

На правах рукописи

БЕССОННЫЙ ЕВГЕНИИ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕПЛОВОГО КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
В БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБАХ**

Специальность 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Санкт-Петербург
2005

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете
низкотемпературных и пищевых технологий

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Платунов Е. С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кунтыш В. Б.

кандидат технических наук, доцент
Азарсков В. М.

Ведущая организация - Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии им. Д. И. Менделеева

Защита состоится 24 марта 2005 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного
Совета Д212.234.01 при Санкт-Петербургском государственном университете
низкотемпературных и пищевых технологий по адресу: 191002, г. Санкт-
Петербург, ул. Ломоносова, д. 9, СПбГУНиПТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 22 февраля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета
доктор технических наук, профессор



Л. С. Тимофеевский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Аппараты воздушного охлаждения (АВО) с биметаллическими оребренными теплообменными трубами находят применение в разнообразных отраслях народного хозяйства, особенно там, где приходится иметь дело с интенсивным воздушным охлаждением химически агрессивных жидкостей высокого давления. АВО широко используются в химической, нефтегазовой и пищевой промышленности, в холодильной технике и на различных перерабатывающих предприятиях. Главной технической характеристикой АВО является тепловая эффективность теплообменника, которая существенно зависит от термического контактного сопротивления (ТКС), имеющегося в биметаллической трубе на границе механического контакта образующих ее труб - несущей внутренней и оребренной наружной. Большие ТКС обычно возникают в процессе изготовления биметаллических труб и не поддаются прямому неразрушающему контролю, а обнаруживаются только в процессе эксплуатации. Поэтому уже многие десятилетия существует проблема создания эффективных экспрессных методов неразрушающего контроля ТКС биметаллических труб на этапе их изготовления в заводских условиях. Проводившиеся в этом направлении исследования пока завершались полумерами. В 70-х годах прошлого века в нашей стране впервые была создана стационарная установка, пригодная для выборочного контроля ТКС промышленных оребренных труб. Однако длительность контроля одной трубы на установке занимала не менее часа, поэтому такой способ контроля не получил должного распространения. Проблема экспрессного неразрушающего контроля ТКС биметаллических труб АВО остается актуальной до сих пор, так как непосредственно связана с общей проблемой снижения энергопотребления многих энергоемких технологических процессов, базовых для народного хозяйства.

Цель работы. Разработка методов и средств неразрушающего экспрессного контроля ТКС в биметаллических оребренных теплообменных трубах, составляющих основу современных промышленных АВО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- разработать и теоретически обосновать большую группу экспрессных методов неразрушающего контроля ТКС биметаллических труб, приемлемых для использования в заводских условиях массового промышленного изготовления;
- создать малоинерционные датчики, пригодные для регистрации температуры внутренней и наружной поверхности оребренных труб;
- разработать импульсные источники нагрева, воспроизводящие при внутреннем и наружном радиальном нагреве трубы тепловой импульс прямоугольной формы;
- провести комплексную экспериментальную проверку выбранных методов контроля ТКС, выявить их технические и метрологические возможности;
- создать опытный образец автоматизированного прибора, предназначенного для экспрессного контроля ТКС биметаллических труб на этапе их изготовления.

Научная новизна. Разработана и впервые экспериментально проверена группа нестационарных методов неразрушающего контроля ТКС биметаллических теплообменных труб.

Автор защищает:

- пять различных по режиму опыта тепловых экспрессных методов неразрушающего контроля ТКС биметаллических оребренных труб;
- теоретическое обоснование и сравнительный анализ разработанных методов;
- способы регистрации температуры поверхности трубы в условиях импульсного разогрева;
- способы радиального внутреннего и наружного нагрева трубы поверхностным тепловым импульсом прямоугольной формы;
- результаты проверки трех групп нестационарных методов контроля ТКС;
- автоматизированный прибор для неразрушающего заводского контроля ТКС биметаллических оребренных труб.

Практическая ценность работы. Разработанные методы и созданные на их основе автоматизированные приборы позволяют организовать массовый неразрушающий контроль ТКС и отбраковку промышленных биметаллических теплообменных труб в заводских условиях, непосредственно после их изготовления.

Апробация работы. Содержание диссертации обсуждалось: 1) на XI-ой Международной деловой встрече "Диагностика-2001"; 2) ХП-ой Международной деловой встрече "Диагностика-2002"; 3) на XXI-ом тематическом семинаре "Диагностика оборудования и трубопроводов КС"; 4) на И-ой Международной научно-технической конференции "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке"; 5) на XXIX-XXX научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГУНиПТ.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 5 научных статей и получен патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (109 наименований) и приложения. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 52 рисунка.

