

ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 2838

(13) U

(46) 2006.06.30

(51)⁷ F 28F 1/00

(54)

ТЕПЛООБМЕННАЯ ТРУБА

(21) Номер заявки: u 20050787

(22) 2005.12.08

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

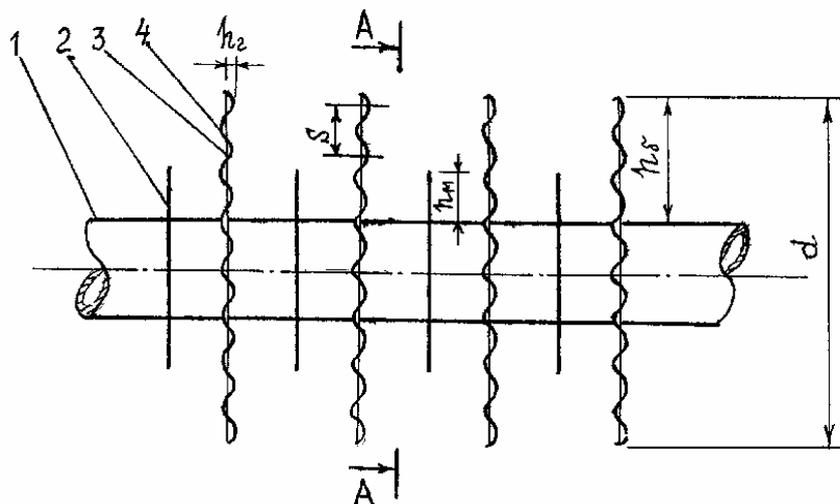
(72) Авторы: Кунтыш Владимир Борисо-
вич; Санкович Евгений Савельевич;
Мулин Виктор Петрович; Жлобич
Анатолий Викторович (ВУ)

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

(57)

1. Теплообменная труба с поперечными круглыми ребрами разной высоты, в которой между ребрами большой высоты размещены ребра с меньшей высотой, отличающаяся тем, что периферийный кольцевой участок ребер большой высоты шириной, равной разности между высотами большого и малого ребра, выполнен с радиально расположенными гофрами, высота которых не меньше толщины пограничного слоя воздуха на боковой поверхности ребра, а шаг гофров по окружности наружного диаметра ребра равен длине присоединения оторвавшихся вихрей от поверхности предыдущего к поверхности следующего ребра.

2. Теплообменная труба по п. 1, отличающаяся тем, что гофры при вершине имеют плавные удобообтекаемые очертания.



Фиг. 1

(56)

1. Бажан П. И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. - М.: Машиностроение, 1989. - С. 60 - 61.
2. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечно оребренных труб. - Л.: 1982. - С. 67.
3. Лебедев П. Д., Щукин А.А. Промышленная теплотехника. - М.: Госэнергоиздат, 1956. - С. 42.
4. Грудзинский М.М. Исследование теплопередачи и потерь давления в пучках оребренных труб и изыскание оптимальных конструкций воздухонагревателей: Автореф. дис. канд. - М., 1968. - С. 10.
5. А.с. СССР 1052832 МПК⁴ F 28 F 1/10, 1983.
6. А.с. СССР 1397026 МПК⁴ F 28 F 1/24, 1988.
7. А.с. СССР 1725062 МПК⁴ F 28 F 1/36, 1992 (прототип).
8. Стасюлявичюс Ю., Скринска А. Теплоотдача поперечно обтекаемых пучков ребристых труб. – Вильнюс: Минтис, 1974. - С. 74.
9. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. - М.: Энергоатомиздат, 1998. - С. 188 - 189.

Полезная модель относится к конвективным поверхностям теплообмена и может быть использована в газожидкостных рекуперативных теплообменниках, например калориферах, воздухоохладителях установок кондиционирования воздуха, теплообменных секциях аппаратов воздушного охлаждения, а также теплообменных устройствах нефтеперерабатывающей, нефтехимической, газоперерабатывающей, энергетической и других отраслях промышленности.

