

ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 7593

(13) U

(46) 2011.10.30

(51) МПК

F 28F 1/00 (2006.01)

F 28F 1/24 (2006.01)

F 28F 7/00 (2006.01)

(54)

ТЕПЛООБМЕННАЯ ТРУБА

(21) Номер заявки: u 20110185

(22) 2011.03.17

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

(72) Авторы: Кунтыш Владимир Борисо-
вич; Дударев Владимир Владимиро-
вич; Кунтыш Владимир Эрнестович;
Сухоцкий Альберт Борисович (ВУ)

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

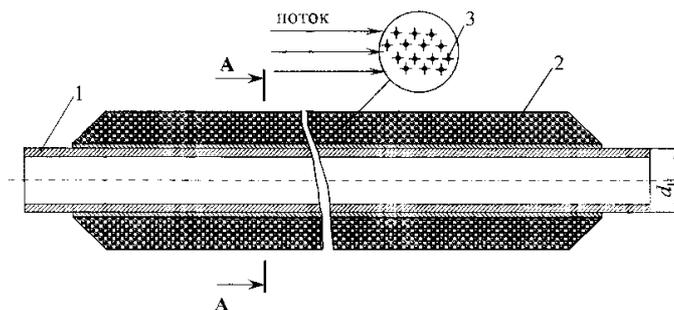
(57)

Теплообменная труба, содержащая несущую трубу круглого поперечного сечения и соединенные с ней продольные сплошные пластинчатые ребра желобковой формы, радиально расположенные на наружной поверхности несущей трубы, выполненные из теплопроводного материала, отличающаяся тем, что на всей боковой поверхности каждого ребра расположены в шахматном порядке сферические выемки такой глубины, при которой на противоположной поверхности этого ребра под выемкой возникают сферические выступы высотой, не меньшей толщины пограничного слоя движущегося в межреберных каналах теплоносителя, при этом на каждой паре смежных ребер сферические выемки одного ребра зеркально обращены к сферическим выступам другого ребра.

(56)

1. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. - М.: Энергия, 1977. - С. 316-319, 335-338.

2. Руководящий технический материал: Вспомогательное оборудование паросиловых установок. Расчет и проектирование теплообменников вязкой жидкости с поверхностью из продольно-ребренных труб (РТМ 108. 030. 115-77). - Л.: Издательский отдел НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, 1979. - С. 12-22.



Фиг. 1

ВУ 7593 U 2011.10.30

3. Бондаренко В.Т., Серебряков А.А., Свитко А.Л. Особенности технологии изготовления оребренных труб теплообменников типа ПМР // Энергомашиностроение. - 1978. - № 7, - С. 33-34.

4. Горобец В.А. Сравнительный анализ теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучков труб с оребрением различного типа. Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. - М.: Издательский дом МЭИ. - 2006. - С. 182-186.

5. Фраас А., Осцик М. Расчет и конструирование теплообменников. - М.: Атомиздат, 1971. - С. 188-191.

6. Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. - М. - Л.: Энергия, 1966. - С. 192-195.

7. Приходько П.М. Трубы с приваренным продольным желобковым оребрением. - Академия наук Украинской ССР: Институт электросварки им. Е.О. Патона. Информационное письмо № 44 (483), 1967. - 4 с.

8. Кремнев О.А., Зозуля Н.В., Хавин А.А. Продольнооребренные трубчатые поверхности для регенераторов и водоподогревателей ГТУ // Энергомашиностроение. - 1961. - № 1 (прототип).

9. Леонтьев А.И., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (утурбулентных) потоков в каналах энергоустановок // Известия РАН. - Энергетика. - 2005. - № 1. - С. 75-91.

10. Дилевская Е.В., Каськов С.И. Применение вихревой интенсификации теплообмена для повышения эффективности охладителей силовых электронных устройств. Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. - М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - С. 204-206.

11. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. - Казань: Изд-во Казан, гос. техн.ун-та, 1999. - С. 60-61, 111-114.

Полезная модель относится к поверхностным рекуперативным теплообменникам, у которых коэффициенты теплоотдачи по обеим сторонам теплопередающей поверхности различаются в несколько раз. Примерами таких теплообменников являются паровые мазутоподогреватели; подогреватели нефтепродуктов большой вязкости, хранящихся в резервуарах; водяные маслоохладители; регенераторы газотурбинных установок (ГТУ); промежуточные холодильники газовых компрессоров. Для выравнивания термического сопротивления с обеих сторон теплопередающей поверхности применяют увеличение площади поверхности по стороне с меньшей теплоотдачей, что снижает термическое сопротивление теплопередачи и увеличивает коэффициент теплопередачи со всеми исходящими положительными результатами. В перечисленных теплообменниках в качестве теплообменной (теплопередающей) поверхности применяют круглые трубы с продольными пластинчатыми ребрами из теплопроводного металла.

