

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 9299

(13) С1

(46) 2007.06.30

(51) МПК (2006)

F 28D 1/00,

G 01K 17/00

(54) **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТРУБЕ СО СПИРАЛЬНО-НАВИТЫМИ
ЗАВАЛЬЦОВАННЫМИ РЕБРАМИ**

(21) Номер заявки: а 20050057

(22) 2005.01.19

(43) 2006.08.30

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

(72) Авторы: Кунтыш Владимир Борисович;
Санкович Евгений Савельевич;
Петрович Олег Васильевич; Клепацкий
Петр Михайлович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образо-
вания "Белорусский государственный
технологический университет" (ВУ)

(56) Кунтыш В.Б. и др. Исследование кон-
тактного термического сопротивления
биметаллических оребренных труб АВО
// Изв. вузов. Лесной журнал. - 1980. -
№ 5. - С. 121-126.

ВУ а 20020584, 2004.

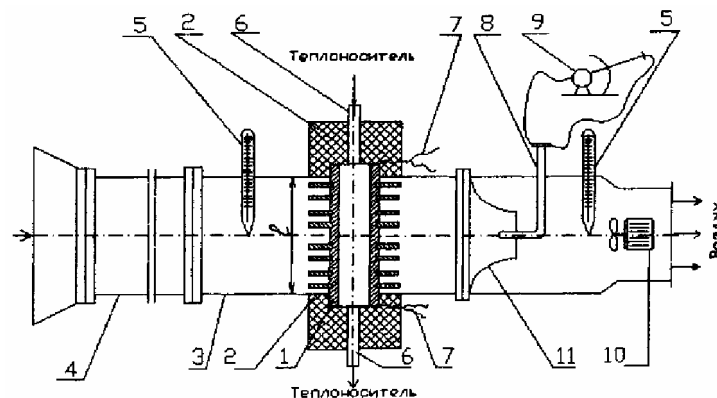
RU 2211422 С2, 2003.

SU 1377558 А1, 1988.

SU 1589021 А1, 1990.

(57)

Способ определения термического контактного сопротивления в биметаллической трубе со спирально-навитыми завальцованными ребрами, при котором трубу или ее натурный образец оснащают термодатчиками, торцевыми теплоизолирующими втулками и устанавливают в рабочем участке аэродинамического стенда, подают в трубу изотермический теплоноситель, создают при помощи вентилятора поперечно обдувающий трубу воздушный поток, а при достижении стационарного теплового состояния трубы определяют передаваемый трубой воздуху тепловой поток, измеряют посредством термодатчиков среднюю температуру поверхности стенки под основанием завальцованных ребер и среднюю температуру воздуха в рабочем участке аэродинамического стенда, **отличающийся**



Фиг. 1

ВУ 9299 С1 2007.06.30

тем, что по измеренным при одинаковой скорости воздуха тепловому потоку, средней температуре поверхности стенки трубы под основанием завальцованных ребер и средней температуре воздуха в рабочем участке аэродинамического стенда определяют суммарный приведенный коэффициент теплоотдачи биметаллической трубы, затем в рабочий участок аэродинамического стенда помещают монометаллическую ребристую трубу с идентичными геометрическими параметрами и при одинаковых условиях испытания выполняют измерения тех же параметров для монометаллической трубы, определяют суммарный приведенный коэффициент теплоотдачи монометаллической трубы, а в результате сравнения суммарных приведенных коэффициентов теплоотдачи идентичных по геометрическим параметрам биметаллической и монометаллической ребристых труб, исходя из аналитической связи между их тепловыми параметрами, определяют численное значение термического контактного сопротивления в биметаллической трубе со спирально-навитыми завальцованными ребрами.

Изобретение относится к способам тепловых испытаний и предназначено для определения численного значения термического контактного сопротивления теплообменных труб со спирально-навитыми завальцованными ребрами.

