

# ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 11454

(13) U

(46) 2017.08.30

(51) МПК

F 28D 3/02 (2006.01)

F 28F 1/24 (2006.01)

(54)

## ТРУБНЫЙ ПУЧОК ТЕПЛООБМЕННИКА

(21) Номер заявки: u 20160370

(22) 2016.12.08

(71) Заявитель: Учреждение образования  
"Белорусский государственный техно-  
логический университет" (ВУ)

(72) Авторы: Кунтыш Владимир Борисович;  
Филатов Святослав Олегович;  
Сидорик Галина Сергеевна (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение обра-  
зования "Белорусский государственный  
технологический университет"  
(ВУ)

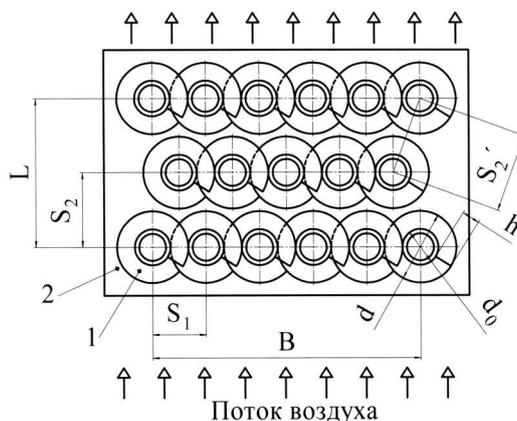
(57)

Трубный пучок теплообменника прямоугольного фронтального сечения, содержащий трубные решетки и набор шахматно расположенных в них с поперечным  $S_1$  и продольным  $S_2$  шагами круглых ребристых труб с поперечными спирально накатными, навитыми или кольцевыми ребрами, отличающийся тем, что в каждом поперечном ряду пучка круглые ребристые трубы располагаются с поперечным шагом  $S_1 = d_0 + h$ , при котором ребра каждой трубы вдвинуты на всю высоту в межреберные каналы соседних труб одного и того же поперечного ряда, где  $d_0$  - диаметр круглой ребристой трубы по основанию ребра,  $h$  - высота ребра.

(56)

1. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. - СПб.: Энергоатомиздат, 1992. - С. 11-28, 218-221.

2. Кунтыш В.Б., Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Егоров И.Ф. Примеры расчетов нестандартизованных эффективных теплообменников. - СПб.: Недра, 2000. - С. 165-221.



Фиг. 1

3. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. - М.: Паука, 1982. - С. 432-435.
4. А.с. СССР 1688095 А1, МПК F 28D 7/00, F 28F 1/24.
5. А.с. СССР 1476254 А1, МПК F 23L 15/04.
6. Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Кунтыш В.Б. и др. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / Под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. - СПб.: Недра, 1996. - С. 89-104.
7. Патент РФ 2213920 С2, МПК F 281D 3/02 (прототип).
8. Кунтыш В.Б., Пиир А.Э., Мулин В.П., Теляев Р.Ф. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков из круглых труб с подогнутыми спиральными KLM-ребрами // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2003. - № 11. - С. 10-14.

---

Полезная модель относится к поверхностным рекуперативным теплообменным аппаратам газожидкостного типа, в которых применяются трубные пучки из ребристых труб со спиральными накатными, навитыми или кольцевыми (шайбовыми) ребрами, обтекаемыми снаружи поперечным потоком. Ребристые трубы преимущественно располагаются в решетках пучка шахматно с поперечным  $S_1$  и продольным  $S_2$  шагами. Типичными представителями таких теплообменников являются теплообменные секции аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1] технологических продуктов в химической, нефтеперерабатывающей, газовой промышленности; промежуточные и концевые холодильники компрессорных машин; воздушные охладители масла крупных силовых трансформаторов; калориферы сушильных установок; воздухонагреватели систем вентиляции и кондиционирования воздуха; воздушные конденсаторы крупных холодильных установок. Небольшие значения коэффициента теплопередачи ( $k = 25-45$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)), которые являются следствием низкой интенсивности теплоотдачи (30-70 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) [2] поверхности оребрения трубы в принудительном потоке воздуха, обуславливают значительные габариты и объемы, в частности размеры фронтального сечения пучка и его металлоемкость.