Известны [1] теплообменники "труба в трубе" с оребренной внутренней стальной трубой, имеющей прямые сплошные непрерывные продольные ребра, расположенные по окружности круглой трубы с внутренним диаметром 40,8 или 52,5 мм. Ребра обычно изготавливаются из стальных пластин, но могут быть выполнены и из более теплопроводного материала. Как правило, ребра имеют толщину порядка 0,9 мм и высоту 12,7 или 19 мм, привариваются либо припаиваются к внутренней трубе в количестве 24 или 36 штук. Поэтому внутреннюю трубу принято называть несущей. Такой способ соединения близок к гомогенному, для которого характерно отсутствие термического контактного сопротивления. Применение оребрения трубы увеличивает коэффициент теплопередачи, так как развитие теплоотдающей площади приводит к уменьшению термического сопротивления,

ВУ 7593 U 2011.10.30

а следовательно, площадь поверхности теплопередачи будет меньшей, теплообменник становится более компактным, сокращается его масса и длина.

Однако оребрение трубы сопровождается и негативными процессами. Продольные ребра на трубе образуют радиальные каналы, при движении в которых не происходит перемешивания теплоносителя, на боковой поверхности ребер в направлении движения возникает пограничный слой с непрерывно возрастающей толщиной, что понижает интенсивность теплоотдачи. При движении вязких теплоносителей пограничный слой ламинарный, в нем сосредоточено значительное термическое сопротивление теплоотдаче, кроме этого, по высоте канала существует градиент скорости, основание ребер омывается теплоносителем с меньшей скоростью в сравнении с поверхностью у вершины ребра. Эти явления ухудшают процесс теплоотдачи и относятся к неблагоприятным эффектам.

На тепловых электрических станциях нашли широкое применение подогреватели мазута ПМР [2] с поверхностью теплообмена из продольно-оребранных труб. Такие же трубы применяются и в охладителях масла типа МБР. Вязкая жидкость движется вдоль ребер. Несущие трубы наружного диаметра 16, 20, 24, 28, 32 и 38 мм выполняются стальными и к ним привариваются стальные ребра толщиной $0,5 \div 1,2$ мм корытообразной (желобковой) формы с высотой 7, 11, 15, 19 мм. Ребра в количестве $12 \div 24$ шт. равномерно размещены по окружности несущей трубы. Изготовление таких труб характеризуется высокой технологичностью и отработанностью всего процесса в серийном производстве [3]. Изготавливаются трубы как с гладкими непрерывными сплошными ребрами, которым присущи все те же недостатки, изложенные выше, так и с прерывистыми ребрами, полученными рассечкой продольных ребер на короткие участки длиной $15 \div 250$ мм с отгибкой их концов в противоположные стороны и образованием пластинок формы знака "интеграл". Также применяется просечка ребер с образованием прямоугольных отверстий с шагом $8 \div 25$ мм [2], так называемое продольное профилированное оребрение. Существует большое количество продольного оребрения, кроме описанного, конструктивные особенности которого обеспечивают интенсификацию теплоотдачи [4] путем срыва пограничного слоя на начальных участках его формирования, образованием отрывных зон, выравниванием градиента скорости теплоносителя по высоте радиального канала.

Интенсификация теплоотдачи на поверхности деформированного продольного ребра достигает $1,5 \div 1,7$ раза, но она сопряжена с опережающим ростом потерь давления теплоносителя, движущегося снаружи трубы в оребренных каналах, и повышением мощности, необходимой на прокачку теплоносителя.

В газотурбинных стационарных установках применяются трубчатые регенераторы [5, 6], в которых отдельные элементы поверхности регенератора представляют трубу с приварными [7] на наружной поверхности продольными сплошными гладкими пластинчатыми ребрами прямоугольного поперечного сечения желобковой формы. Из таких труб собираются трубные пучки, заключаемые в цилиндрический кожух (обечайку). Внутри несущих продольное оребрение труб направляется воздух высокого давления из компрессора, а в межтрубном пространстве кожуха в противоположном направлении движутся отходящие из турбины горячие газы низкого давления. Ребра омываются продольным движением газов, а тепловой поток от газов передается нагреваемому воздуху, поступающему в камеру сгорания газотурбинной установки.

Коэффициенты теплоотдачи по воздушной стороне, вследствие высокого давления, в $3 \div 5$ раз превышают таковые по газовой стороне. Для выравнивания термических сопротивлений теплоотдаче по сторонам трубы применено развитие площади поверхности со стороны с меньшей теплоотдачей.

Решение естественное и энергетически целесообразное, что позволяет улучшить габаритно-массовые показатели регенератора. Однако потенциальные возможности оребрения для интенсификации теплопередачи использованы не в полной мере, так как оребрение

относится к пассивным интенсификаторам теплообмена, а активные турбулизаторы отсутствуют.