Теплообменная труба со спирально-навитыми завальцованными ребрами состоит из гладкой несущей трубы, в стенке которой накатана винтовая канавка небольшой глубины с последующей укладкой в нее ленты прямоугольного поперечного сечения и завальцовкой ее материалом несущей трубы закатным роликом. Вследствие обжатия ленты образуются ребра прямоугольного поперечного сечения, механически соединенные со стенкой несущей трубы. В трубах отсутствует гомогенная (металлургическая) связь ребер со стенкой, и их принято называть биметаллическими ребристыми трубами (БРТ). Толщина стенки в промышленных БРТ составляет $1,5 \div 2,5$ мм, а глубина завальцовки основания ребра $h_1 \approx 0,3 \div 0,5$ мм. Материальное исполнение несущих труб - преимущественно углеродистые стали, но также применяются нержавеющей стали, латунь, мельхиор, а для ребер используются высокотеплопроводные материалы, как правило алюминий и его сплавы. Толщина исходной ленты для образования ребер порядка 0,4 мм.

Трубы с навитыми завальцованными ребрами применяются в рекуперативных теплообменниках (аппаратах) воздушного охлаждения топливно-энергетического комплекса, в нефтехимической, химической, пищевой промышленности, в калориферах для нагрева воздуха, в конденсаторах и испарителях холодильных установок.

При теплопередаче в зоне соприкосновения пары "ребро-стенка" из-за несовершенства механического контакта происходит искривление линий теплового потока, возникает температурный скачок и, как следствие, появляется термическое контактное сопротивление (ТКС), величина которого зависит от физико-механических свойств контактируемых металлов, температуры, механического давления (при закатке) и среды в контактной зоне, направления теплового потока. Учет влияния этих факторов на величину ТКС не поддается надежному теоретическому расчету. Поэтому основное направление решения задачи в настоящее время - это разработка и применение способов экспериментального определения численных значений ТКС для конкретного типоразмера БРТ.

Коэффициент теплопередачи трубы со спирально-навитыми завальцованными ребрами, $Вт/(м^2 \cdot К)$:

$$K = (R_1 + R_2 + R_K + R_3)^{-1}, \quad (1)$$

где R_1, R_2, R_3 - термические сопротивления теплоотдачи с внутренней стороны стенки и с внешней ребренной стороны трубы, $м^2 \cdot К/Вт$;

R_K - термическое контактное сопротивление завальцованных ребер.

Величина, обратная ТКС, называется тепловой проводимостью контакта $\alpha_K = 1/R_K$, $Вт/(м^2 \cdot К)$.

ВУ 9299 С1 2007.06.30

Надежность расчета коэффициента теплопередачи непосредственно зависит от точности и достоверности ТКС.

Площадь поверхности теплопередачи теплообменника, m^2 :

$$F = Q / (K \cdot \Delta t_{cp}), \quad (2)$$

где Q - тепловой поток, Вт;

Δt_{cp} - средний температурный напор, К.

При одинаковых условиях из (2) следует, что $F = f(R_K)$. Следовательно, эксплуатационная тепловая надежность теплообменника прямым образом зависит от достоверности и точности значения ТКС оребренной трубы.

Наиболее известный способ экспериментального определения численных значений ТКС [1] сводится к измерению температурного перепада Δt_K , °С, в стационарном тепловом режиме при прохождении через два контактирующих плоскопараллельных торца теплового потока постоянной плотности q_K , Вт/ m^2 . Способ разработан для исследования ТКС при аксиальном направлении теплового потока через опытные образцы большой толщины сплошного поперечного сечения цилиндрической и прямоугольной формы. Соединение образцов в месте механического контакта является разъемным, что не вызывает затруднений для правильной установки спаев термодатчиков. Температура в плоскости контакта замеряется термодатчиками, диаметр электродов которых при лабораторных исследованиях составляет $0,1 \pm 0,15$ мм. Величина ТКС, $m^2 \cdot K / Вт$, рассчитывается по данным прямых измерений, непосредственно полученных в опыте:

$$R_K = \Delta t_K / q_K. \quad (3)$$

Недостатком способа является невозможность получения достоверных и надежных результатов по ТКС для тонкостенных образцов из-за ослабления контактного давления ввиду нарушения сплошности образцов при закладке спаев термодатчиков, преимущественное применение для разъемных соединений.