Одним из направлений улучшения удельных габаритной объемной и массовой характеристик пучка (теплообменника в целом) является увеличение плотности расположения труб в пучке и теплового потока в неизменных габаритах, который характеризуется шириной  $B$ , высотой  $H$  и глубиной  $L$  по направлению движения воздуха. Объем пучка составит, м<sup>3</sup>:

$$V = B \cdot H \cdot L. \quad (1)$$

Тепловой поток пучка по уравнению теплоотдачи, Вт:

$$Q = \alpha F (t_{ct} - t_b), \quad (2)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи между поверхностью оребрения и воздухом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  - площадь теплоотдающей поверхности оребрения, м<sup>2</sup>;  $t_{ct}$  - средняя температура поверхности трубы у основания ребер, °С;  $t_b$  - средняя температура потока воздуха, обтекающего трубы, °С.

Для увеличения  $Q$ , согласно (2), при постоянном объеме  $V$  и неизменных  $\alpha$  и  $(t_{ct} - t_b)$  необходимо разместить в пучке большее количество оребренных труб, что будет сопровождаться ростом теплоотдающей площади  $F$ . Это следует из соотношений, согласно которым количество труб в поперечном ряду:

$$n = B/S_1, \quad (3)$$

а количество поперечных рядов составит:

$$z = L/S_2. \quad (4)$$

Общее количество труб в пучке:

$$m = n \cdot z. \quad (5)$$

Площадь поверхности оребрения труб пучка, м<sup>2</sup>:

$$F = f_{\text{тр}} \cdot m, \tag{6}$$

где  $f_{\text{тр}}$  - площадь поверхности оребрения одной трубы,  $\text{м}^2$ .

Следовательно, увеличением  $m$  достигается большее значение  $F$ . Скачанное реализуется уменьшением шагов  $S_1$  и  $S_2$  против применяемых, что видно из формул (3)-(5), то есть возрастает плотность расположения труб в трубной решетке. Плотность расположения характеризуется коэффициентом компактности пучка [2],  $\text{м}^2/\text{м}^3$ :

$$\Pi = F/V = (\pi \cdot d_0 \cdot \varphi) / (S_1 \cdot S_2) = (\pi \cdot d_0 \cdot \varphi) / (\sigma \cdot \sigma_2 \cdot d^2), \tag{7}$$

где  $d$  - наружный диаметр ребра,  $\text{м}$ ;

$d_0 = d - 2h$  - диаметр трубы по основанию ребра,  $\text{м}$ ;

$h$  - высота ребра,  $\text{м}$ ;

$\varphi$  - коэффициент оребрения трубы;

$\sigma_1 = S_1/d$  - относительный поперечный шаг;

$\sigma_2 = S_2/d$  - относительный продольный шаг.

Для применяемых значений  $S_1$ ,  $S_2$  и геометрических параметров ребер труб с кольцевыми и спиральными ребрами коэффициент компактности доведен до  $\Pi = 500-600 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Известно [3], что компактность сама по себе является залогом высокой тепловой эффективности трубного пучка, и это подтверждено экспериментальным исследованием [1] тепловых и аэродинамических характеристик, в частности интенсифицируется теплоотдача, а значит, рост теплового потока обеспечивается наряду с увеличением  $F$  еще и большим значением  $\alpha$ , что видно из (2). Чем компактнее трубный пучок (теплообменник), тем больше тепла отводится в его объеме и уменьшается металлоемкость на единицу передаваемого тепла.

В эксплуатируемых и изготавливаемых промышленностью теплообменниках из круглых труб, исходя из изложенных соображений, применяются очень плотные (компактные) теплообменники с минимальными значениями  $S_1$  и  $S_2$  или  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Например, в секциях АВО используется шахматная равносторонняя компоновка труб с  $S_1 = S_2' = d + (1 \div 2) \text{ мм}$ , а  $S_2 = 0,866 \cdot S_1$ , где  $S_2'$  - диагональный шаг. Для  $d = 56 \text{ мм}$  имеем  $\sigma_1 = \sigma_2' = 1,035$ ;  $S_2 = 0,866 \cdot 58 = 50,2 \text{ мм}$ ,  $\sigma_2 = 50,2/56 = 0,896$ . Даже назначая предельное минимальное значение  $S_1 = S_2' = d = 56 \text{ мм}$ , компактность пучка возрастает лишь на 3,5 %.

