

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 12063

(13) С1

(46) 2009.06.30

(51) МПК (2006)

F 28D 1/00

G 01K 17/00

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МАТЕРИАЛА ОРЕБРЕНИЯ В ИЗГОТОВЛЕННОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ ТРУБЕ

(21) Номер заявки: а 20080197

(22) 2008.02.21

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

(72) Авторы: Кунтыш Владимир Бори-
сович (ВУ); Дударев Владимир
Владимирович (ВУ); Самородов
Александр Викторович (RU); Ро-
щин Сергей Павлович (RU)

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

(56) Термодинамика и теплопередача: Ла-
бораторные работы (практикум) по
курсу.- Минск: МВД РБ. Высшее по-
жарно-техническое училище, 1994.- С.
58-64.

SU 270295, 1970.

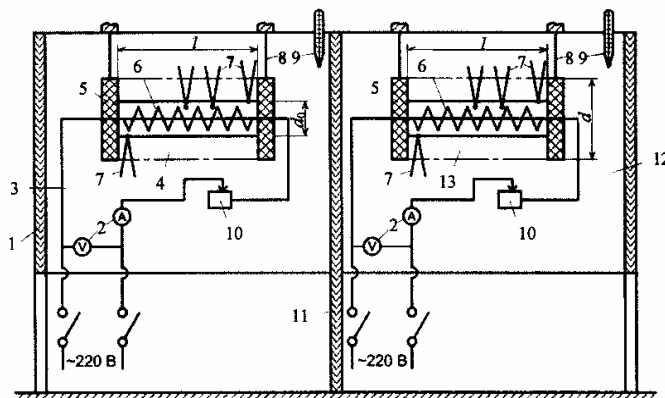
SU 748150, 1980.

SU 419741, 1974.

SU 467241, 1975.

(57)

Способ определения степени черноты материала оребрения в изготовленной теплообменной трубе, при котором испытуемую теплообменную трубу промышленной длины или ее укороченный натуральный образец и выбранную из этой же партии в качестве эталонной теплообменную трубу идентичных испытуемой геометрических параметров и материального исполнения, снаружи покрытую тонким слоем копоти, оснащают термодатчиками для измерения средней температуры поверхности стенки по основанию ребер труб и внутри источниками теплоты - электрическими нагревателями, мощности которых регулируют независимо друг от друга, торцовыми теплоизолирующими втулками, обе трубы располагают друг относительно друга на одной горизонтальной оси или параллельных



Фиг. 2

осях, подают напряжение на электрические нагреватели труб и по достижении стационарного теплового состояния измеряют подводимую к каждой трубе электрическую мощность и температуру воздуха, регистрируют показания термодатчиков для определения средней температуры поверхности стенки труб, определяют для каждой трубы суммарный тепловой поток, переданный воздуху излучением и свободной конвекцией, для эталонной трубы вычисляют тепловые потоки излучением и конвекцией, причем испытываемую и эталонную трубы подвешивают на растяжках в прямоугольной камере, которую разделяют вертикальной стенкой на два равных отсека по одному для каждой трубы со свободными входом снизу и выходом сверху окружающего воздуха, внутри отсеков измеряют температуру воздуха, подают на электрические нагреватели труб электрическую мощность ряда значений, полностью охватывающих исследуемый интервал изменения температуры поверхности стенки труб, и для каждого из значений подводимой электрической мощности определяют величину торцовых потерь теплоты для соответствующей разности средних температур "поверхность стенки трубы - воздух", по которым строят соответствующие графики изменения торцовых потерь для труб, затем для каждого теплового режима нагрева труб, соответствующего подводимой электрической мощности, по измеренным для каждой из труб разности средних температур "поверхность стенки трубы - воздух" и суммарному тепловому потоку вычисляют суммарный приведенный коэффициент теплоотдачи испытываемой трубы, а по тепловому потоку конвекцией эталонной трубы - приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией для этой трубы, далее для каждой трубы и соответствующих тепловых режимов вычисляют ряд значений безразмерных чисел подобия Нуссельта Nu и Релея Ra , по которым строят графики зависимости $Nu = f(Ra)$ для обеих труб, после чего их условно разделяют линией, параллельной оси ординат, при некотором значении $Ra' = const$, которому соответствует одинаковое значение средней температуры поверхности стенки труб, находят из графиков значения Nu' для испытываемой и эталонной труб, разность между которыми равна значению числа $Nu'_л$ потока излучением для испытываемой трубы, используя которое вычисляют коэффициент теплоотдачи излучением этой трубы, далее определяют тепловой поток излучением испытываемой трубы по найденному значению коэффициента теплоотдачи излучением и разности средних температур "поверхность стенки трубы - воздух" для принятого значения Ra' , после чего, используя аналитическую связь теплового потока излучением с приведенной степенью черноты, находят численное значение приведенной степени черноты для принятой температуры стенки трубы в Ra' , а затем, используя аналитическую связь между приведенной степенью черноты и степенью черноты материала испытываемой трубы, определяют значение степени черноты материала оребрения.

Изобретение относится к способам тепловых испытаний, а более конкретно - предназначено для экспериментального определения численного значения степени черноты в конкретном интервале изменения температуры материала оребрения в изготовленных теплообменных трубах.

Теплообменные трубы различных материальных исполнений и конструктивных форм (плавниковые и проволочные ребра, насадные шайбовые и прямоугольные, навитые овалобразные, мембранные, продольные прямоугольные и корытообразные) применяются в теплообменниках газотурбинных установок, котлоагрегатов, компрессорных и холодильных машин, на железнодорожном транспорте, в электроэнергетике.

Однако исключительно широкое применение в промышленности и технике получили биметаллические ребристые трубы (БРТ) с круглыми спиральными алюминиевыми ребрами [1], изготавливаемые по разным технологиям. Основные области использования их - топливно-энергетический комплекс, в частности компрессорные станции магистральных

газопроводов, газонефтеперерабатывающие заводы; приточно-вытяжные системы вентиляции промышленных цехов, зрелищных и общественных зданий и сооружений; воздушно-отопительные агрегаты; калориферы общего назначения. В топливно-энергетическом комплексе, химической и нефтехимической промышленности в применяемых аппаратах воздушного охлаждения (АВО) [1], теплообменные секции которых изготовлены из БРТ, осуществляется охлаждение сжатого природного газа, конденсация и охлаждение продуктов разделения нефти на составляющие компоненты, охлаждение технологических продуктов в производстве метанола, аммиака, капролактама. Также АВО используются для охлаждения масла крупных силовых электротрансформаторов, в атомной и тепловой энергетике. По нашим оценкам на данный момент времени странами СНГ изготавливается не менее 5-6 млн. метров БРТ в год для выпуска новых АВО и модернизации действующих, а если учесть потребность в БРТ калориферостроения и теплоутилизаторов для глубокого охлаждения продуктов сгорания топлива в газифицированных производственно-отопительных котельных, то эта цифра возрастет еще не менее чем на 1 млн метров. В энергетическом машиностроении и металлургической промышленности нашли применение теплообменные трубы, оребренные круглыми спиральными стальными ребрами, из которых изготавливаются [2] экономайзеры котлоагрегатов, калориферы для предварительного нагрева воздуха, подаваемого в основную воздухоподогреватель, теплоутилизаторы отходящих газов нагревательных печей и вагранок.

