

УДК 536.24

В. В. Дударев, доцент, канд. техн. наук (БГТУ); В. Б. Кунтыш, д-р техн. наук, профессор (БГТУ)

### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ КОМПОНОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБНОГО ПУЧКА С ЭКСЦЕНТРИЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ РЕБРИСТЫХ ТРУБ

Разработана новая конструкция пучка для газожидкостных теплообменников из ребристых труб, поперечно обтекаемых снаружи воздухом, модифицированная из традиционного коридорного пучка. Эксцентричным смещением труб поперечных рядов реализован применительно к внешней задаче теплообмена апробированный способ повышения энергетической эффективности конвективных поверхностей созданием конфузурно-диффузорных каналов для течения потока.

The new design of a bunch for gaze-liquid heat exchangers from the ridge pipes which are cross-section flowed round outside by air, modified of traditional passage a bunch is developed. Excentric displacement of pipes of cross-section numbers realises with reference to an external problem of heat exchange the tested way of increase of power efficiency convectional surfaces by creation konfuzorno-diffuzornyh channels for a stream current.

**Введение.** Пучки из круглых биметаллических ребристых труб (БРТ) широко применяются в газожидкостных теплообменниках различного функционального назначения, в которых воздух (газ) принудительно движется в межтрубном пространстве перпендикулярно продольной оси труб. К настоящему времени выполнены обширные исследования теплоаэродинамических характеристик и тепловой эффективности поперечно обтекаемых воздухом шахматных и коридорных пучков [1–4] из ребристых труб с их классическим размещением в решетках, при котором они устанавливались в вершинах равностороннего или равнобедренного треугольников либо вершинах квадратов или прямоугольников.

Известны рекуперативные теплообменники из круглых БРТ с традиционной компоновкой, например, в системах вентиляции производственных и общественных зданий, лесосушильных камерах, когда для применения воздуха через межтрубное пространство пучка используют осевые вентиляторы, особенностью которых является небольшой создаваемый напор воздуха. В связи с этим приходится ограничивать скорость набегающего воздушного потока перед пучком с малым значением порядка 0,5–6,0 м/с. Фронтальное сечение пучка оказывается значительных размеров, а для сопряжения вентилятора с теплообменником приходится устанавливать диффузор или конфузор с углами раскрытия вне оптимальных значений, что сопровождается дополнительными аэродинамическими потерями напора.

С целью устранения этого недостатка была разработана новая конструкция [3] поперечно-обтекаемого пучка из БРТ, которая представляет собой модификацию из равностороннего шахматного пучка. В таком пучке трубы каждого поперечного ряда смещаются через одну вдоль продольной оси пучка по направлению движения потока на величину эксцентриситета  $e$ .

В каждом поперечном ряду трубы располагаются зигзагообразно. Такая компоновка труб в решетках, наряду с уменьшением размеров фронтального сечения пучка, позволила впервые применительно к внешней задаче теплообмена осуществить технически реализацию известного принципа интенсификации теплоотдачи [5] внутри труб и каналов, суть которого состоит во внесении в поток чередующегося знакопеременного градиента давления. Это осуществлено созданием в межтрубном пространстве зигзагообразного (эксцентричного) пучка асимметричных конфузурно-диффузорных полостей с условно перемежающимися границами, вследствие чего появляется дополнительный перенос количества движения в направлении, перпендикулярном основному течению потока. Исследования [3] подтвердили повышенную на 10–17% энергетическую эффективность пучков с эксцентричным смещением БРТ по сравнению с традиционной компоновкой труб в шахматном равностороннем пучке.

Энергетическая эффективность коридорных [2, 4, 6] пучков из круглоребристых труб значительно уступает этой характеристике шахматных пучков. Однако единичное исследование [6] указало возможность повышения энергетической эффективности коридорного пучка при отказе от классического расположения БРТ в решетках.

Целью работы являлась разработка конструкции пучка из БРТ с использованием изложенных выше принципов и подходов на базе коридорной компоновки с получением основных компоновочных параметров.

