диффузоров малой протяженности и оказывают влияние на поток при входе его в конфузур. Для суждения о гидродинамике потока, в работе [22] была проведена визуализация процесса течения. За серповидными выступами образуются стоячие вихри. Поток обтекает вихрь, достигает стенки, а затем разделяется на два течения, одно из которых направлено в зону вихря, а другое — по конфузору. Сравнение данных по теплообмену и сопротивлению для таких каналов показало повышение их энергетической эффективности.

Таким образом, если рассматривать поперечно обтекаемый трубный пучок как систему смежных каналов, то в этом случае может быть реализована идея повышения энергетической эффективности теплообменной системы путем создания в потоке неоднородности давления, а также формирования замкнутых вихревых областей.

Синтез эффективных компоновок трубных пучков. Разработка компоновок трубных пучков, в которых реализуются методы интенсификации конвективного теплообмена, проводится на основе данных о локальных

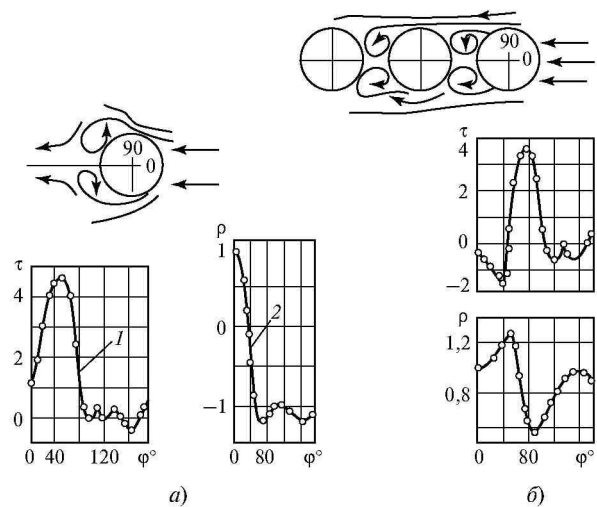


Рис. 6.29. Схематическое изображение картины обтекания цилиндра (а) и системы цилиндров (б) по результатам наблюдений: кривая 1 — распределение статического трения; кривая 2 — то же трения

теплоаэродинамических характеристиках на поверхности теплообмена. С учетом экспериментальных данных по теплоаэродинамическим характеристикам при обтекании отдельной трубы [12, 13] и группы (системы) труб [15], путем формирования межтрубных каналов в потоке создаются неоднородности давления. В межтрубных полосах формируются присоединенные вихри (рис. 6.29), что, как известно, может привести к повышению энергетической эффективности теплообменной системы.

Для отдельного продольного ряда труб, при их обтекании теплоносителем, существует критическое значение продольного шага $b = 3,8$ [13], которое определяет две картины течения. При больших продольных шагах, т.е. при $b > 3,8$ может существовать сход вихрей с каждого из двух цилиндров в отдельности. В этом случае наблюдается синхронизация частот [13] вихреобразования, т.е. число Струхалия имеет одно значение для пары цилиндров. Присоединение оторвавшегося потока происходит в области передней критической точки нижележащего по течению цилиндра, имеет место только один p_{\max} — максимум статического давления в этой области. При значениях $b \leq 3,8$, т.е. при докритических значениях b , наблюдается картина без схода крупномасштабных вихрей из межтрубной области. При этом между трубами продольного ряда образуются замкнутые циркуляционные вихревые полости. В указанном диапазоне продольных шагов группы труб в виде отдельного продольного ряда вихревая дорожка Кармана не образуется. Это связано с механизмом схода вихрей, работоспособность которого предполагает наличие свободного межтрубного пространства. В рассматриваемом случае не образуется крупномасштабное вихреобразование внешнего течения, т.е. отсутствуют «бесполезные» потери энергии на прокачку теплоносителя.

Для двух поперечно расположенных рядом цилиндров при относительных шагах наблюдается независимый

$$a = \frac{s_1}{d} \geq 1,5$$

сход вихрей с каждого цилиндра, т.е. мало взаимное влияние цилиндров одного на другой. В этом случае отдельные продольные ряды труб ведут себя независимо, т.е. при обтекании их потоком теплоносителя не будет схода вихрей с поверхности цилиндра.

Из продольных трубных рядов с числом труб $Z_2 \geq 2$ в каждом можно сформировать трубные пучки как из гладких, так и оребренных труб. При этом можно формировать межтрубные каналы конфузорного и диффузорного типа, малорядные и многорядные пучки труб.