В целях энергосбережения в зимний и переходный к зимнему периоды года эксплуатацию АВО переводят в режим отвода теплоты применением свободной конвекции охлаждающего воздуха окружающей среды. Происходит отключение вентиляторов и прекращается принудительная прокачка воздуха через межтрубное пространство теплообменных секций. В режиме свободной конвекции воздуха также часто работают калориферы и вентиляционные теплоутилизаторы, теплоотводящие устройства в радиоэлектронике и приборах.

При свободной конвекции воздуха отвод теплоты от охлаждаемого технологического продукта или энергоносителя осуществляется совместно конвекцией и излучением, при этом доли отвода теплоты этими видами теплообмена приблизительно одного порядка. Расчет доли теплоты за счет свободной конвекции воздуха не вызывает затруднений [1, 3]. Несколько иначе обстоит дело с расчетом величины теплоты, отводимой излучением от оребрения теплообменной трубы, вследствие отсутствия в справочной литературе достоверных значений степени черноты материала оребрения для температурных условий его эксплуатации и действительных радиационных свойств материала, которые неизвестны.

Тепловой поток излучения, Вт, между нагретой оребренной теплообменной трубой и окружающим воздухом можно определить по формуле [3, 4]

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{п}} c_0 \Phi_{\text{т-с}} F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ - приведенная степень черноты системы "оребренная труба - воздух"; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\Phi_{\text{т-с}}$ - средний угловой коэффициент излучения от оребренной трубы к окружающей среде (воздуху); F_1 - площадь поверхности оребрения трубы, м^2 ; T_1, T_2 - соответственно абсолютные температуры поверхности стенки по основанию ребер трубы и воздуха, К.

В процессе оребрения теплообменной трубы исходный материал подвергается механическим и тепловым нагрузкам, вызывающим окисление поверхностного слоя и изменение его шероховатости по сравнению с исходным материалом. Следовательно, радиационные свойства материала в изготовленных теплообменных трубах будут отличаться от свойств исходного материала. Значит, использование справочных данных по степени черноты $\varepsilon_{\text{т}}$ материала оребрения трубы для расчета приведенной степени черноты $\varepsilon_{\text{п}}$ неправомерно и приведет к погрешности расчета $Q_{\text{л}}$ по (1), величину которой и направленность

заранее трудно предсказать. Известно, что $\epsilon_{\text{п}} = f(\epsilon_{\text{т}}, \epsilon_{\text{с}})$, где $\epsilon_{\text{с}}$ - степень черноты окружающей трубу ограждений.

Ошибка в расчете $Q_{\text{л}}$ в конечном итоге приводит к экономическим потерям на предприятии. Это можно рассмотреть на примере АВО, которые эксплуатируются всегда в том или ином конкретном технологическом процессе, пусть это будет охлаждение природного газа на компрессорной станции перед закачкой его в магистральную трубу. При одинаковых исходных данных получили расчетное значение $Q_{\text{л}}$, превышающее действительную величину $Q_{\text{лд}}$ для некоторой температуры окружающего воздуха. Приняли решение о переводе АВО в режим свободной конвекции, и окажется, что будет происходить недоохлаждение природного газа до требуемой величины при вынужденной конвекции. Объемная производительность газоперекачивающих агрегатов (ГПА) снизится, потребитель недополучит топливо, то скажется на объемах выпускаемой продукции.

Изложенное также подтверждает актуальность разработки комплексного способа, включающего определение приведенной степени черноты системы "оробренная труба - воздух" и нахождение степени черноты $\epsilon_{\text{т}}$ материала оребрения.

Известен калориметрический экспериментальный метод [4] определения степени черноты исследуемого твердого тела в форме гладкого цилиндра некоторой длины, внутри которого помещается электрический нагреватель. В середине сечения цилиндра на его наружной поверхности устанавливаются четыре термодары, равномерно расположенные по окружности сечения. Исследуемый цилиндр соосно устанавливается внутри гладкого цилиндра большого диаметра, у которого на внутренней поверхности также заделаны четыре термодары, равномерно расположенные по окружности сечения, совпадающего с сечением исследуемого цилиндра. С торцов калориметрическая установка закрыта теплоизолирующими дисками, тепловой поток $Q_{\text{т}}$ (потери теплоты) через которые предварительно измерен тарировочными опытами. Кольцевая воздушная прослойка между цилиндрами имеет постоянную толщину по длине и представляет ограниченное замкнутое пространство. Перенос теплоты через прослойку осуществляется конвекцией и излучением.

Далее осуществляют нагрев исследуемого цилиндра и по установлению стационарного теплового состояния измеряют тепловой поток Q , передаваемый электрическим нагревателем, эдс термодар, которые переводятся в градусы, и по ним вычисляют средние значения температур поверхности исследуемого тела T_1 и цилиндра большого диаметра T_2 . Затем, рассчитывают тепловой поток $Q_{\text{к}}$ конвекцией через воздушную прослойку, используя эквивалентную теплопроводность этой прослойки, для чего вычисляют по эмпирической зависимости коэффициент конвекции $\epsilon_{\text{к}}$, действительный для прослоек постоянной толщины. По измеренному значению Q , расчетному $Q_{\text{к}}$ и известному $Q_{\text{т}}$ исходя из уравнения теплового баланса калориметрической установки находят тепловой поток излучением $Q_{\text{л}}$, Вт, отдаваемый исследуемым цилиндром. С другой стороны, этот тепловой поток излучением подчиняется аналитической зависимости, Вт:

$$Q_{\text{л}} = \epsilon_{\text{п}} c_0 F_{\text{ср}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где $F_{\text{ср}}$ - средняя поверхность теплообмена, м^2 .

По известным $Q_{\text{л}}$, T_1 , T_2 , c_0 , $F_{\text{ср}}$ из (2) вычисляют приведенную степень черноты $\epsilon_{\text{п}}$ системы "цилиндр - цилиндр". Для этого случая формула для приведенной степени черноты [3] имеет вид

$$\epsilon_{\text{п}} = \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где F_1 , F_2 - соответственно площадь наружной поверхности исследуемого цилиндра и наружного (большого) цилиндра, м^2 .