Для кардинального изменения компактности  $\Pi$  в большую сторону, а следовательно, и роста  $Q$ , а также уменьшения удельных объемной и массовой характеристик необходимы новые конструкторско-технологические решения.

Одно из таких решений заложено в конструкции трубного пучка [4] теплообменника с шахматной компоновкой круглых труб с поперечными ребрами, имеющими в плане вид круговых дисков с сегментными вырезами на частях дисков, находящихся с тыльной (кормовой) стороны трубы. Хорды сегментных вырезов каждого диска (поперечного ребра) размещены по касательной к трубе, на которой расположены основания ребер, и перпендикулярны по отношению к направлению потока воздуха. Для повышения компактности пучка и интенсификации теплоотдачи предпринятое расположение сегментного выреза позволяет уменьшить продольный шаг  $S_2$  до  $0,77 \cdot d$ , но поперечный шаг  $S_1$  остается неизменным, при этом предполагается, что тепловой поток пучка даже увеличивается вследствие интенсификации теплоотдачи.

Предложенная конструкция имеет ряд недостатков, которые не позволяют в полной мере реализовать заявленные цели. Предложенная конструкция формы выреза поверхности ребер наряду с "балластной" поверхностью теплоотдачи, находящейся в аэродинамическом следе, удаляется и часть поверхности боковых участков, которые активно участвуют в теплоотдаче. Это подтверждается следующими расчетами и экспериментальными исследованиями [1] базового пучка теплообменных секций АВО, состоящего из труб  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 57 \times 26,6 \times 15,2 \times 2,5 \times 0,5 \text{ мм}$ ;  $\varphi = 20,7$ . Здесь  $s$ ,  $\Delta$  - соответственно шаг и средняя толщина ребра. Пучок шахматный шестирядный ( $z = 6$ ) с шагом разбив-

## ВУ 11454 U 2017.08.30

ки труб  $S_1 = 63,5$  мм и  $S_2 = 55$  мм; пучок равносторонний. Коэффициент компактности этого пучка по (7):

$$\Pi = 3,14 \cdot 0,0266 \cdot 20,7 / (0,0635 \cdot 0,055) = 495 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

После кормовой обрезки ребер на полную их высоту  $h = 15,2$  мм шаг  $S_2 = 0,77 \cdot 57 = 43,9$  мм, а коэффициент оребрения уменьшится до  $\phi = 14,9$ . Компактность этого пучка составит:

$$\Pi = 3,14 \cdot 0,0266 \cdot 14,9 / (0,0635 \cdot 0,0439) = 446 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Компактность пучка в действительности снизилась в  $495/446 = 1,11$  раза и это вполне логично, несмотря на более плотную компоновку труб в  $55/43,9 = 1,25$  раза, однако происходит опережающим темпом уменьшение величины площади теплоотдающей поверхности ребер в  $20,7/14,9 = 1,39$  раза. Интенсификация теплоотдачи в среднем составила 1,18 раза ( $\approx 18\%$ ) [1]. Тогда в неизменных габаритах (объеме) пучка тепловой поток не возрастает, а уменьшается согласно (2), в  $Q \sim Q_{\text{баз}} \cdot 1,18/1,39 \sim 0,85 \cdot Q_{\text{баз}}$ , где  $Q_{\text{баз}}$  - тепловой поток базового (исходного) до обрезки ребер пучка.

Представленные расчеты подтверждают исходные положения [3], что чем меньше компактность пучка, тем ниже его тепловая эффективность.

В предложенной конструкции воздухонагревателя [5] частично устранены обнаруженные недостатки конструкции трубного пучка с кормовой обрезкой ребер. Воздухонагреватель содержит шахматный пучок труб с кольцевыми или спиральными ребрами с отогнутыми по бокам на  $90^\circ$  их кромками параллельно направлению движения воздуха. Трубы размещаются с заданным относительным поперечным шагом  $(1 + 1,5h/d) \leq S_1/d \leq 3,0$ . Боковая отгибка ребер позволяет применить в трубном пучке тесный поперечный шаг труб, что повышает компактность конструкции и увеличивает теплоотдачу на  $\approx 20\%$ .