За прототип [8] принята теплообменная поверхность, представляющая стальную трубу круглого поперечного сечения с приваренными на ее наружной поверхности равномерно расположенными продольными пластинчатыми стальными ребрами прямоугольной формы. Ребра сплошные, боковая поверхность гладкая. Применена новая высокопроизводительная технология [7] приварки ребер, обеспечивающих надежный тепловой контакт и улучшенное качество оребрения. Благодаря этому труба нашла промышленное применение в регенераторах ГТУ, водоподогревателях и других теплообменниках, утилизирующих тепло отработавших высокотемпературных газов. Параметры трубы и оребрения: наружный диаметр $d_n = 16$ мм; толщина стенки $\delta = 1$ мм; высота продольного ребра $h = 12$ мм; толщина ребра $\Delta = 0,4$ мм; на окружности несущей трубы расположено 6 желобковых (корытообразных) ребер. Применение оребрения позволило уменьшить в $2 \div 3$ раза расход труб на регенератор и заметно снизить его массу и занимаемый объем. Теплообменной поверхности прототипа присущи все те же недостатки теплоэнергетического характера, которые свойственны конструкциям проанализированных теплообменников с продольными пластинчатыми ребрами.

Задачей настоящей полезной модели является повышение энергетической эффективности теплообменной поверхности при сохранении эксплуатационной надежности.

Поставленная задача достигается тем, что теплообменная труба, содержащая несущую трубу круглого поперечного сечения и соединенные с ней продольные сплошные пластинчатые ребра желобковой формы, радиально расположенные на наружной поверхности несущей трубы, выполненные из теплопроводного материала, отличается тем, что на всей боковой поверхности каждого ребра расположены в шахматном порядке сферические выемки такой глубины, при которой на противоположной поверхности этого ребра под выемкой возникают сферические выступы высотой, не меньшей толщины пограничного слоя движущегося в межреберных каналах теплоносителя, при этом на каждой паре смежных ребер сферические выемки одного ребра зеркально обращены к сферическим выступам другого ребра.

Повышение энергетической эффективности теплообменной поверхности достигается лишь при использовании такого способа интенсификации теплоотдачи, при котором прирост теплоотдачи и гидравлического (аэродинамического) сопротивления обеспечивается при одинаковом или опережающем росте теплоотдачи в сравнении с ростом потерь давления движущегося теплоносителя. В настоящее время таким способом интенсификации теплоотдачи, удовлетворяющим условию наиболее энергетически благоприятного соотношения между увеличением теплоотдачи и сопротивлением в сравнении с этими показателями для поверхности теплообмена без воздействия интенсификации, является вихревой [9, 10], реализуемый нанесением на поверхность теплообмена сферических выемок [9], которые в периодических научных изданиях принято называть лунками [11]. Способ нанесения выемок (лунок) называют олунением, а поверхность теплообмена - олуненной поверхностью. Многочисленные экспериментальные исследования [9, 11] показывают, что такие углубления существенно интенсифицируют теплоотдачу (до $2 \div 4,5$ раз) при умеренном росте гидравлического сопротивления, что исключительно выгодно как энергетически, так и экономически. При обтекании потоком лунок возникают устойчивые крупномасштабные вихревые структуры типа смерча с вертикальной осью вращения, наблюдаемые как в ламинарном, так и турбулентном режимах течения. Вихри сносятся в пограничный слой, турбулизируют его и обновляют, значительно увеличивают теплоотдачу, но не проникают в ядро потока, что обеспечивает небольшой прирост сопротивления. Кроме этого, смерчеподобные вихри, образующиеся в лунках, препятствуют осаждению загрязнений из потока в них, очищают поверхность теплообмена.

BY 7593 U 2011.10.30

Технология нанесения сферических впадин (лунок) проста и высокопроизводительна, стоимость поверхности теплообмена увеличивается лишь на 3 ÷ 5 %. Процесс выдавливания (штамповки) лунок (лунки) завершается при появлении на противоположной стороне поверхности ребра под лункой сферического выступа требуемой высоты. В итоге на поверхности ребер образуется система дискретной шероховатости, при этом ее высота должна обеспечивать полное проявление шероховатости в зависимости от режима течения потока. Только в этом случае происходит интенсификация теплоотдачи с ростом гидравлического сопротивления.