Далее полагают $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$ и по известному $\varepsilon_{\text{п}}$ из (3) находят численное значение степени черноты ε_1 исследуемого тела (внутреннего цилиндра).

Изложенному методу свойственны ясная физическая сущность, оригинальность реализации и четкая последовательность операций, итогом чего является достижение поставленной цели доступными средствами измерений. Но просматриваются и очевидные недоработки в этом методе:

не учтены потери теплоты с наружной поверхности большого цилиндра;

некорректность измерения T_1 и T_2 ; неравномерность распределения температур по поверхности цилиндров имеет место в осевом направлении, т.е. в направлении торцов, но не по окружности цилиндров;

допущение $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ в условиях калориметрической установки выполнить весьма проблематично;

погрешность, вносимая $\varepsilon_{\text{к}}$, при вычислении $Q_{\text{к}}$; ограниченный температурный перепад ($T_2 - T_1$), для которого применимо уравнение подобия для определения значения $\varepsilon_{\text{к}}$; в целом ряде теплообменных устройств из БРТ температурный перепад немного превышает разность ($T_1 - T_2$), ограничивающую область применения уравнения (формулы) для $\varepsilon_{\text{к}}$;

поверхности тел, выполненных даже из одного материала, скорее всего, будут иметь некоторое различие значений степени черноты ε_1 и ε_2 .

Большая часть недостатков этого метода для определения $\varepsilon_{\text{т}}$ БРТ может быть устранена, но в научно-технической литературе полностью отсутствуют данные для вычисления $\varepsilon_{\text{к}}$ прослойки переменной толщины. Такая прослойка возникнет в случае помещения БРТ внутрь гладкого цилиндра большого диаметра. Поэтому применение этого способа по прямому назначению невозможно для БРТ.

Известен способ [5], который, как и предыдущий, является калориметрическим. В его основе находятся только уравнения (2) и (3). Это достигается тем, что изучаемым телом, заключенным в стеклянную охлаждаемую оболочку, является вольфрамовая нить накаливания с известным диаметром и длиной. При прохождении по ней электрического тока возникает тепловой поток. Чтобы исключить в эксперименте передачу теплоты конвекцией и теплопроводностью, внутри калориметра предусмотрено вакуумметрирование до остаточного давления воздуха 10^{-5} мм рт. ст. После создания вакуума проволока передает теплоту только излучением. Поскольку площадь поверхности вольфрамовой нити во много раз меньше площади поверхности оболочки ($F_1 \ll F_2$), то формула (2) содержит только искомое значение ε_1 (из формулы (3) следует, что $\varepsilon_{\text{п}} = \varepsilon_1$). Таким образом, для определения ε_1 необходимо измерить силу тока I и напряжение U на соответствующем участке цепи, температуры нити T_1 и оболочки T_2 . Затем рассчитав по формуле $Q_{\text{л}} = I \cdot U$, Вт, величину потока излучения, из (3) определяется ε_1 .

Однако применение данного способа для определения степени черноты промышленных оребренных труб технически трудно выполнимо. Необходим калориметр с габаритами, обеспечивающими условие ($F_1/F_2 \rightarrow 0$) не для вольфрамовой нити ($d = 0,3$ мм и $l = 275$ мм [5]), а для труб ($d \sim 25 \dots 55$ мм и $l \sim 2 \dots 6$ м). Например, примем трубу со спирально навитыми завальцованными ребрами [1] с характерными параметрами: наружный диаметр $d_{\text{н}} = 25$ мм, длина $l = 2$ м и коэффициент оребрения $\phi = 21,05$. Площадь теплоотдающей поверхности такой трубы равна $F_1 = \pi d_{\text{н}} \phi l = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 21,05 \cdot 2 = 3,3$ м². Допустим, что (F_1/F_2) = 0,1, тогда площадь поверхности калориметра должна составлять $F_2 = 33$ м², т.е. охватывающий исследуемую трубу цилиндр должен иметь как минимум диаметр 5,26 м. В объеме такого калориметра необходимо обеспечивать глубокий вакуум, при этом труба должна еще легко монтироваться в общую схему и сниматься.

Наиболее близким к заявленному по технической сущности и достигаемому результату является способ, описанный в [6]. Он нами принят за прототип. Суть этого способа за-

ключена в сравнении величин излучательной способности исследуемого тела и эталона, степень черноты которого должна быть заранее известна.

Экспериментальная установка для реализации способа имеет две одинаковые пластины (форма, размеры), выполненные из одного материала и расположенные друг относительно друга в одной плоскости. Одна из пластин, взятая в качестве эталона, покрыта тонким слоем сажи, степень черноты которой известна $\epsilon_1 = 0,96$ и не меняется в широком диапазоне температур $50 \dots 1000$ °С, вторая является исследуемой. Каждую из пластин можно независимо нагревать электрическими нагревателями, мощность которых регулируется реостатами, включенными в цепь нагревателей вместе с амперметрами и вольтметрами. После измерения силы тока и напряжения каждого нагревателя рассчитывают тепловой поток. Температуры на поверхностях пластин измеряют термомпарами.

Излучение с нагреваемых поверхностей пластин происходит на замыкающую их оболочку, которую образуют поверхности стен, потолка, пола помещения. Так как площадь поверхностей пластин значительно меньше площади ограждающих конструкций, то каждая из двух систем "пластина - ограждающая поверхность", согласно (3), имеет соответственно $\epsilon_{П1} = \epsilon_1$ и $\epsilon_{П2} = \epsilon_2$. Чтобы провести сравнение излучательных способностей пластин, необходимо выровнять температуры на их поверхностях и поддерживать постоянными во время эксперимента:

$$T_1 = T_2 = T = \text{const.} \quad (4)$$

Соблюдение условия (4) обеспечивает одинаковую интенсивность конвекции с поверхности пластин, так как все остальные факторы (форма, размер, ориентация относительно ограждающей поверхности), влияющие на конвективный теплообмен, для двух пластин тождественны. Тогда, обеспечив в эксперименте $Q_{1к} = Q_{2к}$ равенство тепловых потоков конвекций, получим

$$Q_1 - Q_2 = Q_{1л} - Q_{2л}. \quad (5)$$

Подставив в (5) формулу (2) и выразив искомую ϵ_2 , окончательно получим

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 - \frac{Q_1 - Q_2}{c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F}, \quad (6)$$

где $\epsilon_1 = 0,96$ - степень черноты эталонной пластины, покрытой сажой; F - площадь наружной поверхности пластины, м².