Основным недостатком конвективных теплообменных труб с круглыми поперечными ребрами, обтекаемых снаружи принудительным потоком воздуха, перпендикулярным продольной оси, является низкий коэффициент теплоотдачи [1] по воздушной стороне, величина которого на один-два порядка меньше теплоотдачи со стороны жидкости, движущейся внутри труб, а также связанная с этим значительная металлоемкость газожидкостных теплообменников. Тепловая эффективность труб с круглыми ребрами [2] ниже эффективности соответствующих гладких труб. Это объясняется менее благоприятными гидродинамическими условиями обтекания ребер, неравномерной скоростью воздуха по высоте межреберной полости, образованием пограничного слоя воздуха на боковой поверхности ребер, возникновением градиента температуры по высоте ребра. Для преодоления отмеченных недостатков необходимо повысить тепловую эффективность трубы, в связи с чем следует осуществить интенсификацию теплоотдачи воздуха как наименьшей и являющейся определяющей в процессе теплопередачи. С целью интенсификации теплоотдачи по оребренной стороне трубы в большинстве случаев используют собственно ребра, на поверхности которых механическим способом образуют интенсификаторы конвективного теплообмена или преобразуют некоторые участки ребер для выполнения той же функциональной задачи.

Известна теплообменная труба [3] со спирально-навитыми ребрами одинаковой высоты, у каждого из которых по всей окружности основания выполнены радиально расположенные гофры, длина которых меньше высоты ребра. Наличие гофр препятствует интенсивному омыванию этой теплоотдающей части поверхности ребра и поверхности несущей трубы воздухом вследствие возникновения дополнительного аэродинамического сопротивления движению среды. От действия этого фактора часть потока воздуха вытесняется из прикорневой межреберной полости к вершинной, уменьшается скорость движения воздуха у основания и темп снижения теплоотдачи в связи с пониженной скоростью воздуха на этом участке теплоотдающей площади превалирует над эффектом интенсификации теплоотдачи, вызванной дополнительной турбулизацией потока воздуха гофрами. Тепловая эффективность трубы снижается на 10...20 % по сравнению с гладкими ребрами.

Изложенное полностью подтверждено сравнительными экспериментальными теплоаэродинамическими исследованиями [4] шахматных и коридорных пучков с навитыми спиральными гладкими и гофрированными ребрами. Гофрированные у основания ребра также вызывают большую загрязняемость теплообменной трубы.

Известна теплообменная труба [5] со спирально-навитыми ребрами, на одной стороне поверхности которых выполнены веерообразно расположенные под острым углом к продольной оси трубы рельефные выступы (рифления). Высота рифлений весьма небольшая и по технологическим условиям не может превышать 0,08...0,12 мм. При такой высоте рифления полностью погружены в пограничный слой воздуха на боковой поверхности ребра и, естественно, не способны его разрушить с последующим образованием вихреобразований, вызывающих интенсификацию теплообмена. Одностороннее нанесение рифлений на поверхность ребра полностью исключает интенсификацию теплоотдачи со второй стороны этого ребра. Такие рифления малой высоты способствуют дополнительному осаждению загрязнений на боковой поверхности ребра и, следовательно, возникновению дополнительного термического сопротивления теплопередачи, приводящего к снижению тепловой эффективности трубы. На основании изложенного можно утверждать, что предложенной конструкции трубы свойственна интенсивность теплоотдачи гладкоресистой, а возможно и меньшая.

Для проверки высказанных предположений нами были выполнены по общепринятой методике [2] теплоаэродинамические исследования двух шахматных шестирядных пучков из круглых труб с навитыми алюминиевыми ребрами с гладкой боковой поверхностью и поверхностью с рифлениями согласно [5]. Испытывались пучки из труб натуральных размеров, изготовленные Таллинским машиностроительным заводом, работники которого являются соавторами изобретения [5]. Опыты проведены на аэродинамической трубе поперечного сечения 400×400 мм, пучки труб обтекались снаружи перпендикулярным потоком воздуха.