Известны способы [2, 3] контроля качества механического соединения в БРТ, базирующиеся на прямой зависимости одного из контролируемых параметров, в частности величины подогрева воздуха трубой или темпа ее охлаждения в окружающем воздухе, от величины ТКС. Однако оба способа не позволяют определить численное значение R_K для любой теплообменной БРТ, а лишь констатировать факт хорошего, удовлетворительного или неудовлетворительного (брак) механического соединения оребренной оболочки со стенкой по результату сравнительного сопоставления значения контролируемого параметра трубы серийного изготовления со значением этого параметра эталонной трубы при одинаковых условиях теплового испытания.

Наиболее близким к заявленному по технической сущности и достигаемому результату является способ [4], который принят нами за прототип. Отрезок промышленной БРТ оснащают термодатчиками для измерения средних температур наружной поверхности несущей трубы и внутренней поверхности цилиндрической оребренной оболочки, имеющих неразъемный механический контакт, помещают внутрь рабочего участка аэродинамического стенда, подают внутрь трубы греющий изотермический теплоноситель, включают вентилятор и обдувают трубу снаружи перпендикулярным потоком воздуха с измерением его температуры и скорости, а при достижении стационарного теплового состояния трубой одновременно измеряют тепловой поток Q , передаваемый трубой воздуху, и средние температуры контактируемых поверхностей, по которым рассчитывают температурный перепад Δt_K , и далее по формуле (3) вычисляют значения R_K , при этом

$$q_K = Q / F_K, \quad (4)$$

где $F_K = \pi d_K l$ - геометрическая (номинальная) площадь контактирования, m^2 ;

$d_K = d_H$ - диаметр цилиндрической контактной зоны, равный наружному диаметру несущей трубы, м;

l - длина оребренной части отрезка трубы, м.

ВУ 9299 С1 2007.06.30

Отрезок трубы теплоизолирован с противоположных концов, что обеспечивает радиальное направление теплового потока.

Недостатками этого способа являются невозможность применения для определения ТКС контактируемых цилиндрических поверхностей с тонкими стенками, толщина которых или одной из них одного порядка с диаметром электродов термодатчиков, уменьшение контактного давления против начального по условиям заводского изготовления ребристой оболочки с несущей стенкой ввиду нанесения радиальных резов (пазов) шириной $0,6 \pm 0,8$ мм, длиной 45 ± 60 мм ребер и стенки оболочки с диаметрально противоположных сторон БРТ и с противоположных концов испытываемого отрезка; сложность, трудоемкость и значительные затраты времени на подготовку образца к исследованию.

Задача изобретения - повышение точности, надежности и достоверности определения термического контактного сопротивления за счет проведения тепловых испытаний в одинаковых условиях при неизменных геометрических параметрах трубы или ее натурального образца промышленной БРТ и монометаллической ребристой трубы с материальным исполнением, идентичным металлу ребер натурального образца.

Задача достигается тем, что труба или ее натуральный образец оснащают термодатчиками, торцовыми теплоизолирующими втулками и устанавливают в рабочем участке аэродинамического стенда, подают в трубу изотермический теплоноситель, создают при помощи вентилятора поперечно обдувающий трубу воздушный поток, а при достижении стационарного теплового состояния измеряют посредством термодатчиков среднюю температуру поверхности стенки под основанием завальцованных ребер и среднюю температуру воздуха в рабочем участке аэродинамического стенда.