Недостатками этого способа являются необходимость строгого выполнения условия (4) по выравниванию температурных полей испытуемой и эталонной пластин при опытном определении степени черноты материала, что в случае применения для теплообменных оребренных труб требует значительных затрат времени - до 30-35 мин - для достижения установившегося теплового состояния на одно значение подводимой электрической мощности и, соответственно, повышенных затрат энергии; отсутствие защиты испытуемого и эталонного образцов от влияния конвективных токов воздуха в помещении, например, вызываемых перемещением наблюдателя у опытной установки, и это снижает надежность экспериментального определения степени черноты материала, что негативно влияет на точность ее определения.

Задача изобретения - повышение производительности, уменьшение потребления энергии, повышение надежности, точности, достоверности экспериментального определения калориметрическим способом степени черноты материала оребрения в изготовленной теплообменной трубе.

Поставленная задача достигается тем, что испытуемую теплообменную трубу промышленной длины или ее укороченный натурный образец и выбранную из этой же партии в качестве эталонной теплообменную трубу идентичных испытуемой геометрических параметров и материального исполнения, снаружи покрытую тонким слоем копоти, осна-

ВУ 12063 С1 2009.06.30

шают термодатчиками для измерения средней температуры поверхности стенки по основанию ребер труб и внутри источниками теплоты - электрическими нагревателями, мощности которых регулируют независимо друг от друга, торцовыми теплоизолирующими втулками, обе трубы располагают друг относительно друга на одной горизонтальной оси или параллельных осях, подают напряжение на электрические нагреватели труб и по достижении стационарного теплового состояния измеряют подводимую к каждой трубе электрическую мощность и температуру воздуха, регистрируют показания термодатчиков для определения средней температуры поверхности стенки труб, определяют для каждой трубы суммарный тепловой поток, переданный воздуху излучением и свободной конвекцией, для эталонной трубы вычисляют тепловые потоки излучением и конвекцией, причем испытываемую и эталонную трубы подвешивают на растяжках в прямоугольной камере, которую разделяют вертикальной стенкой на два равных отсека по одному для каждой трубы со свободными входом снизу и выходом сверху окружающего воздуха, внутри отсеков измеряют температуру воздуха, подают на электрические нагреватели труб электрическую мощность ряда значений, полностью охватывающих исследуемый интервал изменения температуры поверхности стенки труб, и для каждого из значений подводимой электрической мощности определяют величину торцовых потерь теплоты для соответствующей разности средних температур "поверхность стенки трубы - воздух", по которым строят соответствующие графики изменения торцовых потерь для труб, затем для каждого теплового режима нагрева труб, соответствующего подводимой электрической мощности, по измеренным для каждой из труб разности средних температур "поверхность стенки трубы - воздух" и суммарному тепловому потоку вычисляют суммарный приведенный коэффициент теплоотдачи испытываемой трубы, а по тепловому потоку конвекцией эталонной трубы - приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией для этой трубы, далее для каждой трубы и соответствующих тепловых режимов вычисляют ряд значений безразмерных чисел подобия Нуссельта Nu и Релея Ra , по которым строят графики зависимости $Nu = f(Ra)$ для обеих труб, после чего их условно разделяют линией, параллельной оси ординат, при некотором значении $Ra' = const$, которому соответствует одинаковое значение средней температуры поверхности стенки труб, находят из графиков значения Nu' для испытываемой и эталонной труб, разность между которыми равна значению числа $Nu'_л$ потока излучением для испытываемой трубы, используя которое вычисляют коэффициент теплоотдачи излучением этой трубы, далее определяют тепловой поток излучением испытываемой трубы по найденному значению коэффициента теплоотдачи излучением и разности средних температур "поверхность стенки трубы - воздух" для принятого значения Ra' , после чего, используя аналитическую связь теплового потока излучением с приведенной степенью черноты, находят численное значение приведенной степени черноты для принятой температуры стенки трубы в Ra' , а затем, используя аналитическую связь между приведенной степенью черноты и степенью черноты материала испытываемой трубы, определяют значение степени черноты материала оребрения.

Принципиальное отличие предлагаемого изобретения заключается в том, что для определения степени черноты материала оребрения и приведенной степени черноты системы "оребрённая труба - окружающая среда" нет необходимости добиваться одинакового значения средней температуры поверхности стенки $t_{ст}$, °С, испытываемой и эталонной труб при их установившемся тепловом состоянии. Достаточно лишь подвести к нагревателю труб приблизительно одинаковую величину электрической мощности и дождаться установления стационарного теплового состояния труб, нет необходимости в непрерывном подрегулировании подводимой мощности. Время, затрачиваемое на достижение стационарного теплового состояния трубами, уменьшается до $10 \div 15$ мин, т.е. в $2 \div 3$ раза. В этой же пропорции приблизительно уменьшится энергопотребление на определение степени черноты для одного температурного режима трубы, т.е. для одного значения температуры стенки трубы, а для выполнения теплового расчета теплообменника необходимы

значения степени черноты материала трубы для рабочего диапазона изменения $t_{ст}$ в промышленном аппарате. Она зависит от функционального назначения теплообменника и типоразмера трубы и может изменяться от нескольких десятков градусов до сотен градусов Цельсия, например для АВО изменение $t_{ст} \approx 30 \div 220$ °С. Наличие экспериментальных зависимостей $\varepsilon_n = f(t_{ст})$ и $\varepsilon_T = f(t_{ст})$ обеспечит гарантированную надежность расчета теплового потока, отводимого излучением от оребренной трубчатой поверхности теплообмена. На достижение этой задачи предполагаемый способ требует существенно меньших энергопотребления и продолжительности времени.

Одной из составляющих теплового потока оребренной трубы при теплопередаче, расположенной в спокойном потоке воздуха, является свободно-конвективный тепловой поток. Теплоотдача при свободной конвекции очень чувствительна к случайному воздействию вынужденного локального движения воздуха и его колебаниям, возникшим вследствие перемещения наблюдателя у опытной установки, открывания-закрывания дверей, форточек в помещении, расположения установки и подобных воздействий, что увеличивает коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией в 1,3÷2,1 раза. Для предотвращения отрицательного влияния таких факторов на интенсивность свободно-конвективного теплообмена оребренной трубы (испытываемой и эталонной) они размещаются в отсеках замкнутой камеры, чем обеспечиваются условия естественного движения воздуха снаружи труб и надежность получаемых экспериментальных данных, исключается случайная ошибка в измеряемых параметрах.