Геометрические параметры трубы и ребер следующие: наружный диаметр ребра $d = 55,5$ мм; высота, шаг и толщина ребра соответственно $h = 14,95$ мм, $u = 2,5$ мм, $\Delta = 0,3$ мм; диаметр ребра по его основанию $d_0 = d - 2h = 25,6$ мм; несущая труба выполнена из углеродистой стали: наружный диаметр трубы $d_n = 25$ мм, толщина стенки трубы $\delta_{ст} = 2$ мм. Коэффициент оребрения трубы $\phi = 20,08$. Поперечное сечение ребра представляло L-образную форму, т.е. у основания ребро имело отогнутую горизонтальную полку. Пучок 1 был собран из труб с гладкой боковой поверхностью ребер. Пучок 2 состоял из таких же труб, но на боковой поверхности (одной стороне) были нанесены веерообразные рифления, поперечное сечение которых имело форму остrokонечных зубцов высотой $h_3 = 0,1$ мм с шагом $s_3 = 3$ мм при вершине ребра. Трубы в пучках 1 и 2 размещены в трубных решетках по вершинам равностороннего треугольника с шагом $S_1 = S_2^1 = 63,5$ мм, где S_1, S_2^1 - поперечный и диагональный шаг.

Средняя приведенная теплоотдача и потери давления воздуха в пучках 1 и 2 оказались совершенно идентичными, что является следствием недостаточной высоты рифлений для интенсификации теплоотдачи. Рифления утоплены в пограничном слое воздуха и ребро с аэродинамической точки зрения является гладким. Именно этим объясняется одинаковая потеря давления воздуха на пучках 1 и 2.

Средний коэффициент теплоотдачи и перепад давления воздуха на пучках 1 и 2 вычисляются по уравнениям, полученным в результате критериальной обработки опытных данных:

$$\alpha = 0,16(\lambda/d_0)Re^{0,59}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (1)$$

$$\Delta p = 62,7(\rho w^2)Re^{-0,32}, \text{ Па}, \quad (2)$$

где $Re = (wd_0)/\nu$ - число Рейнольдса;

w - средняя скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка, м/с;

λ - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

ρ - плотность воздуха, кг/м³;

ν - кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

Уравнения (1) и (2) действительны в интервале изменения числа $Re = (3...20) \cdot 10^3$, который характерен для эксплуатационных режимов теплообменников (калориферов, воздухоподогревателей, воздухоохлаждателей, маслоохлаждателей воздушных) из круглоребристых труб.

Известна также теплообменная труба [6] со спиральными круглыми ребрами одинаковой высоты, у которой периферийная часть при вершине каждого второго ребра выполнена разрезанной. Периферийная часть каждого разрезанного ребра представляет короткие пластинки с отогнутыми в противоположные стороны концами под некоторым углом к потоку воздуха, движущемуся в межреберных каналах. Отогнутые концы являются действенными (активными) интенсификаторами теплоотдачи трубы, разрушающими пограничный слой воздуха и создающими вихревое движение его. Тепловая эффективность такой трубы на 10...15 % выше гладкорребристой трубы до рассечки (разрезки) ребер. Шаг ребер труб промышленных теплообменников невелик и составляет $u = 2,3...3,5$ мм. Это ограничивает высоту разрезки ребра величиной не более 3 мм, чтобы не перекрыть полностью межреберные каналы и предотвратить резкое возрастание аэродинамического сопротивления и загрязнения межреберного пространства, приводящие к снижению тепловой эффективности. Высота разрезки явно недостаточная, при высоте ребер у теплообменников $h = 10...16$ мм и для достижения наибольшего энергетического эффекта их следует резать на высоту не менее $(1/3)h$. Несмотря на технологичность ее изготовления в крупносерийном производстве, отмеченный существенный недостаток тормозит широкое применение такой трубы в выпускаемых теплообменниках.

Наиболее близкой к заявляемой модели по технической сущности и достигаемому результату является оребренная труба [7], которая принята нами за прототип. Теплообменная труба имеет поперечные спиральные ребра разной высоты, а именно между ребрами, имеющими большую высоту, размещены ребра с меньшей высотой. Для интенсификации теплоотдачи высота малого ребра составляет $2/3$ высоты большого ребра и на одной из боковых поверхностей ребер выполнены кольцевые участки с радиальными рифлениями, чередующимися с гладкими участками. Несмотря на ряд преимуществ по сравнению с известными оребренными трубами (меньшее аэродинамическое сопротивление, сниженный расход материала оребрения, меньшая загрязняемость), такая труба обладает существенными недостатками: боковая поверхность кольцевого участка больших ребер, равная разности $(h_b - h_m)$ имеет пониженную интенсивность теплоотдачи вследствие уменьшенной скорости воздуха в этом сечении межреберного канала. Здесь h_b и h_m - соответственно высота большого и малого ребра. Рифления, вследствие их малой высоты и одностороннего расположения на боковой поверхности ребер, не вызывают интенсификацию теплоотдачи, что подтверждено экспериментально вышеприведенными результатами.