Проанализируем предельное увеличение компактности пучка предложенным приемом из труб теплообменных секций АВО. Судя по приведенным фигурам воздухонагревателя наибольшее значение  $b$  отгибки равно  $b_{\text{max}} = s$ . Тогда конкретно  $b_{\text{max}} = 2,5$  мм, а возможный наименьший шаг  $S_{1\text{min}} = (1 + 1,5h/d) \cdot d = (1 + 1,5 \cdot 15,2/57) \cdot 57 = 59,25$  мм, что действительно меньше в сравнении с применяемым в АВО второго поколения [6] шагом. Однако в АВО первого поколения применяется шаг  $S_{1\text{min}} = 58$  мм  $< S_{1\text{min}}$  по заявленному шагу в [5]. Компактность пучка даже ухудшится в  $59,25/58 = 1,022$  раза, что вызовет уменьшение абсолютной площади теплоотдачи  $F$  в заданных габаритах пучка секции. Но это снижение частично компенсируется интенсификацией теплоотдачи, но не настолько, чтобы повысился тепловой поток  $Q$ . Однако в целом предложенное конструкторско-технологическое решение устраняет основной недостаток предыдущей конструкции трубного пучка с обрезанными ребрами ввиду того, что теплоотдающая площадь оребрения сохраняется без изменения, однако при этом возможность управления компактностью ограничена весьма узкой областью.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемым результатам к заявляемому решению является теплообменная секция [7], включающая спирально накатные или навитые оребренные трубы, трубные доски, при этом оребренные трубы скомпонованы в шахматный пучок с поперечным обтеканием потоком воздуха. Новыми признаками в теплообменной секции в сравнении с выше проанализированными является применение труб с многозаходными разновысокими ребрами, периодически чередующимися, при этом высокие ребра выполнены однозаходными и отогнуты с противоположных сторон по линии хорды, находящейся на расстоянии от оси трубы, равном половине наружного диаметра  $0,5 \cdot d_1$  низкого ребра, при этом отогнутые сегменты высоких ребер находятся в плоскости, перпендикулярной фронтальной плоскости секции и параллельной оси трубы. Диаметр высоких ребер составляет  $d = d_1 + 2 \cdot n \cdot s$ , где  $n$  - общее целое число заходов ребер, а трубы расположены в каждом поперечном ряду вплотную с поперечным шагом

## ВУ 11454 U 2017.08.30

$S_{1п} = D' = d_1 + 2 \cdot \Delta$ , где  $D'$  - расстояние между наружными поверхностями подогнутых ребер. Диаметр высоких ребер составляет  $d = d_1 + 2 \cdot n' \cdot s$ .

Существенным преимуществом труб с разновысокими ребрами в сравнении с равновысокими является то, что, увеличивая значение боковой подгибки ребра до  $b \approx 2s$ , то есть в два раза, а значит, компактность пучка в заданных габаритах возрастает. Однако достигнутый результат сопровождается негативным явлением уменьшения теплоотдающей площади трубного пучка в тех же габаритах. Выполним расчеты изменения количественных значений по действию указанных признаков для оребренных труб базового пучка стандартных секций [1] АВО типа АВГ, параметры которых указаны выше. Ширина секции  $B = 1220$  мм. Трубы с двухзаходными ( $n' = 2$ ) разновысокими ребрами вместо однозаходных имеют геометрические параметры:  $d = 57$  мм;  $d_0 = 26,6$  мм;  $\Delta = 0,5$  мм;  $s = 2,5$  мм; высота высоких ребер  $h = 15,2$  мм, диаметр низких ребер  $d_1 = d - 2 \cdot n' \cdot s = 57 - 2 \cdot 2 \cdot 2,5 = 47$  мм. Коэффициент оребрения таких труб  $\phi = 18,15$ . Трубы в поперечных рядах секции расположены вплотную друг к другу, следовательно, поперечный шаг компоновки труб будет  $S_{1п} = d_1 + 2 \cdot \Delta = 47 + 2 \cdot 0,5 = 48$  мм, а продольный шаг остается неизменным и равным базовому  $S_2 = 0,866 \cdot 58 = 50,2$  мм. Тогда компактность пучка с боковыми подогнутыми двухзаходными ребрами:

$$\Pi = 3,14 \cdot 0,0266 \cdot 18,15 / (0,048 \cdot 0,0502) = 629 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Компактность базового пучка с однозаходными спиральными ребрами, применяемыми в стандартных секциях с шагами  $S_1 = S_2' = 58$  мм,  $S_2 = 50,2$  мм при коэффициенте оребрения  $\phi = 20,7$ :

$$\Pi = 3,14 \cdot 0,0266 \cdot 20,7 / (0,058 \cdot 0,0502) = 594 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Для АВО второго поколения  $S_1 = S_2' = 63,5$  мм,  $S_2 = 55$  мм имеем:

$$\Pi = 3,14 \cdot 0,0266 \cdot 20,7 / (0,0635 \cdot 0,055) = 495 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Подгибка ребер увеличивает компактность пучка в интервале от  $629/594 = 1,06$  раза до  $629/495 = 1,27$  раза, но при этом теплоотдающая площадь в заданных габаритах снижается в  $20,7/18,15 = 1,14$  раза. Рост компактности для АВО второго поколения опережает снижение теплоотдающей площади, что является благоприятным эффектом. В абсолютных данных для конкретной секции это будет равным: количество труб с подгибкой в поперечном ряду  $n = B/S_{1п} = 1220/48 = 25$  шт., при  $z = 6$  рядов  $m = 150$  шт. Для стандартной секции  $n = 1220/63,5 = 19$ ; а  $m = 19 \cdot 6 = 114$  шт. Значит в заданных габаритах или объеме пучка может быть скомпонована увеличенная теплоотдающая площадь в  $25/19 = 1,31$  или  $150/114 = 1,31$  раза. Также экспериментально [8] установлено, что подгибка разновысоких ребер интенсифицирует коэффициент теплоотдачи на 20 %. Следовательно, тепловой поток трубного пучка АВО в целом при неизменном объеме максимально возрастает  $Q \sim 1,31 \cdot 1,2 \cdot Q_{\text{баз}} = 1,57 \cdot Q_{\text{баз}}$ . Полученное значение соответствует случаю полной реализации потенциальных возможностей прототипа.

Задачей разработки полезной модели является увеличение компактности, теплового потока (мощности), снижение удельной металлоемкости и объемной характеристики.

Поставленная задача достигается в трубном пучке теплообменника прямоугольного фронтального сечения, содержащем трубные решетки и набор шахматно расположенных в них с поперечным  $S_1$  и продольным  $S_2$  шагами круглых ребристых труб с поперечными спирально накатными, навитыми или кольцевыми ребрами, отличающемся тем, что в каждом поперечном ряду пучка круглые ребристые трубы располагаются с поперечным шагом  $S_1 = d_0 + h$ , при котором ребра каждой трубы вдвинуты на всю высоту в межреберные каналы соседних труб одного и того же поперечного ряда, где  $d_0$  - диаметр круглой ребристой трубы по основанию ребра,  $h$  - высота ребра.

Отличительными признаками предлагаемой конструкции трубного пучка теплообменника по сравнению с прототипом является то, что в поперечных рядах трубного пучка теплообменника круглые ребристые трубы располагаются таким образом, что ребра каждой круглой ребристой трубы вдвинуты в межреберные каналы соседних круглых ребристых

## ВУ 11454 U 2017.08.30

труб на полную высоту ребра  $h$ . Механический контакт каждого ребра осуществляется непосредственным соприкосновением его поверхности с поверхностью соседней круглой ребристой трубы диаметром  $d_0$  по основанию ребра в плоскости, включающей продольные оси круглых ребристых труб, которая перпендикулярна потоку воздуха. Следовательно, поперечный шаг расположения круглых ребристых труб равен  $S_1 = d_0 + h$  и его значение будет минимальным среди возможных технических решений при сохранении неизменной теплоотдающей площади поверхности каждой круглой ребристой трубы, а компактность трубного пучка теплообменника достигнет наибольшего значения.