Течение и теплообмен в разрабатываемых пучках организуется следующим образом. При поперечном обтекании продольных рядов труб формируются отрывные области в межтрубном пространстве. При $b \leq 3,8$ оторвавшийся от поверхности цилиндра поток присоединяется к поверхности нижележащего цилиндра в двух точках. Возникшая циркуляция между трубами (присоединенная пара вихрей) испытывает периодические воздействия поперечных пульсаций давления. Из полости периодически, с определенной частотой f (Гц), вырывается масса теплоносителя, взаимодействие которой с основным потоком приводит к турбулизации течения [24]. Как отмечается в [25], энергетический спектр пульсаций давления имеет широкополосный характер (повышенный уровень турбулентности), на котором выделяются пульсационные пики колебаний вихревых областей. В [25] приведены экспериментальные результаты по определению

значений чисел Струхалия

$$Sh = fd/w,$$

где d , м, и w , м/с, — соответственно диаметр цилиндра и скорость обтекания.

Первые исследования локальных теплоаэродинамических характеристик [26—28] проводились при компоновке трубного пучка в виде спаренных групп гладких труб по типу «конфузор-диффузор» и «извилистый» [27]. Пара труб, которая использовалась в компоновке, как известно [13, 29, 30], может существенно уменьшить аэродинамическое сопротивление трубного пучка, поскольку расположенные один за другим цилиндры в паре обтекаются без крупномасштабного образования вихрей.

Геометрические соотношения, т.е. продольные и поперечные шаги труб пучка, различные смещения Δ пар цилиндров (степень диффузорности и конфузорности) выбирались исходя из рассмотренных выше положений. Средний относительный поперечный шаг гладких труб ($D = 30,85$ мм) пучка из тандемных пар — $S_1 = 2,0$; относительный продольный шаг — $S_2 = 1,1$; смещение пар цилиндров $\Delta = 0$ (коридорный пучок труб); $\Delta = 0,5R$; $\Delta = R$; $\Delta = 1,5R$.

Исследования физической картины течения и теплообмена проводились на основе экспериментальных данных по распределению локальных и средних теплоаэродинамических характеристик вдоль периметра цилиндров.

Эксперименты с гладкотрубными пучками включали измерения:

- поверхностного трения (методом выступающей планки);
- статического давления (отбором статического давления);
- теплоотдачи (электрокалориметром при $q = \text{const}$).

На рис. 6.30, а представлены схемы исследуемых гладкотрубных компоновок конфузорно-диффузорного и извилистого типов из спаренных цилиндров. Проведенная в гидротомке визуализация течения показала, что при течении в межтрубном пространстве конфузорно-диффузорного пучка образуются крупномасштабные вихри. В извилистой компоновке аналогично можно увидеть вихри, но более мелкие, что приводит к уменьшению гидродинамического сопротивления.

Анализ энергетической эффективности показал, что разрабатываемые пучки эффективнее коридорных и шахматных при прочих одинаковых условиях (рис. 6.30, б). Это означает, что из отдельных трубных групп можно составить параллельные межтрубные каналы, организующие течения с поперечными перепадами давления. Кроме того, межтрубные вихревые области работают как турбулизаторы течения [12], т.е. поддерживают повышенный уровень турбулентности потока, омывающего систему труб.

Дальнейшие исследования [28] показали возможность повысить энергетическую эффективность конфузорно-диффузорных пучков из спаренных труб путем смещения четных продольных рядов труб по направлению течения теплоносителя (рис. 6.30, в). При этом выявилась промежуточная компоновка с повышенной энергетической эффективностью, по сравнению с остальными.

Визуализация течения в каналах исследованных компоновок из спаренных цилиндров с промежуточными компоновками [28] также показала их недостатки, т.е. наличие крупномасштабного вихреобразования. Уменьшение масштабов вихрей приводит к уменьшению поте-

ри энергии на прокачку потока, т.е. к снижению аэродинамического сопротивления.