Точность и достоверность экспериментальных данных обеспечиваются применением обоснованной методики измерения средней температуры поверхности стенки оребренной трубы, базирующейся на анализе развития гидродинамики воздуха вокруг трубы. Наличие по концам трубы теплоизолирующих втулок предотвращает осевую растечку теплоты по металлу трубы и формирует распространение теплового потока по радиусу трубы. Также известно, что толщина пограничного слоя воздуха вокруг трубы увеличивается от лобовой точки в направлении к кормовой, следствием чего является неравномерное распределение температуры поверхности стенки по окружности трубы, несмотря на предпринимаемые конструктивные решения. Из-за этого возникает небольшая неравномерность распределения температуры стенки в осевом направлении. Исходя из изложенного, по основанию ребер трубы в ее осевом направлении равномерно закладывается i -ое количество термодатчиков, сдвинутых по окружности трубы на угловое расстояние 30° друг относительно друга. Обычно на одной половине окружности трубы закладывается 7 термодатчиков.

Таким образом, на основании изложенных доказательств и сравнений констатируем, что в заявленном способе положительно решены сформулированные задачи изобретения.

Изобретение поясняется фиг. 1-6.

На фиг. 1 изображен внешний вид отрезка БРТ с круглыми спиральными ребрами; на фиг. 2 - схема опытной установки, реализующей предлагаемый способ; на фиг. 3 - результаты экспериментального исследования теплоотдачи оребренных испытываемой и эталонной труб; на фиг. 4 - экспериментальные данные приведенной степени черноты системы "оребренная труба - окружающая среда"; на фиг. 5 - свободно-конвективная теплоотдача оребренных труб; на фиг. 6 - степень черноты материала (алюминия) в изготовленной теплообменной трубе.

Конструктивно БРТ состоит из несущей трубы 1 и алюминиевой ребристой оболочки 2, механически соединенной с несущей трубой. Геометрическими параметрами БРТ являются: наружный диаметр ребра d ; высота, шаг и средняя толщина ребра h , s , $\Delta = 0,5(\Delta_1 + \Delta_2)$; диаметр ребра по его основанию $d_0 = d - 2h$; толщина ребра у вершины Δ_1 и у основания Δ_2 ; наружный диаметр несущей трубы d_n ; диаметр контактирования $d_k = d_n$; внутренний диаметр несущей трубы d_1 . Для БРТ с завальцованными или приварными ребрами $d_n = d_0$.

Опытная установка (фиг. 2) состоит из камеры 1 прямоугольного поперечного сечения в плане, разделенной вертикальной перегородкой 11 на два равных отсека 3, 12, внутри которых на растяжках 8 подвешены в естественном потоке воздуха испытываемая 4 и эталонная 13 оребренные трубы, длина оребрения каждой из которых равна 1. С обоих концов труб установлены теплоизолирующие втулки 5, выполненные из малотеплопроводного материала, например фторопласта или текстолита, способного выдерживать без разрушения температуру до 250 °С. Теплоизолирующие втулки играют роль тепловой защиты. Внутри оребренных труб смонтированы электрические нагреватели 6, мощность которых регулируется независимо реостатами 10 и измеряется ваттметрами 2. Температура воздуха внутри отсеков измеряется лабораторными ртутными термометрами 9.

Температура поверхности у основания ребер труб 4, 13 измеряется термодатчиками 7, эдс которых измеряется милливольтметром. На каждой из труб заложено семь термодатчиков (на схеме показаны лишь четыре) на одной половине окружности труб, считая, что вторая половина имеет симметричное поле температур, термодатчики расположены равномерно вдоль образующей труб, но каждая сдвинута друг относительно друга на угол 30°. Электроды термодатчиков закладываются в канавки прямоугольного поперечного сечения, которые фрезеруются вдоль образующих труб на их поверхности у основания ребер.

В эталонной трубе 13 наружная теплоотдающая поверхность (поверхность оребрения) зачернена копотью трансформаторного масла, равномерно нанесенной очень малой толщиной. Копоть этого масла в широком диапазоне температур [3] сохраняет постоянным значение интегральной нормальной степени черноты, равное $\epsilon_{ТЭ} = 0,95$. По параметрам оребрения, размеру, материальному исполнению эталонная труба полностью идентична испытываемой трубе 4.

Теоретические основы изобретения базируются на теории теплопередачи и тепловом расчете теплообменников.

Индексы при буквенных обозначениях соответствуют: э - эталонная труба; и - испытываемая труба; к - конвекция; л - лучеиспускание (излучение).

В опытной установке с поверхности оребрения нагретых труб теплота переносится к окружающей среде (воздуху) свободной конвекцией, а к ограждающим поверхностям камеры - лучеиспусканием (излучением). Мощности, подводимые к электрическим нагревателям испытываемой трубы $W_{и}$, Вт, и эталонной $W_{э}$, Вт, при установившемся тепловом режиме равны

$$W_{и} = Q_{ик} + Q_{ил} + Q_{ит}, \quad (7)$$

$$W_{э} = Q_{эк} + Q_{эл} + Q_{эт}, \quad (8)$$

где $Q_{ик}$, $Q_{эк}$ - свободно-конвективный тепловой поток воздуха, Вт; $Q_{ил}$, $Q_{эл}$ - тепловой поток излучением, Вт; $Q_{ит}$, $Q_{эт}$ - потери теплоты через торцовые поверхности теплоизолирующих втулок, Вт.

Торцовые потери теплоты $Q_{ит}$ в испытываемой и $Q_{эт}$ эталонной трубах заранее известны по данным предварительно проведенных тарировочных опытов с каждой трубой. Тепловой поток, передаваемый через поверхность оребрения трубок, равен, Вт:

$$Q_{и} = W_{и} - Q_{ит} = Q_{ик} + Q_{ил}, \quad (9)$$

$$Q_{э} = W_{э} - Q_{эт} = Q_{эк} + Q_{эл}. \quad (10)$$

Существующие методики расчета [7, 8] среднего углового коэффициента излучения одиночной круглоребристой трубы применимы лишь для труб, имеющих достаточно большие межреберные шаги $s/d_0 = 0,3 \div 0,8$, и не учитывают влияние толщины ребра. Однако трубы современных промышленных газожидкостных теплообменников имеют $s/d_0 = 0,06 \div 0,02$ [1], при этом необходимо учитывать толщину ребра, так как она сравнима с его шагом.

BY 12063 C1 2009.06.30

Нами аналитически получена формула для расчета среднего углового коэффициента излучения одиночной круглоребристой трубы с учетом толщины ребра к окружающей среде:

$$\varphi_{T-C} = \frac{[s - \varphi_{01-01}(s - \Delta)]d}{0,5(d^2 - d_0^2) + (s - \Delta)d_0 + d \cdot \Delta}, \quad (11)$$

где φ_{01-01} - угловой коэффициент излучения на себя цилиндрической поверхности диаметра d и длиной $(s - \Delta)$, замыкающей межреберное пространство, значение которого находится по справочным данным [8]. Для ребристых труб АВО можно принимать $\varphi_{01-01} = 0,02 \div 0,04$.