Количественно для стандартизованных АВО первого поколения с базовой круглой ребристой трубой и коэффициентом оребрения  $\phi = 20,7$  при  $d_0 = 26,6$  мм,  $h = 15,2$  мм,  $S_1 = 26,6 + 15,2 = 41,8$  мм,  $S_2 = 50,2$  мм = const компактность трубного пучка теплообменника составит

$$\Pi = 3,14 \cdot 0,0266 \cdot 20,7 / (0,0418 \cdot 0,0502) = 824 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Для второго поколения АВО при  $S_2 = 55$  мм = const шаг  $S_1$  остается тем же, что и в АВО первого поколения, то есть  $S_1 = 41,8$  мм, а компактность трубного пучка теплообменника составит

$$\Pi = 3,14 \cdot 0,0266 \cdot 20,7 / (0,0418 \cdot 0,055) = 752 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Компактность трубного пучка теплообменника по сравнению с базовым пучком в зависимости от поколения АВО увеличивается от  $824/594 = 1,39$  до  $752/495 = 1,52$  раз. Следовательно, при неизменных габаритах трубного пучка теплообменника его теплоотдающая площадь  $F$  возрастает не менее, чем на 39 %, а верхний предел составляет 52 %. Согласно уравнению (2), тепловой поток  $Q$  также увеличится в указанном интервале, но в действительности рост  $Q$  будет больше вследствие интенсификации теплоотдачи и соответственного увеличения  $\alpha$ . В заявляемой конструкции трубного пучка теплообменника каждое ребро находится в середине межреберного канала шириной  $u$  и омывается по высоте воздухом с небольшим градиентом скорости, то есть скорость близка к некоторой средней скорости, нет обходных течений вне межреберного канала, которые снижают интенсивность теплоотдачи и понижают коэффициент эффективности ребра. Интенсификация теплоотдачи составит в среднем 35 %. В итоге тепловой поток даже для наиболее компактного базового трубного пучка теплообменника увеличится в  $Q \sim 1,39 \cdot 1,35 \cdot Q_{\text{баз}} = 1,88 \cdot Q_{\text{баз}}$  и существенно превысит (до 20 %) увеличение теплового потока в сравнении с прототипом. Рост теплового потока в неизменных габаритах сопровождается снижением удельных массовой (металлоемкости) и объемной характеристик трубного пучка теплообменника.

Сформулированные в совокупности отличительные признаки позволили положительно решить задачу полезной подели.

Полезная модель поясняется на фиг. 1-6.

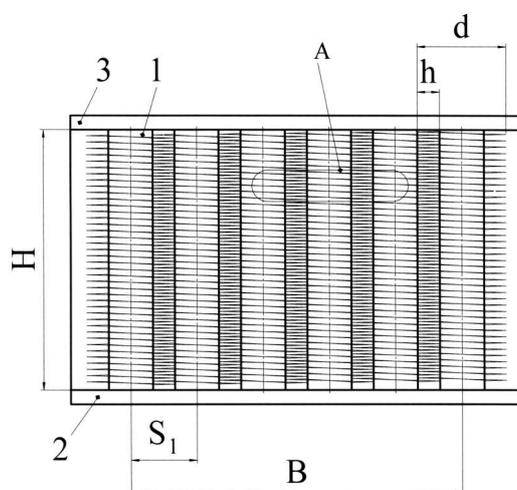
На фиг. 1 изображен трубный пучок теплообменника со снятой верхней трубной решеткой, вид сверху; на фиг. 2 - вид на трубный пучок теплообменника спереди; на фиг. 3 - круглая ребристая труба со спиральными накатными ребрами; на фиг. 4 - увеличенный фрагмент из трех соседних круглых ребристых труб одного поперечного ряда по виду А; на фиг. 5 - аксонометрическое изображение нескольких круглых ребристых труб в одном поперечном ряду; на фиг. 6 - аксонометрическое изображение нескольких круглых ребристых труб в двух поперечных рядах.