**Исследование геометрии разработанного трубного пучка и обсуждение результатов.** Исходным является коридорный пучок четырехрядный (1, 2, 3, 4 – поперечные ряды) (рис. 1). Трубки пучка крепятся своими концами в трубных решетках.

На рис. 1 изображен вид сверху пучка со снятой верхней трубной решеткой.

Размещение труб в вершинах прямоугольника характеризуется поперечным  $S_1$  и продольным  $S_2$  шагами.

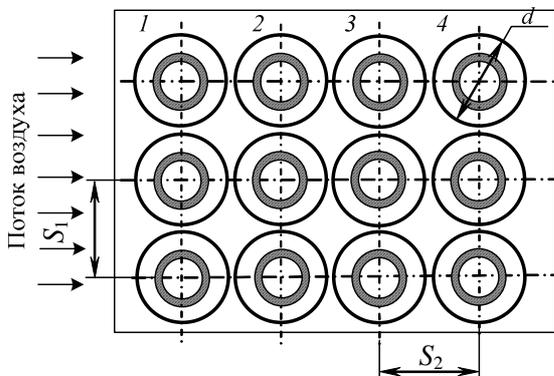


Рис. 1. Трубный коридорный пучок

Пучок состоит из БРТ (рис. 2: гладкая стальная труба 1 и алюминиевая ребристая оболочка 2) следующих геометрических параметров:  $d$  – наружный диаметр ребра;  $h, s, \Delta = 0,5(\Delta_1 + \Delta_2)$  – соответственно высота, шаг и средняя толщина ребра;  $d_0 = d - 2h$  – диаметр ребра по его основанию;  $d_n$  – наружный диаметр гладкой трубы;  $\delta$  – ее толщина.

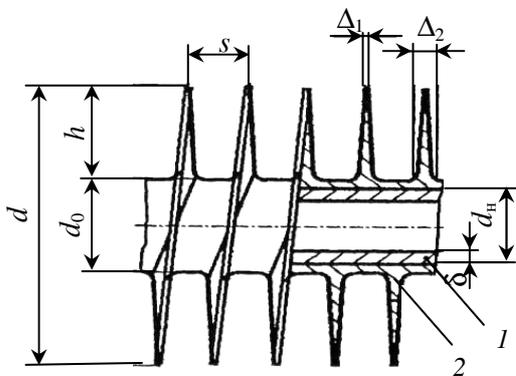


Рис. 2. Геометрические характеристики биметаллической ребристой трубы

Трубный пучок с эксцентричным расположением труб компоуется на базе коридорного пучка (рис. 1), как это показано на рис. 3. Изначально поперечным рядам коридорного пучка, расположенным фронтально к набегающему потоку и друг относительно друга с шагом  $S_2$ , присваиваются с чередованием номера 1 и 2. Аналогично маркируются и продольные ряды, расположенные вдоль движения потока на расстоянии друг от друга с шагом  $S_1$ . Далее все трубки поперечных рядов 2 смещаются в поперечном же направлении на требуемое расстояние  $e_2$ . Таким образом, возникает промежуточ-

ный пучок с «зигзагообразными» продольными рядами. Завершается компоновка пучка смещением продольных «зигзагообразных» рядов 2 вдоль движения потока на величину  $e_1$ . Центры трубок разработанного пучка образуют характерную сетку (рис. 1), которой удобно пользоваться для разметки трубной решетки при изготовлении очередного пучка. Основные геометрические соотношения этой сетки имеют следующий вид.