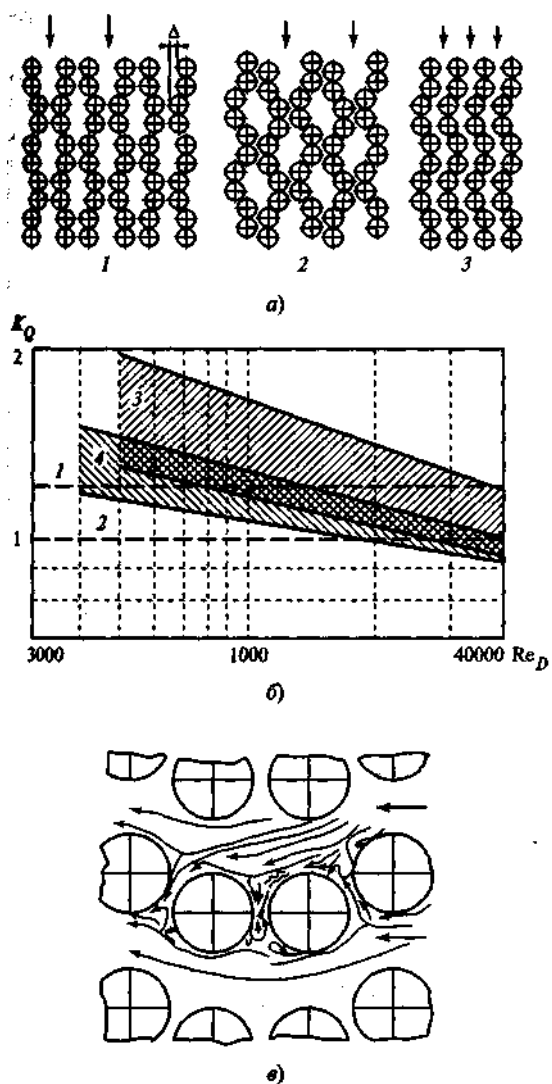


Рис 6.30. Компоновки из спаренных гладких цилиндров:
a — схемы компоновок (1 — конфузорно-диффузорного, 2 — промежуточного, 3 — извилистого типов);
б — энергетическая эффективность KQ компоновок (1 — шахматная, $a/b = 2/1,1$; 2 — коридорная, $a/b = 2/1,1$; 3 — конфузорно-диффузорная и извилистая, $\Delta = 1,5R$; 4 — $\Delta = 0,5R$ и $\Delta = 1R$); *в* — схема течения в межтрубных каналах извилистого пучка

Следствием этого может явиться повышение энергетической эффективности исследуемой компоновки пучка труб.

Рассмотрение локальных характеристик на поверхности обтекаемого цилиндра [12, 13], расположенного в пучке труб, позволяет выделить области конфузорного и диффузорного характера течения (лобовая и кормовая области). Такая картина обтекания, свойственная взаимодействию между отдельными цилиндрами, имеет масштаб, соответствующий диаметру цилиндров. В этом случае последовательно расположенные цилиндры с локальными конфузорами и диффузорами могут быть объединены средним течением диффузорного или конфузорного типа. Компоновка рядов труб по такому принципу позволяет наложить положительный крупномасштабный градиент давления на локальные градиенты при обтекании отдельных цилиндров. Как известно, в те-

чениях диффузорного типа интенсивность турбулентности усиливается [13]. В течениях конфузорного типа, наоборот (отрицательный градиент давления) турбулентность и возмущения подавляются. Сочленение диффузоров и конфузоров в систему последовательных каналов может улучшить теплообменные характеристики всего пучка труб.

Дальнейшие разработки пучков труб проводились на этой основе, т.е. модели течения и теплообмена в смежных каналах со стоячими вихрями и крупномасштабным положительным градиентом давления.

Исследования локальных теплоаэродинамических характеристик коридорно-диффузорных гладкотрубных пучков (рис. 6.31) с положительным градиентом давления проводились на модели шестирядного гладкотрубного пучка [31, 32]. Относительные поперечные a (на входе) и продольные b размеры шагов труб диффузорных пучков имели значения соответственно $a/b = 1,065/1,065$. Конфигурацию такого пучка можно получить путем поворота продольных рядов труб вокруг оси труб первого на определенный угол φ . При этом центры труб первого ряда могут располагаться на одной прямой линии (коридорный тип) или со смещением (шахматный тип). Программа локальных исследований соответство-