Температурные измерения на всех этапах работы обеспечивались электронно-вычислительными контроллерами, разработанными по специальному заказу и изготовленными фирмой ООО "ЛМТ" в СПбГУИТМО.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Существующие методы измерения ТКС биметаллических оребренных труб.

В биметаллических трубах АВО несущая труба теплообменника (обычно стальная или латунная) обеспечивает ему механическую и химическую прочность, а наружная оребренная алюминиевая труба обеспечивает интенсивный конвективный теплообмен АВО с воздушной наружной средой.

Тепловая эффективность любой теплообменной трубы определяется ее теплопередающей способностью между протекающей внутри трубы жидкостью и наружным воздухом. В биметаллических трубах ТКС может значительно превышает тепловое сопротивление самих труб, но при качественном изготовлении изменяется в пределах $(0,70 \dots 4,0) \cdot 10^4 \text{ м}^2\text{-К/Вт}$. Конкретная величина ТКС зависит от множества трудно контролируемых факторов, каждый из которых способен резко снизить теплопередающую способность трубы. Поэтому проблема экспериментального контроля ТКС готовых труб на этапе их установки в трубные пучки или теплообменные секции весьма актуальна.

Экспериментальные и теоретические исследования, посвященные контактному тепловому сопротивлению разъемных контактных соединений, в основном были выполнены в 40-60-х годах XX-го столетия. Их результаты обобщены в нескольких монографиях. Систематическим изучением особенностей ТКС биметаллических труб в 80-х и 90-х годах активно занимались В.Б. Кунтыш, Н.Н. Стенин, В.Г. Зайцев и др. В частности, они установили, что при накатке алюминиевой трубы на стальную основную долю в контактном сопротивлении составляет сопротивление воздушной прослойки. Было установлено, что температурные напряжения и деформации в биметаллических трубах начинают активно проявляться только при рабочих температурах в зоне контакта, превышающих $t > 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Прямыми опытами им удалось показать, что замещение воздуха в зоне контакта индустриальным маслом способно снизить ТКС практически в 3 раза. К сожалению, масло при длительной эксплуатации труб постепенно испаряется или выгорает.

Все известные методы контроля ТКС металлических труб подразделяются на тепловые и косвенные. В косвенных методах для оценки ТКС используются факторы нетепловой природы. В тепловых методах ТКС регистрируется по температурному перепаду, который возникает в зоне контакта труб при радиальном распространении теплоты.

Попытки использовать для контроля ТКС косвенные методы стимулируются простотой их реализации. Для них пригоден любой нетепловой параметр, хотя бы частично влияющий на величину ТКС. Укажем на два таких метода - метод выпрессовки и электрический метод.

Метод выпрессовки является разрушающим и был рекомендован к внедрению на заводах-изготовителях труб. При контроле ТКС этим методом производится выпрессовка несущей трубы из короткого куска биметаллической трубы. В его основу положена косвенная связь ТКС с напряжениями сжатия труб в зоне их контакта. Однако надежность метода реально оказалась очень низкой, так как сила сцепления труб зависит не только от напряжений сжатия, но также от чистоты поверхностей контакта и следов заводской консервационной смазки (солидола, индустриального масла).

Электрический метод. В этом методе для оценки ТКС предлагалось использовать зависимость электрического сопротивления контакта от относительной площади пятен контакта между трубами. Метод может быть неразру-

шающим. Однако внедрить его в заводскую практику не удалось из-за громоздкости и низкой воспроизводимости результатов измерений.

Среди тепловых методов контроля ТКС заслуживают особого внимания два — стационарный и регулярный методы. Оба метода являются неразрушающими и были разработаны под руководством проф. В.Б. Кунтыша.

Стационарный метод является наиболее естественным, так как полностью воспроизводит штатные условия эксплуатации биметаллических труб. На основе этого метода была создана промышленная установка и внедрена на ряде заводов. В установке через исследуемую трубу пропускается насыщенный водяной пар фиксированного давления. Исследуемый участок трубы закрыт кожухом и обдувается наружным воздухом. Измерения проводятся в условиях стационарного теплового режима. Величина теплового потока, отводимого воздушным потоком с рабочего участка, регистрируется с помощью дифференциальной термопары, один из спаев которой расположен перед трубой, другой спай — за трубой. К сожалению, стационарный метод не решил проблему экспрессного неразрушающего контроля ТКС. На исследование одной трубы затрачивалось более двух часов. Кроме того, в опыте непосредственно измерялось полное тепловое сопротивление между водяным паром и наружной средой, а на долю ТКС в нем приходится обычно не более 20 %.