Предлагаемый способ отличается тем, что по измеренным при одинаковой скорости воздуха теплового потока средней температуре поверхности стенки трубы под основанием завальцованных ребер и средней температуре воздуха в рабочем участке аэродинамического стенда определяют суммарный приведенный коэффициент теплоотдачи биметаллической трубы, затем в рабочий участок аэродинамического стенда помещают монометаллическую ребристую трубу с идентичными геометрическими параметрами и при одинаковых условиях испытания выполняют измерения тех же параметров для монометаллической трубы, определяют суммарный приведенный коэффициент теплоотдачи монометаллической трубы, а в результате сравнения суммарных приведенных коэффициентов теплоотдачи идентичных по геометрическим параметрам биметаллической и монометаллической ребристых труб, исходя из аналитической связи между их тепловыми параметрами, определяют численное значение термического контактного сопротивления в биметаллической трубе со спирально-навитыми завальцованными ребрами.

Изобретение поясняется фиг. 1-4.

На фиг. 1 изображена принципиальная схема аэродинамического стенда, реализующего предлагаемый способ, продольный разрез; на фиг. 2 - труба со спирально-навитыми завальцованными ребрами, продольный разрез; на фиг. 3 - монометаллическая ребристая труба-аналог, продольный разрез; на фиг. 4 - результаты тепловых испытаний трубы с завальцованными ребрами и монометаллической ребристой трубы-аналога, представленных в безразмерной форме в логарифмических координатах.

Аэродинамический стенд (фиг. 1) состоит из трубы 1 со спирально-навитыми завальцованными ребрами, теплоизолирующих втулок 2, рабочего участка 3, стабилизирующего участка 4, лабораторных термометров 5 для измерения средней температуры воздуха перед и за трубой, патрубков 6 для подвода и отвода теплоносителя, термодатчиков 7 для измерения средней температуры поверхности стенки под основанием ребер, трубки Прандтля 8 для измерения динамического напора воздуха, регистрирующего прибора 9 для динамического напора воздуха, вентилятора 10, суживающегося сопла 11.

Труба 1 со спирально-навитыми завальцованными ребрами (фиг. 2) состоит из гладкой несущей трубы 12 и навитых завальцованных ребер 13. Перед тепловыми испытаниями в

ВУ 9299 С1 2007.06.30

стенке несущей трубы устанавливают термодатчики 7 и с противоположных концов надевают теплоизолирующие втулки 2, которые здесь не изображены. Труба характеризуется следующими геометрическими параметрами: наружным диаметром ребер d , их высотой, шагом и толщиной соответственно h , s , Δ , глубиной завальцовки ребра h_1 , наружным диаметром несущей трубы d_H , ее внутренним диаметром $d_{вн}$ и толщиной стенки δ . Высота оребренной части трубы l .

Монометаллическая (фиг. 3) ребристая труба-аналог 14 имеет те же геометрические параметры ребер, что и труба со спирально-навитыми завальцованными ребрами, но у нее d_H - внутренний диаметр ребер у их основания. Труба также перед испытаниями оснащается термодатчиками 7 и теплоизолирующими втулками 2.

Определение термического контактного сопротивления предлагаемым способом осуществляется следующим образом.

Трубу 1 с навитыми завальцованными ребрами, оснащенную термодатчиками 7 и теплоизолирующими втулками 2, устанавливают в центре рабочего участка 3 аэродинамического стенда. Высота l оребренной части трубы равна высоте рабочего участка. Подают внутрь трубы через один из патрубков 6 изотермический теплоноситель, например сухой насыщенный водяной пар. Включают вентилятор 10, который всасывает воздух из помещения и направляет в стабилизирующий участок 4 и далее в рабочий участок, в котором он охлаждает трубу, обтекая ее снаружи поперечным потоком, при этом сам нагревается, и далее выводится наружу из стенда. Тепловой поток к воздуху передается конденсирующимся внутри трубы паром, конденсат которого отводится одним из патрубков 6. При достижении стационарного теплового состояния определяют тепловой поток, замеряют термодатчиками 7 среднюю температуру поверхности стенки под основанием ребер, лабораторными термометрами 5 - средние температуры воздуха перед трубой и за ней. Применение термометров возможно при равномерных температурных полях потока воздуха в измеряемых сечениях, что обеспечивается соответствующей длиной стабилизирующего участка и существенным поджатием потока сужающимся соплом 11. Благодаря поджатию потока в выходном сечении сопла формируется также равномерное поле скоростей воздуха, поэтому в качестве датчика динамического напора воздуха применяется трубка Прандтля 8 с регистрирующим прибором 9, например микроманометром ММН-240. В процессе температурных и тепловых измерений скорость воздуха в рабочем участке поддерживается постоянной, что контролируется по микроманометру 9. Теплоизолирующие втулки обеспечивают передачу тепла к воздуху в радиальном направлении, предотвращая аксиальный отвод.