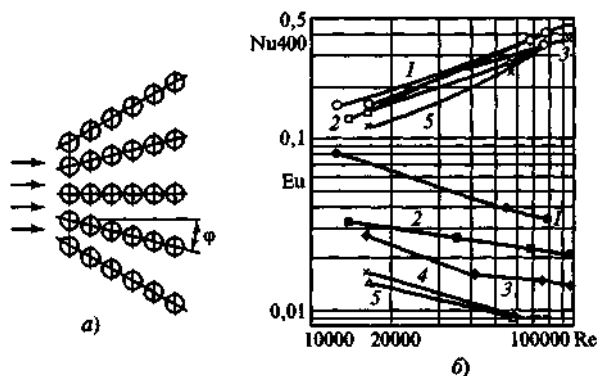


Рис. 6.31. Коридорно-диффузорный гладкотрубный пучок:
a — схема пучка; *б* — теплоотдача и аэродинамическое сопротивление:
 1 — $\varphi = 0$ (коридорный пучок); 2 — $\varphi = 0,5^\circ$;
 3 — $\varphi = 1^\circ$; 4 — $\varphi = 5^\circ$; 5 — $\varphi = 10^\circ$

вала программе для пучков из спаренных труб. На рис. 6.31 представлены результаты осредненных характеристик по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению, откуда видно, что аэродинамическое сопротивление существенно (пучка из спаренных труб до 5 раз) меньше, чем для обычного коридорного пучка. При этом теплоотдача снижается несущественно (до 25 %). Оценка энергетической эффективности по методу [35] «при прочих равных» дает существенное снижение мощности на прокачку теплоносителя (до 70 %).

Дальнейшие исследования проведены на шахматно-диффузорных и шахматно-конфузорных пучках из попеременно-оребрённых труб [33]. На рис. 6.32 представлена схема конструкции разрабатываемых пучков. В экспериментах измерялась приведенная теплоотдача методом локального теплового моделирования с охранными нагревателями. По полученным данным о средней теплоотдаче и аэродинамическом сопротивлении проводилась оценка энергетической эффективности по методу [34, 35] «при прочих равных».

Для конфузорного пучка из оребренных труб полученные результаты свидетельствуют о том, что уровень теплоотдачи значительно ниже, чем у диффузорного.

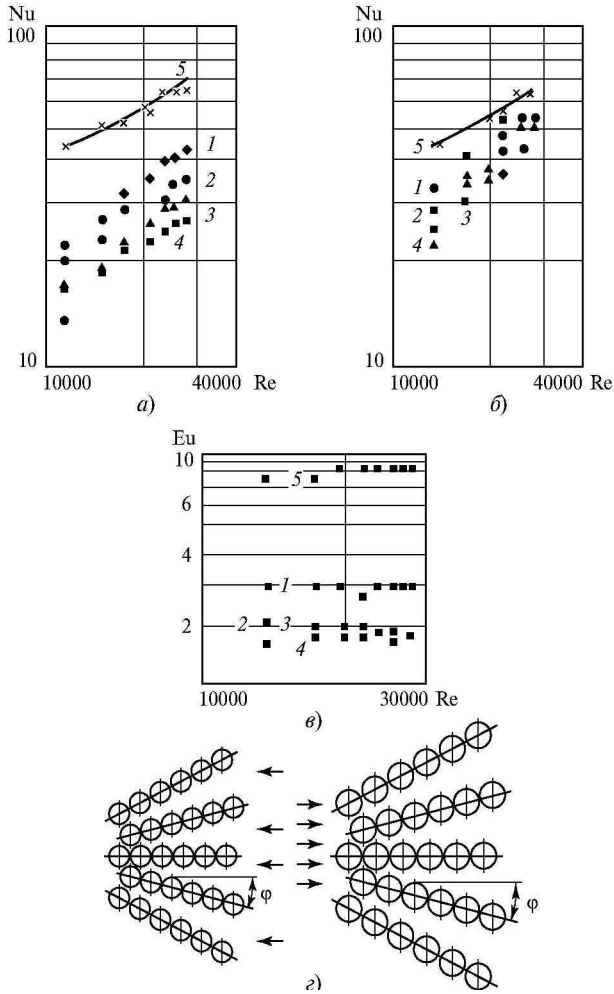


Рис. 6.32. Теплоаэродинамические характеристики пучков оребренных труб:

a — приведенная теплоотдача шахматно-диффузорного пучка; *b* — приведенная теплоотдача шахматно-конфузорного пучка; *в* — аэродинамическое сопротивление; *г* — схема компоновки; 1 — $\phi = 5^\circ$; 2 — $\phi = 10^\circ$; 3 — $\phi = 15^\circ$; 4 — $\phi = 20^\circ$; 5 — $\phi = 0$

При этом аэродинамическое сопротивление снижается в одинаковой степени, как у диффузорного пучка.