Метод регулярного режима был предложен группой В.Б. Кунтыша в 1998 г. с целью дальнейшего совершенствования стационарного метода. В новом методе измерение ТКС предлагалось выполнять в условиях регулярного теплового охлаждения предварительно нагретой трубы. К сожалению, метод остался не реализованным. Более того, анализ показал, что в нем сохранились основные недостатки стационарного метода. В частности, в нем на долю ТКС приходилась лишь малая доля измеряемого теплового сопротивления.

Общий анализ проблемы позволил сформулировать комплекс требований, которым должен удовлетворять современный прибор неразрушающего контроля ТКС труб в заводских условиях. Очевидно, что такой прибор должен быть переносным, автоматизированным, быстродействующим и обладать необходимой чувствительностью, а сам процесс исследования одной готовой трубы должен занимать всего несколько минут, включая вспомогательные операции.

Удовлетворить таким требованиям, по-видимому, могут только нестационарные тепловые методы контроля. Дополнительные трудности обусловлены тем, что для регистрации тепловых сопротивлений в $(0,70...4,0) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ требуется высокочувствительная электронная измерительная техника, способная регистрировать слабые сигналы температурных датчиков, инерционность которых к тому же должна составлять доли секунды. Очевидно также, что для контроля ТКС пригодны только те нестационарные методы, в которых обеспечивается значительный перепад температуры на границе контакта. Наиболее привлекательными представляются методы, опирающиеся на закономерности линейного разогрева, методы импульсного разогрева и релаксационные методы, опирающиеся на закономерности контактного теплообмена между трубами.

2. Теоретические основы тепловых неразрушающих методов контроля ТКС биметаллических труб.

1. *Стационарный метод* (рис. 1). Через исследуемую трубу принудительно, при постоянном гидравлическом напоре пропускается вода с комнатной

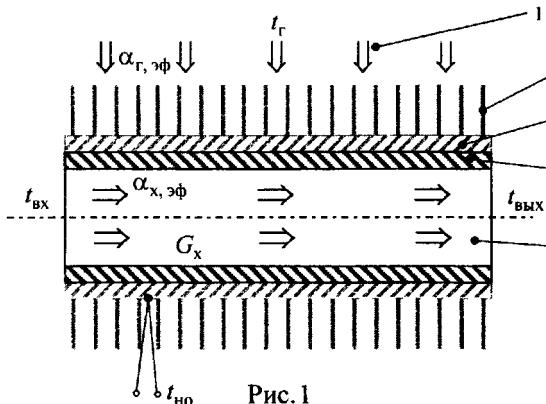


Рис. 1

температурой. Рабочий участок трубы обдувается горячей воздушной струей 1. В опыте регистрируются установившаяся температура $t_{но}$ основания ребер 2 наружной трубы, расход воды и приращение ее температуры при прохождении через нагреваемый участок. По этим данным вычисляется ТКС трубы. Горячая воздушная струя, участвуя в конвективном теплообмене с

ребрами, создает радиальный тепловой поток через наружную 3 и внутреннюю 4 трубы, который затем поглощается и уносится проточной водой. Измеряемыми параметрами являются температура основания ребер наружной трубы, ее расход, начальная температура проточной воды и ее приращение. Теплоотдача между ребрами и воздушной средой в расчетную формулу не входит. Расчеты показывают, что при расходе воды (0,1...0,3) л/с тепловое сопротивление между трубой и водой не должно превышать величины ТКС, поэтому при интенсивном наружном обдуве трубы горячим воздухом длительность опыта может сократиться до 1...3 минут.

2. *Регулярный метод охлаждения трубы проточной водой* является развитием предыдущего метода (см. рис. 1). Через исследуемую трубу пропускается вода с комнатной температурой, а ее рабочий участок на начальном этапе опыта импульсно подогревается струей горячего воздуха. Температурный датчик контролирует перепад температуры $\vartheta(\tau)$ между основанием ребер наружной трубы и проточной водой на входе в трубу. После прекращения разогрева трубы начинается быстрое охлаждение трубы проточной водой и производится автоматическая регистрация изменяющихся во времени показаний температурного датчика. Затем по показаниям датчика вычисляется темп m регулярного охлаждения трубы. Определение ТКС существенно упрощается, если опыты проводятся при очень больших значениях коэффициента теплоотдачи (при условии $\alpha P_k \geq 10$). Длительность рабочей стадии опыта в этом случае не превышает одной минуты, а расчетная формула для ТКС приобретает вид

$$P_k = \frac{F_k}{C_H m}, \quad (1)$$

где F_k - площадь геометрического контакта, отнесенная к единичной длине трубы, m^2/m ; C_H - теплоемкость наружной трубы, Дж/К;