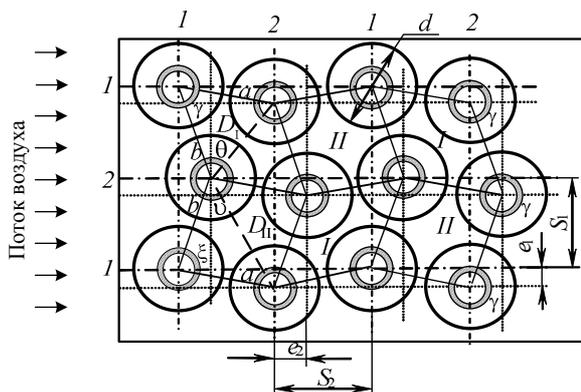


Рис. 3. Основные геометрические соотношения трубного пучка с эксцентричным расположением труб

Расстояния  $a$  и  $b$  между центрами трубок в продольных и поперечных рядах соответственно определяются по выражениям

$$a = \sqrt{S_2^2 + e_1^2}, \tag{1}$$

$$b = \sqrt{S_1^2 + e_2^2}. \tag{2}$$

Углы при вершинах параллелограммов со сторонами  $a, b$ , образующих сетку, составляют

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma &= \frac{\pi}{2} - \left( \arccos \left( \frac{a}{S_2} \right)^{-1} + \arccos \left( \frac{b}{S_1} \right)^{-1} \right), \\ \theta &= \frac{\pi}{2} + \left( \arccos \left( \frac{a}{S_2} \right)^{-1} + \arccos \left( \frac{b}{S_1} \right)^{-1} \right), \\ \nu &= \frac{\pi}{2} + \left( \arccos \left( \frac{b}{S_1} \right)^{-1} - \arccos \left( \frac{a}{S_2} \right)^{-1} \right), \\ \xi &= \frac{\pi}{2} - \left( \arccos \left( \frac{b}{S_1} \right)^{-1} - \arccos \left( \frac{a}{S_2} \right)^{-1} \right). \end{aligned} \right. \tag{3}$$

Наименьшие диагонали  $D_I$  и  $D_{II}$  параллелограммов I и II, характеризующие сечение потока, равны

$$\left\{ \begin{aligned} D_I &= \sqrt{(S_1 - e_1)^2 + (S_2 - e_2)^2}, \\ D_{II} &= \sqrt{(S_1 + e_1)^2 + (S_2 - e_2)^2} \end{aligned} \right. \tag{4}$$

либо

$$\begin{cases} D_I = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma, \\ D_{II} = a^2 + b^2 - 2ab \cos \xi. \end{cases} \quad (5)$$

Такое расположение трубок в пучке делит межтрубное пространство на чередующиеся, как в продольном, так и в поперечном направлении, области *I* и *II*, каждую из которых ограничивают четыре соседние трубки. Соединяющиеся области в свою очередь образуют в этих направлениях каналы с чередующимися конфузурными и диффузурными участками, что на рис. 3 демонстрируется различием геометрии параллелограммов *I* и *II*. Это чередование создает комбинацию, когда конфузурные участки четного канала и диффузурные участки соседнего нечетного канала располагаются в противофазе. Прохождению потока через конфузурный участок соответствует истечение газа из области *I* в область *II*, и в этом случае происходит торможение газа. Далее, входя в следующую область *I*, поток проходит через диффузурный участок, где разгоняется.

Благодаря взаимному расположению конфузурных и диффузурных каналов по двум направлениям в потоке возникают двухмерные поля давлений и скоростей, обеспечивая не только обтекание трубок в продольном направлении, но и циркуляцию газа вокруг них за счет дополнительного реактивного эффекта, возникающего из-за поперечного градиента давлений.

Эксцентричная компоновка трубок позволяет сделать пучок при необходимости более компактным. Сожмем эксцентричный пучок так, что размеры *a* и *b* останутся теми же, что и соответствующие параметры коридорного пучка ( $S_1, S_2$ ), т. е. примем  $a = S_2$  и  $b = S_1$ . В этом случае продольный и поперечный шаг в эксцентричном пучке уменьшатся и станут

$$S_{1y} = \varepsilon_1 S_1, \quad S_{2y} = \varepsilon_2 S_2, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степень продольного и поперечного сжатия пучка. Тогда с учетом формул (1)–(3) получим соответствующие зависимости между степенями сжатия  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  и величинами смещения  $e_1$  и  $e_2$

$$\varepsilon_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{e_2}{S_1}\right)^2}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{e_1}{S_2}\right)^2}. \quad (8)$$