Площадь ограждающих поверхностей камеры намного превышает площадь поверхности оребрения эталонной трубы. Поэтому расчет приведенной степени черноты одиночной эталонной трубы вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{ЭП} = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_{ТЭ}} - 1 \right) \varphi_{T-C} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Средняя температура поверхности стенки испытуемой и эталонной труб, °С:

$$t_{ист} = \left(\sum_{i=1}^{i=n_{и}} t_{иi} \right) / n_{и}, \quad (13)$$

$$t_{эст} = \left(\sum_{i=1}^{i=n_{э}} t_{эi} \right) / n_{э}, \quad (14)$$

где $n_{и}$, $n_{э}$ - количество термодатчиков, заложенных на испытуемой и эталонной трубах, шт; $t_{и}$, $t_{э}$ - температура поверхности стенки испытуемой и эталонной труб в сечении заложения i -го термодатчика, °С. Абсолютные значения средней температуры стенки, К:

$$T_{ист} = 273 + t_{ист}, \quad (15)$$

$$T_{эст} = 273 + t_{эст}. \quad (16)$$

Тепловой поток излучением эталонной трубы, Вт:

$$Q_{эл} = \varepsilon_{ЭП} c_0 \varphi_{T-C} F_3 \left[\left(\frac{T_{эст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{э0}}{100} \right)^4 \right], \quad (17)$$

где F_3 - площадь поверхности оребрения эталонной трубы, м²; $T_{э0}$ - температура воздуха в отсеке эталонной трубы, К.

Свободно-конвективный тепловой поток эталонной трубы к воздуху согласно (10), Вт:

$$Q_{ЭК} = Q_3 - Q_{эл}, \quad (18)$$

где значение Q_3 известно по измеренным данным.

Температурный напор испытуемой и эталонной труб, °С:

$$\Delta t_{и} = t_{ист} - t_{и0}, \quad (19)$$

$$\Delta t_3 = t_{эст} - t_{э0}, \quad (20)$$

где $t_{и0}$ - температура воздуха в отсеке испытуемой трубы, °С; $t_{э0}$ - температура воздуха в отсеке эталонной трубы, °С.

Свободно-конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{ЭК} = \frac{Q_{ЭК}}{F_3 \cdot \Delta t_3}. \quad (21)$$

Коэффициент теплоотдачи испытуемой трубы, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{и} = \frac{Q_{и}}{F_{и} \cdot \Delta t_{и}}, \quad (22)$$

где $F_{и}$ - площадь поверхности оребрения испытуемой трубы, м². По условиям изобретения $F_{и} = F_3 = F$.

ВУ 12063 С1 2009.06.30

Для большей общности результатов опытного исследования и обеспечения надежности определения степени черноты материала в изготовленной оребренной трубе опытные данные представляются в безразмерных числах подобия, характерных для свободно-конвективного теплообмена.

Число Нуссельта:

$$Nu_{и} = (\alpha_{и} \cdot d_0) / \lambda_{и}, \quad (23)$$

$$Nu_{эк} = (\alpha_{эк} \cdot d_0) / \lambda_{э}, \quad (24)$$

число Релея:

$$Ra_{и} = (\beta_{и} g d_0^3 \cdot \Delta t_{и}) / (v_{и} \cdot a_{и}), \quad (25)$$

$$Ra_{эк} = (\beta_{э} g d_0^3 \cdot \Delta t_{э}) / (v_{э} \cdot a_{э}), \quad (26)$$

где d_0 - линейный размер, который у труб с круглыми ребрами равен диаметру по их основанию, м;

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

v - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;

a - коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с;

β - коэффициент объемного расширения воздуха, К⁻¹.

Значения $\beta_{и}$, $\lambda_{и}$, $v_{и}$, $a_{и}$ принимаются по температуре воздуха $t_{и0}$; $\beta_{э}$, $\lambda_{э}$, $v_{э}$, $a_{э}$ - по температуре $t_{э0}$.

Далее осуществляют при других 3 ÷ 4-х температурных режимах, области изменения температуры стенки которых $t_{ист}$ и $t_{эст}$ включают температуру стенки, для которой определяется значение степени черноты материала оребрения. Для каждого из тепловых режимов выполняют изложенную процедуру расчетов и получают ряд сопряженных значений для испытуемой трубы $Nu_{и}$ - $Ra_{и}$ и эталонной трубы $Nu_{эк}$ - $Ra_{эк}$. По этим полученным значениям в логарифмических координатах строят совместные графики, через опытные точки которых проводят кривые зависимостей $Nu_{и} = f(Ra_{и})$ и $Nu_{эк} = f(Ra_{эк})$. Затем эти графические зависимости при конкретном значении $Ra' = const$, соответствующем требуемой температуре стенки $t_{ст}$, рассекают линией, параллельной оси ординат, и в точках ее пересечения с кривыми находят значения $Nu'_{и}$ и $Nu'_{эк}$. В этом случае разность между числами Нуссельта будет равна числу Нуссельта, определяющему перенос теплоты излучением испытуемой трубой:

$$Nu_{ил} = Nu_{и} - Nu_{эк}. \quad (27)$$

Достоверность равенства (27) доказывается следующим образом. Учитывая, что условия свободно-конвективного теплообмена на поверхности оребрения эталонной и испытуемой труб одинаковы, а выполнение условия $Ra' = const$ обеспечивает равенство температурных напоров $\Delta t_{и} = \Delta t_{э}$ при $t_0 = const$. Значит $t_{ист} = t_{эст}$. Следовательно, будут одинаковы свободно-конвективные потоки теплоты обеих труб

$$Q_{эк} = Q_{ик}. \quad (28)$$

Тепловой поток излучением испытуемой трубы из (9) с учетом (28)

$$Q_{ил} = Q_{и} - Q_{эк}. \quad (29)$$

Умножая левую и правую часть (29) на выражение $1/(F_{и} \cdot \Delta t_{и})$ с учетом $F_{и} = F_{э} = F$ и $\Delta t_{и} = \Delta t_{э} = \Delta t$, получим

$$\frac{Q_{ил}}{F \cdot \Delta t} = \frac{Q_{и}}{F \cdot \Delta t} - \frac{Q_{эк}}{F \cdot \Delta t} \quad (30)$$

или

$$\alpha_{ил} = \alpha_{и} - \alpha_{эк}. \quad (31)$$

Далее, умножив (31) на d_0/λ , получаем

$$Nu_{ил} = Nu_{и} - Nu_{эк}, \quad (32)$$

которое при $Ra' = const$ совпадает с (27).