По выполненным замерам вычисляют суммарный приведенный коэффициент теплоотдачи биметаллической трубы, включающий тепловую проводимость механического контакта завальцованных ребер со стенкой, $Вт/(м^2 \cdot К)$:

$$\alpha' = \frac{Q'}{F(t'_{ст} - t'_2)}, \quad (5)$$

где Q' - тепловой поток, передаваемый трубой воздуху, Вт;

$F = \pi d_H l$ - площадь теплоотдающей поверхности трубы, $м^2$;

$t'_{ст}$ - средняя температура поверхности стенки трубы под основанием завальцованных ребер, $^{\circ}С$;

t'_2 - средняя температура воздуха перед трубой, $^{\circ}С$.

Коэффициент оребрения трубы со спиральными круглыми ребрами:

$$\phi = 1 + \frac{2h}{s d_H} (d_H + h + \Delta). \quad (6)$$

Далее, соблюдая изложенный порядок операций, выполняют в одинаковых условиях тепловые испытания монометаллической ребристой трубы-аналога 14, по данным которых определяют приведенный коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$:

ВУ 9299 С1 2007.06.30

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_{\text{СТ}} - t'_2)}, \quad (7)$$

где Q - тепловой поток, передаваемый трубой-аналогом воздуху, Вт;

$t_{\text{СТ}}$ - средняя температура наружной поверхности трубы-аналога под основанием ребер, °С.

Затем в результате сравнения значений α' и α определяют численное значение ТКС R_K , м²·К/Вт, трубы с завальцованными ребрами исходя из аналитической связи между указанными тепловыми параметрами:

$$\frac{1}{\alpha' \phi} = \frac{1}{\alpha \phi} + R_{\hat{E}} + \frac{h_1}{\lambda_{\text{СТ}}}, \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{СТ}}$ - коэффициент теплопроводности стенки трубы с завальцованными ребрами, Вт/(м·К). Возможные значения $h_1/\lambda_{\text{СТ}}$ на три порядка меньше значений $1/(\alpha \cdot \phi)$. Поэтому в (8) с погрешностью, не превышающей 0,1 %, можно пренебречь членом $h_1/\lambda_{\text{СТ}}$. Тогда численное значение ТКС на основании тепловых испытаний труб при условии одинаковой скорости воздуха $w = \text{const}$:

$$R_K = \frac{1}{\alpha' \phi} - \frac{1}{\alpha \phi} = \frac{1}{\phi} \left(\frac{1}{\alpha'} - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (9)$$

Для распространения результатов тепловых испытаний единичных образцов труб на группу геометрически подобных представим соотношение (9), согласно теории подобия и теплового моделирования в виде, сравнительного сопоставления безразмерных чисел подобия:

$$R_K = \left[\frac{1}{\phi} \left(\frac{1}{Nu'} - \frac{1}{Nu} \right) \right] \frac{d_H}{\lambda}, \quad (10)$$

которые действительны при $Re = \text{const}$, что адекватно $w = \text{const}$.

Числа подобия вычисляются как

$Nu' = \frac{\alpha' d_H}{\lambda}$ - число Нуссельта для трубы с завальцованными ребрами;

$Nu^n = \frac{\alpha d_H}{\lambda}$ - то же для монометаллической трубы-аналога;

$Re = \frac{w d_H}{\nu}$ - число Рейнольдса в рабочем участке,

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

ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Значения λ и ν принимаются по средней температуре воздуха в рабочем участке, равной полусумме средних температур воздуха перед и за трубой.