Задача полезной модели - интенсификация теплоотдачи турбулизацией потока при поперечном обтекании оребренной трубы, повышение ее тепловой эффективности и эксплуатационной надежности.

Поставленная задача решается тем, что в теплообменной трубе с поперечными круглыми ребрами разной высоты, в которой между ребрами большой высоты размещены ребра с меньшей высотой, но периферийный кольцевой участок ребер большой высоты шириной, равной разности между высотами большого и малого ребра, выполнен с радиально расположенными гофрами, высота которых не меньше толщины пограничного слоя воздуха на боковой поверхности ребра, а шаг гофров по окружности наружного диаметра ребра равен длине присоединения оторвавшихся вихрей от поверхности предыдущего к поверхности следующего ребра, при этом гофры при вершине имеют плавные удобообтекаемые очертания.

Сформулированные отличительные признаки приводят к возникновению следующих новых гидродинамических процессов, действие которых позволяет положительно решить

цели задачи. Дискретно расположенные на периферийном кольцевом участке ребер большой высоты гофры, высота которых превышает толщину пограничного слоя воздуха на боковой поверхности ребра, являются механическими прерывателями развития и разрушения пограничного слоя, тем самым уменьшая его толщину на участках боковой поверхности ребра между гофрами, снижается термическое сопротивление слоя и увеличивается конвективный тепловой поток от поверхности ребрения к воздуху. Гофры также являются генераторами вихрей, которые периодически отрываются от их поверхности и сносятся вниз по потоку воздуха, турбулизируя течение в пограничном слое и создавая вихревое движение воздуха в межреберном канале с повышенной турбулентностью, что дополнительно интенсифицирует теплоотдачу, а для обеспечения этого эффекта с наименьшими затратами энергии гофры при вершине имеют плавные удобообтекаемые очертания. Для создания режима постоянного генерирования вихрей гофрами последние располагаются по наружному диаметру ребра с шагом, равным расстоянию, на протяжении которого не происходит затухание вихрей в пограничном слое, обеспечивая высокий уровень турбулентности потока. Особенность гофров как интенсификаторов теплоотдачи заключается в разрушении пограничного слоя воздуха с обеих сторон поверхности ребра. Вихреобразование способствует самоочищению поверхности ребер от загрязнения и выносу его в ядро потока воздуха межреберных каналов.

Полезная модель поясняется фиг. 1, 2.

На фиг. 1 изображена часть теплообменной трубы; на фиг. 2 - разрез А - А на фиг. 1.

Теплообменная труба содержит несущую трубу 1, которая снабжена круглыми поперечными ребрами: ребрами 2 малой высоты, которые расположены между ребрами 3 большой высоты, причем периферийный кольцевой участок 5 шириной $(h_b - h_m)$ ребер большой высоты выполнен гофрированным. Высота h_r гофров 4 не меньше толщины пограничного слоя воздуха на боковой поверхности ребра большой высоты, а гофры при вершине имеют плавные удобообтекаемые очертания. Гофры радиально расположены по окружности ребра большой высоты с шагом s по наружному диаметру d ребра. Величина шага s гофров назначается равной длине присоединения оторвавшихся вихрей от поверхности предыдущего к поверхности следующего гофра. Ребра малой высоты расположены между ребрами большой высоты.