Связь между степенями сжатия пучка задают углы раскрытия  $\gamma$  и  $\xi$  параллелограммов *I* и *II* (рис. 3), противоположно расположенные по

отношению к наименьшим диагоналям  $D_I, D_{II}$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - (\arccos(\varepsilon_2) + \arccos(\varepsilon_1)), \quad (9)$$

$$\xi = \frac{\pi}{2} - (\arccos(\varepsilon_1) - \arccos(\varepsilon_2)), \quad (10)$$

которые между собой связаны соотношением

$$\xi = \gamma + 2 \arccos(\varepsilon_2). \quad (11)$$

Как видно, при компоновке пучка возможно одновременное варьирование параметрами  $e_1$  и  $e_2$ , причем существует их ограничение.

Проанализируем формулу (9). Очевидно, при коридорной компоновке пучка  $\gamma_{\max} = \pi / 2$ . В этом случае степени сжатия  $\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 1$ , т. к.  $e_1 = 0$  и  $e_2 = 0$ .

Максимальное сжатие пучка будет достигнуто при соприкосновении сопредельных трубок с одинаковой нумерацией «2-2», «1-1» (рис. 3). Тогда у параллелограмма *I* меньшая диагональ  $D_I = d$ .

Исходя из этого и используя зависимость (5), получим выражение для расчета минимального угла раскрытия

$$\gamma_{\min} = \arccos\left(\frac{S_1^2 + S_2^2 - d^2}{2S_1S_2}\right). \quad (12)$$

Если один из шагов намного больше другого, данный угол будет стремиться к  $0^\circ$ . Однако в практическом плане это маловероятно. Более реален случай, когда  $D_I = S_1 = S_2$ , что соответствует шахматной компоновке пучка с расположением трубок при вершинах равностороннего треугольника, тогда  $\gamma = \arccos(0,5) = \pi / 3$ . В случае, когда данный треугольник является равносторонним с  $D_I = S_1$ , тогда  $\gamma = \arccos(S_2 / 2S_1)$ .

При известных параметрах коридорного пучка  $S_1, S_2, d$  перекомпоновка пучка осуществляется следующим образом. Задаемся требуемыми смещениями  $e_1$  и  $e_2$ . По формулам (7), (8) рассчитываем степени сжатия  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ . Далее определяем угол раскрытия, который должен оказаться не меньше своего минимального значения, определенного по формуле (12). Если условие  $\gamma \geq \gamma_{\min}$  выполняется, приступаем к вычислению угла  $\xi$  и меньшей диагонали параллелограмма *II*. Используя соотношения (1)–(6), эксцентричный пучок можно при необходимости растянуть до размеров коридорного.

Проиллюстрируем данную методику расчета на примере оценки компактности эксцентричного пучка относительно коридорного. Для большей наглядности упростим задачу, считая, что  $S_1 / d = S_2 / d = 1,25$ . Будем сжимать пучок,

сдвигая одновременно трубки продольно и поперечно на одинаковые расстояния  $e_1/d = e_2/d = \text{var}$ . Поэтому далее индексы при расчетных параметрах будут опущены. Для данных условий, согласно формуле (12),  $\gamma_{\min} = 47,2^\circ$ . Наряду с расчетом степени сжатия, шага, угла раскрытия рассчитываются параметр  $\bar{D} = D_{II}/D_I$  – отношение диагоналей параллелограммов I и II, характеризующее конфузорность межтрубного канала, его возможно максимальное значение  $\bar{D}_{\max}$ , соответствующее значению  $\gamma_{\min}$ , и степень сжатия по площади сечения пучка в плане сверху (рис. 3)

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 \varepsilon_2. \quad (13)$$

Результаты расчета перечисленных параметров представлены в таблице.