3. *Адиабатический релаксационный метод.* Рабочий участок биметаллической трубы на предварительной стадии опыта подвергается интенсивному радиальному импульсному тепловому воздействию, продолжительность которого ограничивается 10...20 секундами (стадия /, рис. 2). Воздействие может быть наружным или внутренним. За время воздействия на рабочем участке трубы возникает неравномерное радиальное температурное поле, с достаточно заметным (до 20...40 К)

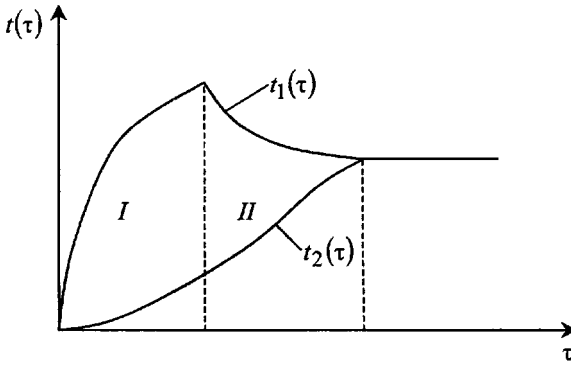


Рис. 2

скачком температуры на границе контакта труб. После прекращения воздействия в трубе возникает релаксационный тепловой процесс, сопровождающийся выравниванием температур наружной и внутренней труб (стадия //, рис. 2). В опыте регистрируется температура наружной или внутренней труб.

Рассматриваемый метод существенно отличается от регулярного метода, так как рабочий участок трубы на стадии релаксации остается теплоизолированным от внешних тепловых воздействий, и интенсивность процесса выравнивания температуры труб определяется только величиной ТКС. На рабочей стадии опыта изменение температур наружной и внутренней труб $t_1(\tau)$, $t_2(\tau)$ в адиабатических условиях определяются уравнением теплового баланса

$$C_1 \frac{dt_1}{d\tau} + C_2 \frac{dt_2}{d\tau} = 0, \quad (2)$$

а контактный теплообмен между трубами связан соотношением

$$C_1 \frac{dt_1}{d\tau} = \frac{F_k}{P_k} (t_2 - t_1), \quad (3)$$

C_1 , C_2 — теплоемкости оребренной и несущей трубы, соответственно, Дж/К.

Анализ показывает, что процесс релаксации происходит по экспоненциальному закону (рис. 2), а расчет ТКС производится по формуле

$$P_k = F_k \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \tau_0, \quad (4)$$

где τ_0 — показатель экспоненты, составляющий обычно всего 1,5...5 с.

4. Методы импульсного разогрева наружным или внутренним радиальным тепловым потоком. Рабочий участок трубы подвергается интенсивному кратковременному воздействию со стороны наружного или внутреннего радиального теплового источника с равномерно распределенной постоянной мощностью.

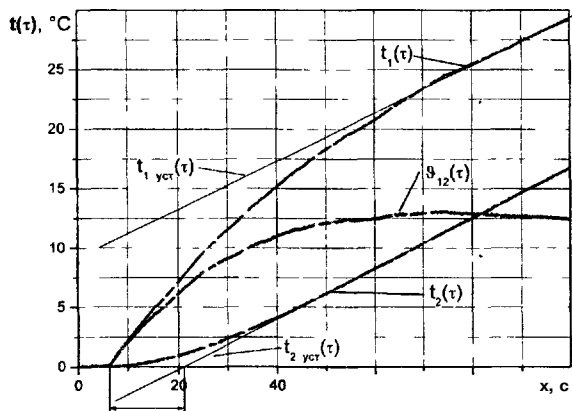


Рис.3

Возможны два метода измерений. В одном из них осуществляется одновременная регистрация температуры наружной и внутренней труб. Во втором, упрощенном методе регистрируется только температура одной из труб.

Исходные уравнения метода близки к тем, которые уже рассматривались в п. 3. Особенности изменения температуры труб показаны на рис. 3.