Таким образом, при численном определении ТКС в трубе со спирально-навитыми завальцованными ребрами предлагаемый способ не нарушает целостности и сплошности ребер в соответствии с принятой технологией и промышленным оборудованием при серийном производстве, что обеспечивает реализацию одной из целей способа - достоверность и надежность полученных значений, а точность достигается установкой термодатчиков в отверстия диаметром 0,6÷0,8 мм, просверленные в стенке трубы на длину 40÷60 мм под основание ребер, при этом не нарушается механическая прочность соединения их со стенкой. Спаи термодатчиков и отверстия закрываются высокотеплопроводным металлом, например свинцом. Расположение отверстий и вывод электродов осуществляется вдоль изотермической поверхности, что исключает искажение замеров спаем.

ВУ 9299 С1 2007.06.30

В заключение выполнена экспериментальная проверка способа. Определили численное значение ТКС со спирально-навитыми завальцованными ребрами серийно изготавливаемых на ЗАО "ОКТЯБРЬСКХИММАШ" (Республика Башкортостан) для теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения. Геометрические параметры ребер и трубы: $d = 57$ мм; $h = 16$ мм; $s = 2,54$ мм; $\Delta = 0,35$ мм; $d_H = 25$ мм; $d_{BH} = 20$ мм; $\delta = 2,5$ мм; $h_1 = 0,3$ мм; $\varphi = 21,05$. Несущая гладкая труба выполнена из Ст. 10, а навитые ребра - из алюминиевой ленты АД1М. Тепловые испытания проводились с образцом натурной трубы, высота оребренной части которой $l = 400$ мм.

Монометаллическая труба-аналог идентичных геометрических параметров изготовлена из алюминия АД1М механическим способом (токарной обработкой).

Для тепловых испытаний использовали аэродинамический стенд с поперечным сечением в свету рабочего участка 400×90 мм. Вынужденный поток воздуха создавался центробежным вентилятором Ц-4-70 № 8 производительностью $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ с напором 1000 Па. Регулирование расхода воздуха осуществлялось заслонкой. Датчиком динамического напора воздуха являлась трубка Прандтля с диаметром носика 10 мм, соединенная с микроманометром ММН-240, температуры $t'_{ст}$ и $t_{ст}$ замерялись медь-константановыми термопарами с диаметром проводов 0,1 и 0,16 мм. Обогрев труб осуществляли пароэлектрическим способом кипящей водой с температурой ≈ 100 °С. В процессе испытаний поддерживали температуру воздуха перед трубой $t_2' = 26,5; 26; 25$ °С. Опыты проводились при трех значениях скорости воздуха в сжатом поперечном сечении рабочего участка $w = 3,11; 6,20$ и $12,38$ м/с, которым соответствовали числа $Re = 5000, 10000$ и 20000 . По замерам определили для каждой скорости воздуха сопряженные значения приведенных коэффициентов теплоотдачи $\alpha' = 25,53; 36,1$ и $51,0$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$), которым соответствуют значения $Nu' = 24,61; 34,80; 49,21$.

Испытания трубы-аналога позволили получить следующие данные $\alpha = 31,72; 46,77; 69,76$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$), которым соответствуют $Nu = 30,62; 45,15; 67,34$, в итоге, используя соотношение (9), определили значения $R_K = 3,5 \cdot 10^{-4}; 2,89 \cdot 10^{-4}$ и $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. О достоверности R_K можно судить по результатам сравнения со значениями R_K [2.4] для биметаллической трубы с накатанными ребрами. Такие трубы имеют большую площадь механического контакта с поверхностью несущей трубы по сравнению с этой характеристикой завальцованных ребер. Поэтому ТКС у них должно быть меньшим при качественном изготовлении, что полностью согласуется с результатами наших тепловых испытаний.