Теплообменная труба работает следующим образом. Внутри несущей трубы 1 подается греющий теплоноситель, который охлаждается и передает тепло через стенку несущей трубы ребрам 2 и 3 и ее наружной межреберной поверхности. Поток охлаждающего воздуха омывает теплообменную трубу снаружи перпендикулярно продольной оси и воспринимает переданное греющим теплоносителем тепло, нагреваясь при этом. Интенсификация теплоотдачи такой трубы обеспечивается разрушением пограничного слоя воздуха на боковой периферийной поверхности ребер большой высоты с созданием вихревого движения его в межреберных каналах за счет гофр, высота которых больше толщины пограничного слоя δ , т.е. $h_r > \delta$. Для ламинарного потока воздуха эту величину можно определить [8] согласно Блазиусу

$$\delta = 5,83(v \cdot d/w)^{0,5}, \quad (3)$$

а для турбулентного потока согласно Карману

$$\delta = 0,37d^{4/5}(v/w)^{1/4}. \quad (4)$$

Вихри, образующиеся при отрыве потока от гофр, также увеличивают турбулентность в межреберных каналах трубы, так как частично диффундируют в ядро потока, что дополнительно интенсифицирует теплоотдачу. Анализ соотношений (3) и (4) показывает, что высота гофр зависит от геометрических параметров ребер и гидродинамического режима эксплуатации теплообменника. Для различных теплообменных труб она будет разной.

Гофры ребра играют роль турбулизаторов. Экспериментально установлено [9], что максимальное увеличение теплоотдачи на 15...25% достигается при шаге гофров $s = (8...10)h_r$. В этом интервале шага вновь возникшая турбулентность за турбулизатором

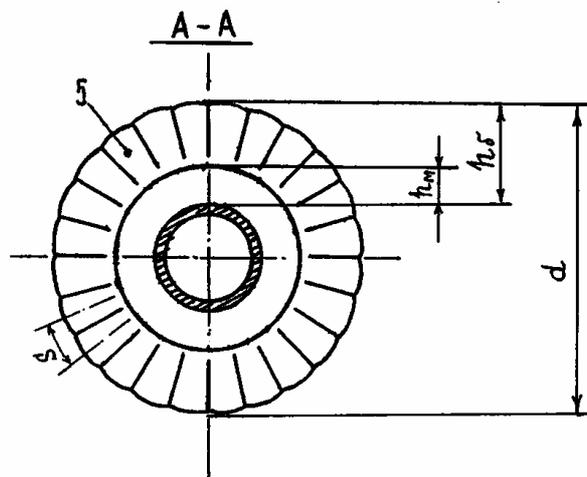
ВУ 2838 U 2006.06.30

из-за вихревого движения потока у твердой стенки благодаря оторвавшимся вихрям имеет наибольшее значение и поддерживается таковым на участке длиной от источника формирования вихрей до их присоединения к поверхности следующего по направлению движения потока турбулизатора (гофра), а именно эта длина и есть шаг гофров. По наружному диаметру ребра d его следует назначать $s = 10h_r$, а так как расположение гофров радиальное, то на диаметре $(d - 2h_m)$ шаг гофров также не выйдет за пределы оптимального значения $10h_r > s \geq 8h_r$. Эффект интенсификации теплоотдачи будет максимальным.

При высоте оставшейся части большого ребра, равной высоте малого ребра, назначаемой $h_m = (2/3)h_b$, КПД как этой части ребра, так и малого ребра близок к единице и эти ребра участвуют в теплоотдаче с высокой интенсивностью.

Повышение тепловой эффективности трубы достигается созданием гофр с плавными удобообтекаемыми очертаниями, которым присуще наименьшее аэродинамическое сопротивление среди иных форм турбулизаторов (треугольные, прямоугольные, трапециевидные), а интенсивность теплоотдачи не зависит от формы турбулизатора. Это многократно подтвержденный экспериментально факт. Создание гофрами - турбулизаторами вихревого движения воздуха в межреберных каналах способствует самоочищению ребер от осаждения загрязнений из-за выноса их в ядро потока. Загрязнение ребер с турбулизаторами оптимальных форм и геометрических параметров меньше загрязняемости гладких ребер, следовательно увеличивается эксплуатационная надежность теплообменной трубы, уменьшается частота отключения теплообменника на очистку теплообменной поверхности от загрязнения.

Полезная модель может быть использована проектно-конструкторскими институтами и специальными конструкторскими бюро заводов химического и коммунального машиностроения, заводами-изготовителями теплообменных ребренных труб, хладокомбинатами, нефтеперерабатывающими и химическими предприятиями, на которых эксплуатируется значительное количество газожидкостных теплообменников с пучками из ребристых труб, омываемых принудительным потоком воздуха.



Фиг. 2