Трубный пучок теплообменника содержит круглые ребристые трубы 1, которые расположены в трубных решетках 2, 3. Круглые ребристые трубы содержат поперечные ребра, наружный диаметр которых  $d$ ; высота, шаг и средняя толщина соответственно  $h$ ,  $s$ ,  $A$ ; ширина межреберного канала  $u = s - \Delta$ . В трубном пучке теплообменника круглые ребристые трубы располагаются в шахматном порядке с поперечным шагом  $S_1$ , продольным шагом  $S_2$  и диагональным шагом  $S'_2$ . Круглые ребристые трубы 1, закрепленные в трубных решетках 2 и 3, образуют трубный пучок теплообменника. Ребра каждой круглой

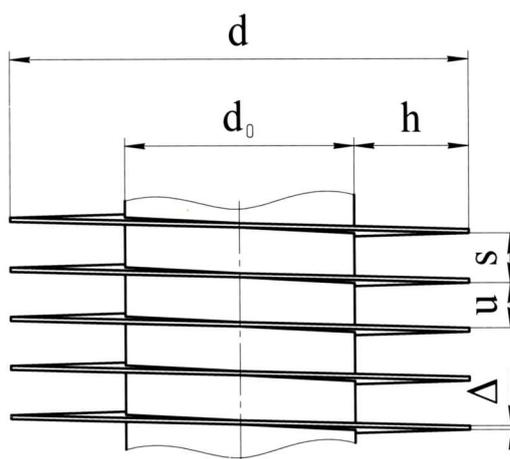
# ВУ 11454 U 2017.08.30

ребристой трубы поперечного ряда вдвинуты на всю высоту  $h$  в межреберные каналы соседних труб этого же ряда, что обеспечивает наименьшее значение  $S_1$  из возможных, равное  $S_1 = d_0 + h$ , при том каждое вдвинутое ребро находится в середине межреберного канала, шириной  $u = s - \Delta$ .

Трубный пучок теплообменника работает следующим образом. В круглые ребристые трубы 1 поступает технологический продукт, его пары или иной энергоноситель, которые передают тепло через теплопроводную стенку трубы ребрам. Поток воздуха поступает в межреберные каналы трубного пучка перпендикулярно продольной оси ребристых труб. Тепловой поток конвекцией с поверхности ребер и поверхности круглой ребристой трубы, не занятой ребрами, передается воздуху, который при движении по трубному пучку теплообменника нагревается, а затем выводится из него в окружающую среду или к потребителям отведенного теплового потока.

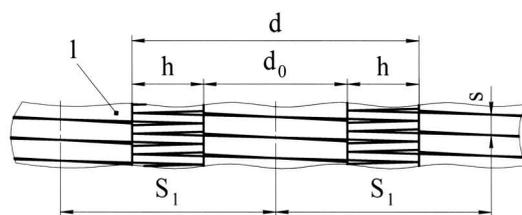


Фиг. 2

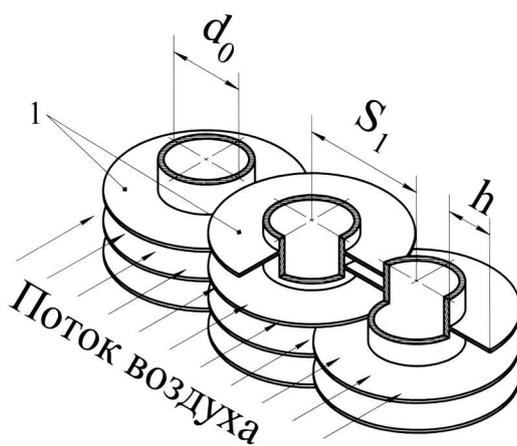


Фиг. 3

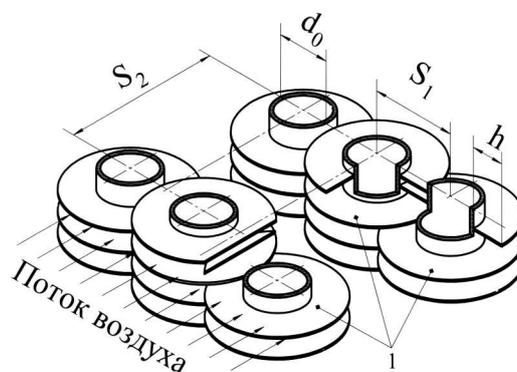
$\frac{A}{\text{увеличено}}$



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6