Естественно предположить, что, так как для конфузорного пучка свойственна более низкая теплоотдача, следовательно, происходит подавление турбулентности вследствие отрицательного градиента давления среднего течения. Поскольку аэродинамическое сопротивление снижается в одинаковой степени, то можно заключить, что крупномасштабного вихреобразования в пучках рассматриваемых типов не происходит. Анализ энергетической эффективности конфузорных компоновок показал неэффективность организации течения по конфузорному типу.

Таким образом, синтез трубных пучков с повышенной энергетической эффективностью как гладкотрубных, так и оребренных можно проводить, формируя плоские межтрубные каналы с ограничивающими поверхностями из трубных групп. На рис. 6.33 представлена схема компоновки и конфигурация синтезированной поверхности теплообмена в виде пучка труб со спирально-проволочным оребрением. Тепло-аэродинамические исследования проводились методом локального теплового моделирования для отдельных ярусов, т.е. для отдельных трубных групп (рис. 6.33). По полученным результатам сравнительной оценки значений коэффициентов теплопередачи и удель-

ной мощности на прокачку воздуха можно заключить, что энергетическая эффективность (рис. 6.34) синтезированной компоновки конфузорно-диффузорного воздухоохлаждаемого пучка ребристых труб Мод. 1 превосходит эффективность шахматного пучка Мод. 2. В частности можно отметить следующее.

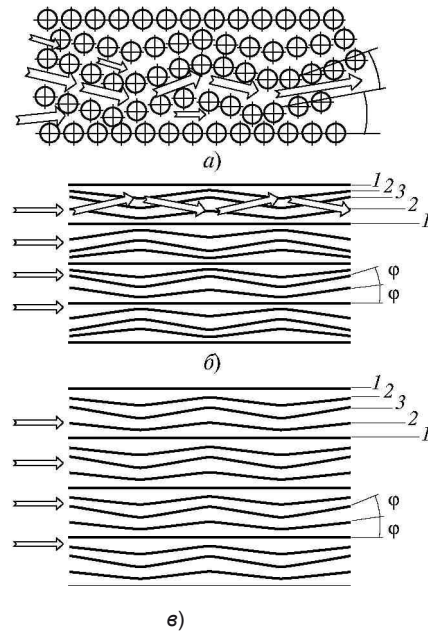


Рис. 6.33. Схема конструкции (*a*) и конфигурации (*б, в*) конфузорно-диффузорных пучков оребренных труб: 1—3 — ярусы рядов труб

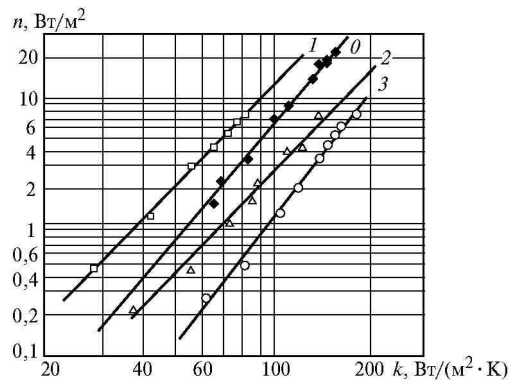


Рис. 6.34. Зависимость коэффициентов теплопередачи k от удельной мощности на прокачку воздуха — n для конфузорно-диффузорных пучков:

0 — шахматная компоновка; 1 — первый ярус; 2 — второй ярус; 3 — третий ярус

При одинаковой тепловой производительности трубного пучка Q , электрическая мощность N , необходимая для прокачки воздуха, может быть существенно уменьшена, по сравнению с исходным шахматным пучком так как $K_N = (N/N_0) = 0,55$. При одинаковых энергетических характеристиках с шахматным пучком (Q и $N = \text{idem}$) площадь поверхности может быть уменьшена, так как $K_F = 0,44$. Энергетическая эффективность компоновок Мод. 1 и Мод. 2 одинакова по уровню энергетической эффективности, следовательно, используя компоновку Мод. 1 с меньшим углом диффузорности ($\beta = 100$) можно разрабатывать трубные пучки, сопоставимые по компактности с шахматными пучками.

Разрабатываемые принципы компоновки пучков труб позволяют проводить усовершенствование конструкций газожидкостных и воздухоохлаждающих устройств, повышать их технико-экономические показатели.