Толщина пограничного слоя δ_c , формируемого на поверхности продольно обтекаемой гладкой пластины, которую представляет поверхность ребра, определяется по известным зависимостям [1, 6] Блазиуса для ламинарного и Кармана для турбулентного потоков. Для проявления действия шероховатости необходимо выполнять условие $h_B > \delta_c$, где h_B - высота сферического выступа. Интенсификация теплоотдачи на этой поверхности ребра обеспечивается разрушением и обновлением пограничного слоя, возникшими вихрями за выступом, которые отрываются и скатываются вдоль поверхности, генерируя дополнительную турбулентность в пограничном слое, что обеспечивает заметный прирост теплоотдачи. Оторвавшиеся вихри не диффундируют в основной поток, а значит, не способствуют квадратичному увеличению гидравлического сопротивления. Вихри от выступа очищают поверхность от загрязнения, что также имеет место на противоположной поверхности ребра, тем самым сохраняя эксплуатационную надежность теплообменной трубы (поверхности) в целом.

Шахматное расположение сферических интенсификаторов характеризуется большей энергетической эффективностью в сравнении с коридорной или иными комбинированными способами компоновки турбулизаторов. Это подобно компоновке гладких поперечно обтекаемых труб, решаемой в пользу шахматной для достижения наибольшей тепловой эффективности.

Анализ общей картины динамики течения продольного потока в каждом межреберном канале трубы указывает на наибольшую эффективность интенсификации теплоотдачи при зеркальном расположении сферических выступов (шероховатости) на боковой поверхности ребра сферическим выемкам на поверхности смежного ребра этого межреберного канала.

В заявленной конструкции теплообменной трубы особенностью является то, что обеспечена одновременная двухсторонняя интенсификация теплоотдачи при более медленном росте потерь давления движущегося теплоносителя, чему отвечает максимальный достижимый положительный эффект энергетической эффективности со всеми исходящими из этого факта технико-экономическими преимуществами новых теплообменников с предложенной конструкцией в качестве энергосберегающей поверхности теплообмена для газо-газовых, жидкостно- и парожидкостных аппаратов.

Таким образом, в заявленной теплообменной трубе полностью решена сформулированная задача.

Полезная модель поясняется фиг. 1, 2, 3. На фиг. 1 изображен общий вид спереди теплообменной трубы; на фиг. 2 - то же, поперечное сечение по А-А; на фиг. 3 дан фрагмент в увеличенном масштабе поперечного сечения одной сферической впадины (лунки) со сферическим выступом на продольном ребре.

Теплообменная труба состоит из круглой несущей трубы 1, преимущественно стальной, с приваренными к ней по основанию продольными прямыми сплошными пластинчатыми ребрами 2 желобкового поперечного сечения, на одной боковой поверхности каждого ребра нанесены сферические выемки (впадины-лунки) 3, а на противоположной боковой стороне каждого ребра под выемкой образован сферический выступ 4. Выступ(пы) возникает(ют) одновременно с нанесением впадины за одну технологическую операцию, например штамповку.

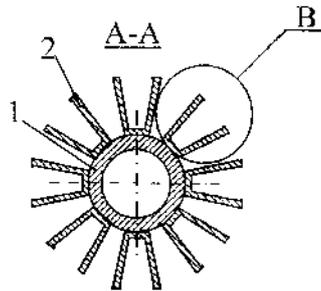
ВУ 7593 U 2011.10.30

Теплообменная труба работает следующим образом. Теплоноситель с большим коэффициентом теплоотдачи, например сжатый воздух высокого давления после компрессора, направляют внутрь несущей трубы 1, а второй теплоноситель с меньшей теплоотдачей, в частности продукты сгорания топлива (мазут, дизельное топливо и т.п.) из газовой турбины, движется снаружи теплообменной трубы в продольном направлении. Лунки 3 и сферические выступы 4 на боковой поверхности ребер 2 интенсифицируют теплоотдачу вихревым способом при пропорциональном или отстающем росте потерь давления теплоносителя. По нашим оценкам, применительно к параметрам ребер регенератора ГТУ энергетическая эффективность аппарата увеличится в $1,4 \div 1,8$ раза в зависимости от режима течения и скорости потока.

Предпочтительно применять выемки (лунки) относительной глубины $h_c/d_c \approx 0,4 \div 0,5$, а шаг нанесения сферических выемок должен обеспечивать их плотность $35 \div 55$ % от величины площади гладкой поверхности ребра. Здесь h_c - глубина выемки, d_c - ее диаметр.

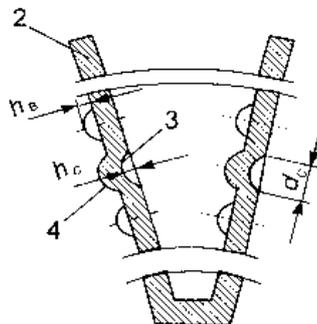
Следует отметить, что нанесение лунок (сферических выемок) и одновременное возникновение сферических выступов увеличивает теплоотдающую площадь трубы, что является также благоприятным фактором, при этом не требуется дополнительный расход металла на приращение этой площади.

Применять теплообменную трубу целесообразно на предприятиях-изготовителях энергетического и химического машиностроения.



Фиг. 2

*Вид В
увеличено*



Фиг. 3