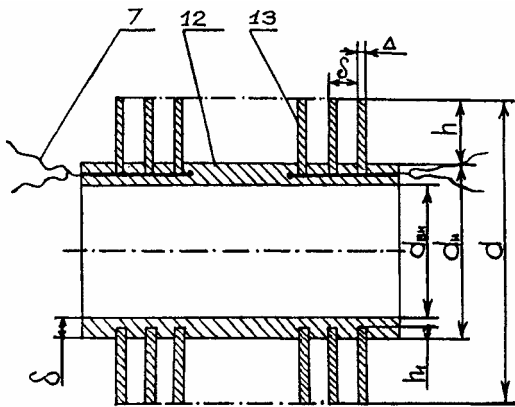
На фиг. 4 в логарифмических координатах нанесены опытные значения чисел Nu' , обозначенных знаком (+), и Nu с условным обозначением знаком (o) для сопряженных значений Re . Функциональные зависимости $Nu' = f(Re)$ и $Nu = f(Re)$ являются степенными, поэтому в логарифмических координатах они аппроксимируются прямыми линиями, проходящими через опытные точки со знаками +, o. Подобное представление результатов испытаний расширяет диапазон их применимости, уменьшает трудозатраты в $1,8 \div 2,1$ раза и энергозатраты в $2,7 \div 3,1$ раза, повышает производительность предлагаемого способа в $2 \div 2,5$ раза, так как позволяет определить значения ТКС для любого промежуточного значения скорости воздуха внутри границ функциональных зависимостей без выполнения сравнительных тепловых испытаний.

Способ может быть использован научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими институтами, проектирующими и разрабатывающими нормативные материалы тепловых расчетов теплообменной аппаратуры из оребренных труб, заводами-изготовителями теплообменников воздушного охлаждения из труб с завальцованными ребрами, нефтеперерабатывающими и химическими предприятиями, в технологических процессах которых эксплуатируется большое количество таких теплообменников.

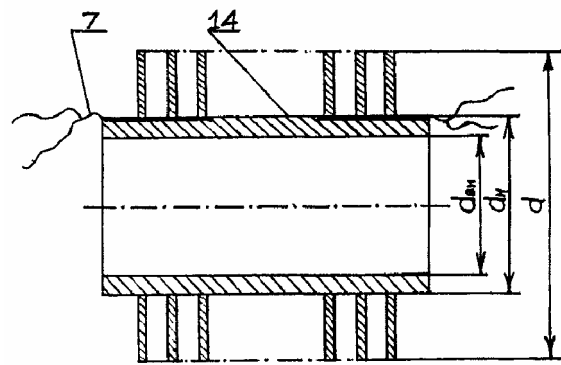
ВУ 9299 С1 2007.06.30

Источники информации:

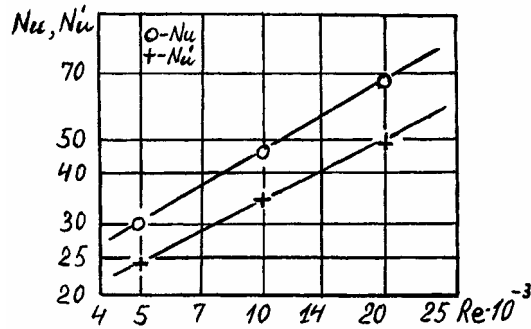
1. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - М.: Энергия, 1971. - С. 98-111.
2. А.с. СССР 1236298, МПК⁴ F 28D 1/00, G 01K 17/08, 1986.
3. А.с. СССР 1601492, МПК⁴ F 28D 1/00, 1990.
4. Кунтыш В.Б., Пиир А.Э., Федотова Л.М. Исследование контактного термического сопротивления биметаллических оребренных труб аппаратов воздушного охлаждения//Изв. вузов. Лесной журнал. - 1980. - № 5. - С. 121-126 (прототип).



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4