На квазистационарной стадии опыта температуры труб $t_1(\tau)$, $t_2(\tau)$ становятся линейными функциями, а перепад между ними - постоянным. Для расчета P_k пригодна любая из формул

$$P_k = \frac{C_1 + C_2}{\tau} F_k \tau_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_2} F_k \tau_1 = \frac{F_k}{C_2} \tau_{1,2}. \quad (5)$$

По метрологическим возможностям наиболее привлекателен линейный метод двух температурных датчиков, особенно с разогревом изнутри, через отверстие трубы. Важно, что в линейном методе резко снижаются требования к инерционности нафевателя и температурных датчиков. При работе с одним температурным датчиком для расчетов P_k удается использовать только начальную стадию опыта

5. Методы радиального импульсного разогрева биметаллической трубы горячей воздушной струей. Методы этой группы по основным признакам являются разновидностью методов, рассмотренных в и. 4. Их отличие обусловлено только спецификой разогрева контролируемого участка трубы. В качестве источника нагрева используется струя горячего воздуха, сохраняющая в опыте практически постоянную температуру. Ребра наружной трубы разогреваются в условиях конвективного теплообмена. Влияние тепловой инерционности струи удается снижать простыми механическими приемами (заслонкой или поворотом струи). Характер изменения температур труб показан на рис. 4.

Особенности теплового режима определяются спецификой уравнения теплового баланса и начальными условиями

$$C_1 \frac{dt_1}{d\tau} + C_2 \frac{dt_2}{d\tau} = \alpha_{\text{эф}} F_{\text{к}} (t_{\text{с}} - t_1), \quad t_1(0) = t_2(0) = 0, \quad \frac{dt_2(0)}{d\tau} = 0. \quad (6)$$

Анализ показывает, что при определенных, легко реализуемых условиях опыта, расчет ТКС можно производить по одной из формул, приведенных в п.5.

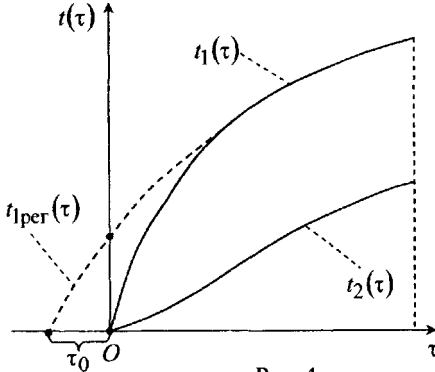


Рис. 4

6. *Релаксационный метод свободного охлаждения труб* является обобщением адиабатического релаксационного метода. На начальном этапе опыта выбранный контролируемый участок трубы интенсивно разогревается горячей воздушной струей в течение нескольких секунд. После резкого удаления горячей струи контролируемый участок начинает свободно охлаждаться в условиях естественного конвективного теплообмена с наружным воздухом комнатной температуры и соседни-

ми холодными участками трубы. Малоинерционная термопара, рабочий спай которой плотно прижимается к основанию одного из ребер, регистрирует процесс релаксации. На начальной стадии свободного охлаждения, пока остается заметным перепад температуры между наружной и внутренней трубами, закономерности охлаждения наружной трубы существенно зависят от величины ТКС между трубами. После выравнивания температур наружной и внутренней труб рабочий участок продолжает охлаждаться как изотермическое тело.

Расчеты показывают, что температура $t_1(\tau)$ наружной трубы на участке свободного охлаждения изменяется по экспоненциальному закону

$$t_1(\tau) = A_1 \exp(-m_1 \tau) + A_2 \exp(-m_2 \tau). \quad (7)$$

Параметры m_1 и m_2 этой функции определяются соотношениями

$$m_1 \cong \frac{\alpha_{\text{эф}} F_{\text{к}}}{C_1 + C_2}, \quad m_2 \cong \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \frac{F_{\text{к}}}{P_{\text{к}}}. \quad (8)$$

Расчетная формула для ТКС имеет вид

$$P_{\text{к}} \cong \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \frac{F_{\text{к}}}{m_2}, \quad (9)$$

т. е. практически совпадает с формулой (4).

Выводы. 1. Все рассмотренные методы удовлетворяют основным требованиям, которые выдвигаются к прибору контроля ТКС труб в заводских условиях. Однако по условиям эксплуатации все же более перспективны три группы нестационарных методов — методы линейного разогрева, релаксационные методы и методы начальной стадии теплового импульса.