Параметры эксцентричного пучка

$e$	$\varepsilon$	$S_3$	$\gamma$	$\bar{D}$	$\bar{D}_{\max}$	$\bar{\varepsilon}$
0	1,000	1,250	90,0	1,000	1,000	1,000
0,1	0,997	1,246	80,8	1,091	1,224	0,994
0,2	0,987	1,234	71,6	1,209	1,410	0,974
0,3	0,971	1,213	62,2	1,368	1,567	0,940
0,4	0,497	1,184	52,7	1,594	1,701	0,898
0,457	0,931	1,163	47,2	1,769	1,769	0,866

Данные первой строки в таблице соответствуют коридорному расположению трубок в пучке, последняя строка представляет значения параметров для предельного случая сжатия, когда происходит касание ребер трубок.

Таким образом, данные, приведенные в таблице, демонстрируют преимущество эксцентричного пучка по сравнению с коридорным по такому важному качественному показателю, как компактность пучка.

Характер влияния на этот параметр величины смещения  $e$  демонстрирует график  $\bar{\varepsilon} - f(e)$  на рис. 4, который очень точно аппроксимируется выражением

$$\bar{\varepsilon} = \cos\left(\frac{e}{0,866}\right). \quad (14)$$

Значения параметра  $\bar{\varepsilon}$ , рассчитанные по формуле (14), представлены на графике  $\bar{\varepsilon} - f(e)$  точками.

**Заключение.** 1. На базе классического коридорного пучка разработана конструкция с эксцентричным расположением ребристых трубок.

2. Показано преимущество эксцентричного пучка перед коридорным пучком по такому показателю, как компактность.

3. Ожидается, что применение разработанного пучка с эксцентричным размещением трубок в трубных решетках позволит улучшить эксплуатационные и энергетические характеристики теплообменников.

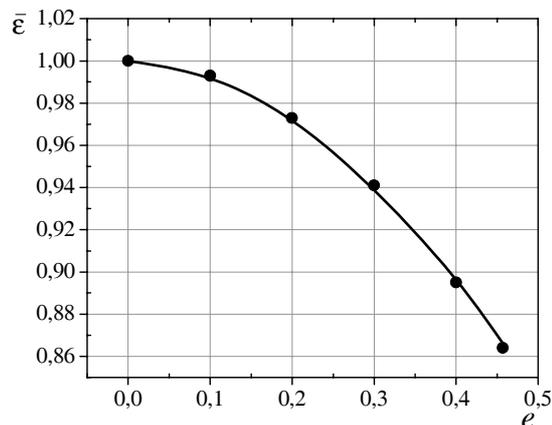


Рис. 4. Зависимость степени сжатия пучка от смещения трубок:

• – аппроксимация по формуле (14)

### Литература

- Юдин, В. Ф. Теплообмен поперечно обтекаемых пучков труб / В. Ф. Юдин. – Л.: Машиностроение, 1982. – 189 с.
- Жукаускас, А. А. Теплоотдача поперечно обтекаемых пучков труб / А. А. Жукаускас, Р. В. Улинскас. – Вильнюс: Мокслас, 1986. – 204 с.
- Кунтыш, В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты теплообменников воздушного охлаждения из оребренных труб / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – СПб.: Энергостандарт, 1992. – 280 с.
- Письменный, Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб / Е. Н. Письменный. – Киев: Альтерпресс, 2004. – 244 с.
- Гухман, А. А. Интенсификация теплообмена посредством создания в потоке неоднородностей давления / А. А. Гухман, В. А. Кирпиков // Тепло- и массоперенос. – Минск: ИТМО АН БССР, 1972. – Т. 1, ч. 2. – С. 128–137.
- Кунтыш, В. Б. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление поперечнообтекаемых переходных коридорно-шахматных пучков оребренных труб / В. Б. Кунтыш, Н. Н. Стенин // Теплоэнергетика. – 1993. – № 2. – С. 128–137.

Поступила 31.03.2010