По (27) вычисляют значение $Nu_{ил}$, из которого находят коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К):

$$\alpha'_{ил} = Nu'_{ил} \cdot \frac{\lambda_{и}}{d_0}. \quad (33)$$

Тепловой поток излучением испытуемой трубы

$$Q'_{ил} = \alpha'_{ил} \cdot F \cdot \Delta t_{и}. \quad (34)$$

По выражению (17), записанному применительно к испытуемой трубе, вычисляют приведенную степень черноты системы "оребренная труба - окружающая среда":

$$\epsilon_{ип} = \frac{Q'_{ил}}{c_0 \Phi_{Т-с} F_3 \left[\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}, \quad (35)$$

где $T_{ст}$ - абсолютная температура стенки испытуемой трубы, для которой по (34) вычисляется $Q'_{ил}$ и затем определяется степень черноты материала трубы $\epsilon_{ит}$.

Значение $\epsilon_{ип}$ связано с $\epsilon_{ит}$ соотношением

$$\epsilon_{ип} = \left[1 + \left(\frac{1}{\epsilon_{ит}} - 1 \right) \Phi_{Т-с} \right]^{-1}, \quad (36)$$

откуда вычисляют численное значение степени черноты материала оребрения $\epsilon_{т} = \epsilon_{ит}$ в изготовленной теплообменной трубе, подвергнутой экспериментальному исследованию.

Определение степени черноты материала оребрения осуществляется следующим образом.

Испытуемая 4 и эталонная 13 оребренные трубы, оснащенные термодатчиками 7, электрическими нагревателями 6, теплоизолирующими втулками 5, подвешивают на растяжках 8 внутри соответствующих отсеков 3, 12 камеры 1. Подают напряжение на электронагреватели и регулированием реостатами 10 подводимой мощности устанавливают приближенное значение температуры стенки на каждой из труб, которое близко к заданной, для которой следует определить значение степени черноты материала оребрения $\epsilon_{т}$.

По достижении стационарного теплового состояния каждой трубой записывают показания ваттметров 2 (подводимой мощности) $W_{и}$, W_3 ; эдс термодатчиков по милливольтметрам $E_{и1}$, E_{31} , по которой находят значения температур $t_{и1}$, t_{31} ; температуру воздуха $t_{и0}$, t_{30} . Затем задают новые температурные режимы изменением $W_{и}$, W_3 , при которых температура стенки в обеих трубах будет находиться слева и справа от заданной (по 1÷2 режима), и осуществляют в изложенной последовательности измерения. Опытные данные обрабатывают по изложенной методике, результатом чего является определение степени черноты материала оребрения в изготовленной теплообменной трубе.

В заключение выполнена экспериментальная проверка способа. В опытах использовалась биметаллическая труба со спиральными накатными алюминиевыми ребрами, применяемыми в АВО. Труба изготовлена по технологии ВНИИ метмаш [1] на ОАО "БОРХИММАШ" (Россия). Геометрические параметры ребер $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 55,54 \times 26,36 \times 14,51 \times 2,91 \times 0,75$ мм; наружный диаметр несущей латунной трубы $d_n = 25$ мм, ее внутренний диаметр $d_1 = 2$ мм. Испытуемая и эталонная трубы представляли отрезки из промышленной трубы, каждый длиной оребрения $l = 300$ мм.

Коэффициент оребрения трубы со спиральными круглыми ребрами

$$\phi = 1 + \frac{2h}{s \cdot d_0} (d_0 + h + \Delta). \quad (37)$$

Для опытных труб $\phi = \phi_{и} = \phi_3 = 16,69$.

Площадь теплоотдающей поверхности оребрения, м²:

$$F = \phi l d_{0l}. \quad (38)$$

В наших опытах $F = F_{и} = F_{э} = 1,38 \text{ м}^2$.

Для измерения средней температуры поверхности стенки у основания ребер труб было заложено вдоль образующих труб по семь хромель-алюмелевых термопар, сдвинутых друг относительно друга на угол 30° . Диаметр электродов: алюмелевого - 0,12 мм, хромелевого - 0,16 мм. Термопары размещены на половине окружности каждой из труб. Термопары были предварительно проградуированы с точностью $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Испытуемая и эталонная БРТ устанавливались в отсеках камеры прямоугольного поперечного сечения 800×1600 мм высотой 1400 мм. Температура воздуха в отсеках измерялась ртутными лабораторными термометрами с ценой деления $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, расположенных в углах отсеков. ЭДС термопар подсоединены к потенциометру ПП-63 класса точности 0,05. Электрическая мощность, подводимая к трубам, измерялась ваттметрами D5107 класса точности 0,1. Зачернение эталонной трубы осуществлено копотью трансформаторного масла. Во время опытов измеряемые параметры находились в следующих пределах: $t_{ст} = 30 \div 210 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_0 = 16 \div 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $W = 8 \div 290 \text{ Вт}$. Интервал изменения температуры $t_{ст}$ соответствует рабочим условиям эксплуатации в теплообменниках топливно-энергетического комплекса. Погрешность опытных значений Nu и Ra соответственно равна $2,2 \div 5,3 \%$ и $1,3 \div 2,8 \%$.

Предварительно на опытной установке были определены торцовые потери теплоты труб в интервале изменения $t_{ст}$ и построены графики $Q = f(\Delta t_{и})$, $Q_{ит} = f(\Delta t_{э})$.

Результаты опытов в критериальной обработке приведены на фиг. 3. Опытные значения обозначены условными обозначениями, которым присвоены цифры 1, 2. Цифра 1 соответствует теплоотдаче $Nu_{и}$ испытуемой трубы, а цифра 2 - значениям $Nu_{эк}$ эталонной трубы. Конвективная теплоотдача БРТ не зависит от степени черноты ее теплоотдающей поверхности. Следовательно, она одинаковая как у испытуемой, так и эталонной трубах. Сплошные линии на фиг. 3, обобщающие соответственно опытные значения (точки 1, 2) являются зависимостями вида $Nu_{и} = f(Ra_{и})$ и $Nu_{эк} = f(Ra_{э})$. Значит, при $Ra' = \text{const}$ различие в значении числа Nu для обеих труб связано с лучистой составляющей коэффициента теплоотдачи $\alpha'_{ил}$ испытуемой трубы, и затем по (34) находим $Q'_л$ для каждой опытной точки испытуемой трубы. Затем по формуле (11) вычисляли $\phi_{т-с}$, далее по выражению (35) находим $\epsilon_{ип}$ для каждого значения $t_{ст}$.