2. Важной особенностью всех нестационарных методов является очень малая длительность рабочей стадии опыта, обычно не превышающая 20 с. В

расчетные формулы входят временные промежутки, составляющие обычно не более 0,7 с. Поэтому температурные датчики должны обладать уникально малой инерционностью (менее 1,0 с). Для теплового воздействия на исследуемый участок трубы следует использовать нагреватели с крутым фронтом импульса. Следовательно, необходим автоматизированный электронный контроллер, с чувствительностью порядка 10 мкВ и быстродействием не менее 0,05 с.

3. Экспериментальное исследование нестационарных методов контроля ТКС биметаллических труб.

При проверке нестационарных методов контроля ТКС удалось использовать целый ряд общих узлов: импульсные источники интенсивного нагрева, малоинерционные датчики температуры и контроллер, позволяющий регистрировать быстро меняющиеся сигналы температурных датчиков. Поэтому одновременно с проверкой методов осуществлялась разработка конструкций нагревателей (рис. 5 (а)) и температурных датчиков (рис. 5 (б)).

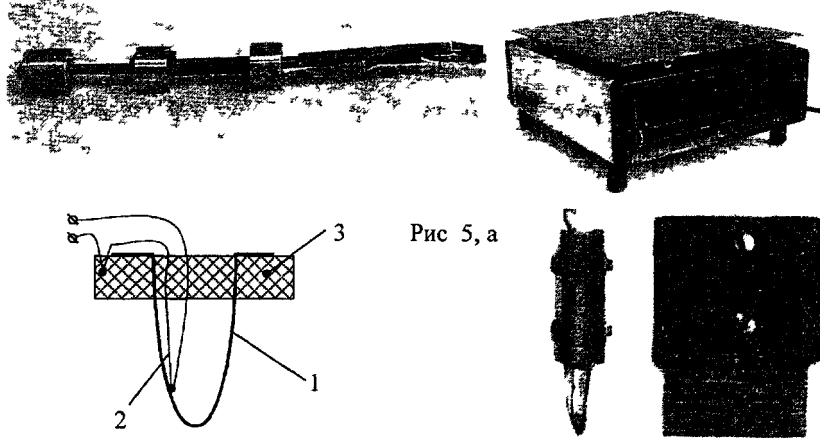


Рис 5, а

Рис 5, б

Для нагрева в принципе пригодны любые по природе радиальные источники, как внутренние, так и наружные. Важно лишь, чтобы они обеспечивали возникновение одномерного радиального температурного поля в трубе, а длительность их воздействия легко ограничивалась несколькими секундами. Чтобы выбрать наиболее удобный способ нагрева, пришлось провести специальные исследования. Оказалось, что ни один из известных тепловых источников сам по себе не обладает такой малой тепловой инерционностью, которая необходима для импульсного нагрева биметаллической трубы. Проблему инерционности удалось решить только с помощью подвижных тепловых источников.

При внутреннем разогреве удовлетворительные результаты дали два нагревательных устройства, выполненные в виде металлического стержня с вмонтированным в него стационарно действующим проволочным нагревателем. Такой стержень работает в челночном режиме, двигаясь в исследуемую зону

трубы на несколько секунд. Тепловая инерционность стержня-челнока связана со скоростью его перемещения внутри трубы. Кратковременный наружный разогрев рабочего участка трубы удалось реализовать с помощью стандартных воздушных тепловентиляторов и фенов. Кратковременность нагрева обеспечивается с помощью заслонки или быстрым изменением направления горячей воздушной струи.

При выборе температурных датчиков особое внимание было уделено термопарам и термометрам сопротивления. Термопары отличаются особой простотой реализации и имеют малую внутреннюю тепловую инерционность. Их пригодность для использования в рассматриваемых методах целиком зависит от внешних факторов, т. е. от способа крепления к рабочему участку трубы и чувствительности вторичного устройства, регистрирующего слабый электрический сигнал термопары. Термометры сопротивления, как металлические, так и полупроводниковые (термисторы, диоды и транзисторы), также обладают очень малой внутренней тепловой инерционностью. К тому же они значительно чувствительнее термопар. В процессе исследований обоснован выбор несколько удачных конструкций термопарных и терморезисторных датчиков.

Наиболее удобной с практической точки зрения приходится признать датчик, механическую основу которого образует тонкая упругая металлическая пластинка, копирующая профиль зазора между соседними ребрами. К внутренней поверхности пластинки приклеиваются электроды рабочего спая термопары или проволочная сетка металлического термометра сопротивления. Благодаря упругим свойствам пластинка оказывается в хорошем механическом и тепловом контакте с ребрами, поэтому ее температура в опыте практически совпадает со средней температурой наружной трубы.

Исследования показали, что во всех нестационарных методах контроля ТКС длительность опыта не превышает 10...30 секунд. Причем за это время приходится фиксировать не менее 100...200 слабых электрических сигналов с чувствительностью по напряжению не менее 2... 10 мкВ. Для обеспечения температурных измерений использовался *контроллер*, специально разработанный и изготовленный фирмой ООО "ЛМТ". В дальнейшем, при разработке прибора контроллер взял на себя аналитическую обработку экспериментального массива, с передачей необходимой информации в персональный компьютер для более детального анализа.

При разработке методов контроля ТКС использовались несколько упрощающих допущений. Основными являются допущения о том, что внутренняя и наружная трубы, включая и ребра последней, сохраняют в опыте изотермичность. Чтобы оценить их влияние, был проведен более детальный теоретический анализ температурных полей в системе "внутренняя труба-контакт-наружная труба - ребра", что позволило уточнить расчетные формулы каждого метода и ввести в них дополнительные систематические поправки. В некоторых случаях величина поправок достигает (30...50)%. Главной оказывается поправка на неравномерность температурного поля в ребрах, особенно при разогреве трубы наружным тепловым потоком.

Экспериментальное исследование предложенных нестационарных методов контроля ТКС проводилось на образцах, вырезанных из промышленных биметаллических труб. По эксплуатационным соображениям предпочтение априорно было отдано тем нестационарным методам, в которых тепловой импульс создавался струей воздуха или нагретым металлическим стержнем, а в качестве температурных датчиков использовались малоинерционные термопары и проволочные терморезисторы. Экспериментальная проверка выбранных методов осуществлялась в основном с целью определения их реально достижимой чувствительности.

Исследования показали, что наиболее чувствительные методы неизбежно уступают другим методам по эксплуатационным показателям. Поэтому при окончательном выборе наиболее перспективного метода контроля ТКС пришлось анализировать весь комплекс эксплуатационных, технических и метрологических показателей каждого метода, с учетом реально достигнутых технических характеристик созданных в процессе работы узлов нагрева и регистрации температуры.

Для проведения систематической экспериментальной проверки разрабатываемых методов контроля ТКС был собран специальный лабораторный стенд, состоящий из набора отрезков различных по типоразмерам промышленных биметаллических труб, двух типовых тепловентиляторов, нескольких специально изготовленных нагревателей, температурных датчиков и двух специализированных контроллеров, которые обеспечивали автоматическую регистрацию их быстро меняющихся сигналов. Помимо этого был изготовлен набор имитаторов биметаллических труб с различными контактными тепловыми сопротивлениями. Во всех имитаторах и в нескольких отрезках промышленных труб были выполнены небольшие отверстия для установки контрольных термопар.

С помощью стенда производился поиск таких способов импульсного радиального разогрева, в которых длительности начального и конечного участков импульса, как и в случае температурных датчиков, не превышали долей секунды. В частности, удалось показать, что при разогреве трубы через внутреннюю поверхность этому условию способны удовлетворить только нагреватели челночного типа. А в случае наружного разогрева прямоугольную форму теплового импульсу способна придать только управляемая подвижным соплом горячая воздушная струя.

Экспериментально проверялись три родственные группы методов контроля ТКС: методы линейного разогрева, методы начальной стадии импульсного разогрева и релаксационные методы. Теория их изложена во второй главе. Отдельно изучались эксплуатационные особенности и метрологические возможности каждого метода, причем как при внутреннем, так и наружном тепловом воздействии на исследуемый участок трубы.

На рис. 6 показан график с первичными результатами опыта при наружном нагреве трубы и использованием двух датчиков температуры. На рис. 7 представлен первичный график зависимости температуры оребренной трубы при наружном нагреве, для определения ТКС используется одни температур-