Расчетно-экспериментальные значения приведенной степени черноты системы "ребренная труба - окружающая среда" $\epsilon_{п} = \epsilon_{ип}$ представлены в виде графика $\epsilon_{п} = f(t_{ст})$ на фиг. 4. Здесь через 1 обозначены опытные точки $\epsilon_{п}$, а сплошная линия 2 является обобщающей прямой. Разброс точек от обобщающей прямой 2 не превышает $\pm 3,5 \%$ и хорошо согласуется с погрешностью опытных значений Nu . Рост температуры стенки БРТ от 30 до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ сопровождается снижением $\epsilon_{п}$ от $0,63$ до $0,57$, т.е. не превышает 11% .

Доля лучистой составляющей теплового потока для применяемых в АВО круглых труб с алюминиевыми ребрами составляет $30 \div 35 \%$, величина ощутимая, и надежное управление ею позволит добиться существенного энергосбережения.

В целях проверки надежности и достоверности предлагаемого нами способа опытные данные по испытуемой трубе были обработаны с учетом $\epsilon_{ип}$, значение которой принимали по обобщенной прямой 2 (сплошная линия) на фиг. 4. Потом по формуле (1) вычисляли $Q_{ил}$, далее по (9) $Q_{ик}$, затем свободно-конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ик}$ и число $Nu_{ик}$ для конвективной теплоотдачи. Кроме этого, был проведен дополнительный эксперимент на этой же опытной установке с другим отрезком ребренной трубы (присвоим № 2), вырезанным из той же партии БРТ, из которой были испытуемая и эталонная трубы. Вычисление значений $Q'_л$ для трубы № 2 осуществлялось также с использованием $\epsilon_{ип}$, определяемой по прямой 2 на фиг. 4. Далее расчеты были аналогичны предыдущим для испытуемой трубы. Полученные значения свободно-конвективной теплоотдачи Nu_k для всех трех БРТ (испытуемой, эталонной и дополнительной № 2) представлены на фиг. 5 в зави-

симости от числа Ra на логарифмической сетке. Условным знаком (o) обозначены данные для трубы № 2 (дополнительной), знаком (•) - испытуемой трубы, знаком (▲) - эталонной трубы. Наблюдается хорошая согласованность и воспроизводимость результатов исследования.

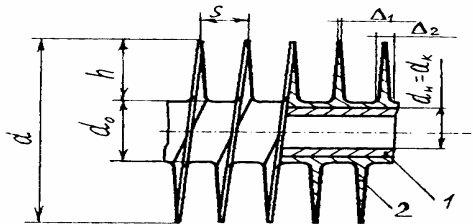
В заключение осуществлено определение степени черноты материала ϵ_r для испытуемой теплообменной трубы, для чего использованы данные на фиг. 4 и формула (36). Полученные значения ϵ_r для алюминиевых ребер приведены на фиг. 6 опытными точками (•), а сплошная линия - это обобщающая прямая 1. Сравнение ϵ_r с табличными данными [3] указывает на их значительное отличие, до 2 раз. Это объясняется механическим и тепловым воздействием на металл в процессе оребрения трубы.

По сравнению с прототипом заявляемый способ позволяет снизить время опыта в 2...3 раза и соответственно в этой же пропорции уменьшается энергопотребление; обеспечить защиту испытуемого и эталонного образцов от влияния конвективных токов воздуха в помещении, что в сочетании с порядком расположения термодатчиков на образцах увеличивает надежность опытных данных и приводит к повышению на 10-15 % точности экспериментальных значений степени черноты материала оребрения. Определение степени черноты материала оребрения с использованием экспериментальных зависимостей $\epsilon_n = f(t_{ст})$ и $\epsilon_r = f(t_{ст})$ обеспечивает достоверность способа.

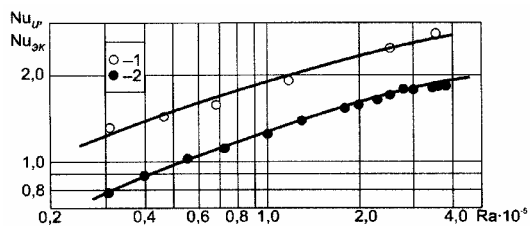
Способ может быть использован научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими институтами, проектирующими и разрабатывающими методики тепловых расчетов газожидкостных теплообменников из оребренных труб, заводами-изготовителями АВО из БРТ с алюминиевыми ребрами, лабораториями университетов энергетического и химического машиностроения.

Источники информации:

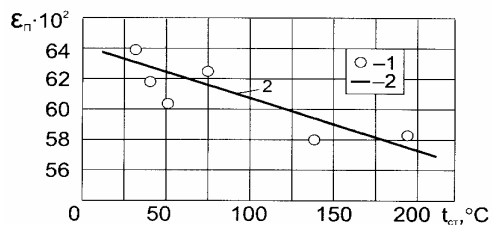
1. Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Кунтыш В.Б. и др. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / Под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного.- СПб.: Недра, 1996.- С. 28-37, 89-104.
2. Левченко Г.И., Лисейкин И.Д., Копелиевич А.М. и др. Оребренные поверхности нагрева паровых котлов.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- С. 5-10, 23-28.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи.- М.: Энергия, 1973.- С. 304-306.
4. Бондарев В.А., Вейник А.И., Михайлова Л.М. и др. Общая теплотехника. Лабораторный практикум / Под общ. ред. А.И. Вейника.- Минск: Высшая школа, 1965.- С. 62-67.
5. Солодов А.П., Цветков Ф.Ф., Елисеев А.В. и др. Практикум по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / Под. ред. А.П. Солодова.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- С. 188-191.
6. Термодинамика и теплопередача. Лабораторные работы (практикум) по курсу.- Минск: МВД РБ. Высшее пожарно-техническое училище, 1994.- С. 58-64 (прототип).
7. Теплофизические основы получения искусственного холода: Справочник / Под ред. А.В. Быкова.- М.: Пищевая промышленность, 1980.- 231 с.
8. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 432 с.



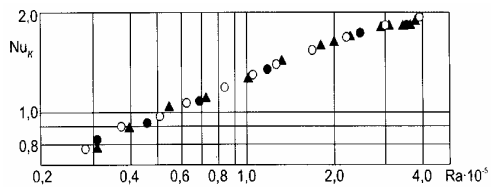
Фиг. 1



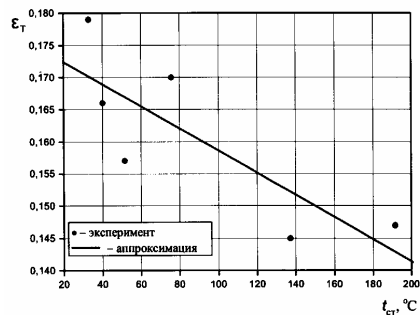
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6