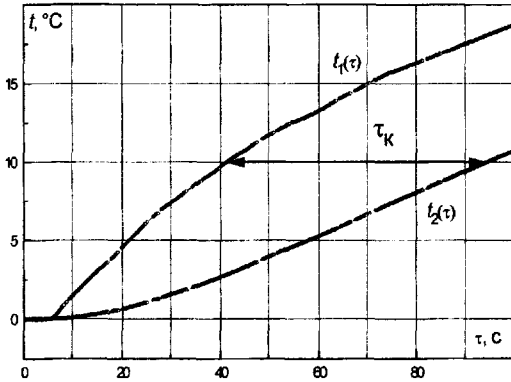


Рис. 6

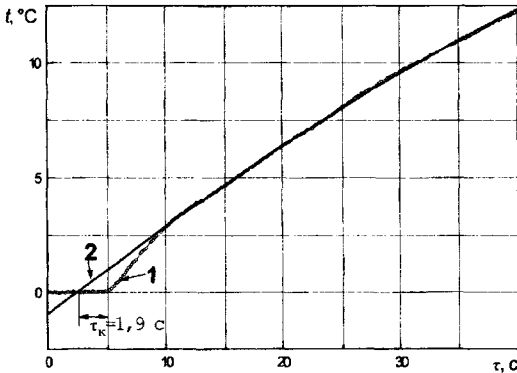


Рис. 7

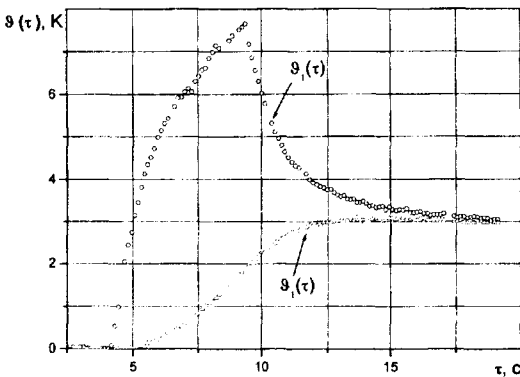


Рис. 8

ный датчик. На рис. 8 иллюстрируется экспериментальный график, полученный при реализации релаксационного метода свободного охлаждения трубы. Графики наглядно иллюстрируют возможности каждого нестационарного метода.

Обобщая результаты экспериментальной проверки предложенных методов контроля ТКС биметаллических труб, удалось сделать ряд выводов:

- все рассмотренные методы в принципе пригодны для экспрессного неразрушающего контроля ТКС промышленных биметаллических труб, но имеют заметно различающиеся технические, эксплуатационные и метрологические характеристики;

- наиболее высокую метрологическую надежность обеспечивают линейные, квазистационарные методы контроля, в которых используются два температурных датчика. Несколько уступают им релаксационные методы. В импульсных методах приходится предъявлять особенно жесткие требования к форме теплового импульса и инерционности температурных датчиков;

- по метрологическим показателям методы с наружным нагревом уступают аналогичным методам, в которых используется нагрев изнутри;

- при наружном нагреве удастся применять промышленные тепловентиляторы и фены, которые могут с успехом использоваться в приборах перенос-

ного типа. Устройства нагрева изнутри нуждаются в индивидуальной разработке. Их применение заметно ухудшает эксплуатационные характеристики метода;

- методы линейного разогрева способны осуществлять контроль ТКС с пороговой чувствительностью не хуже $1 \cdot 1$ ($Г^* \text{ м}^2\text{К/Вт}$). Другие методы по чувствительности несколько уступают им, однако вполне пригодны для отбраковки некондиционных труб;

- при наружном нагреве оребренной трубы горячей воздушной струей проявляется угловая несимметричность температурного поля ребер. Для снижения ее влияния приходится согласовывать угол атаки воздушной струи с расположением наружного температурного датчика;

- экспериментально установлено, что оптимальная длина исследуемого локального участка оребренных труб может составлять примерно 150 мм. В этом случае теплообмен исследуемого участка с соседними участками трубы не вносит заметных искажений в одномерную тепловую модель методов.

Основные результаты и выводы

1. Существующая измерительная техника не удовлетворяет требованиям экспрессного заводского контроля ТКС биметаллических теплообменных труб на этапе их изготовления. Установлено, что наиболее полно удовлетворить этим требованиям могут тепловые методы, в которых используются закономерности локального нестационарного разогрева труб.

2. Разработаны и теоретически обоснованы три группы нестационарных методов контроля ТКС биметаллических труб: методы линейного квазистационарного разогрева, релаксационные методы и методы начальной стадии импульсного теплового воздействия.

3. Проведено комплексное лабораторное исследование всех трех групп нестационарных методов контроля ТКС. Созданы три варианта устройств импульсного нагрева и два варианта температурных датчиков, обладающих уникально малой инерционностью ($\sim 0,4$ с).

4. Выполнен комплексный теоретический анализ нестационарного температурного поля системы "внутренняя труба - контакт - наружная труба - ребра", позволивший выявить структуру систематических поправок на неоднородность температуры в трубах и ребрах.

5. Создан опытный образец автоматизированного переносного прибора, обеспечивающего экспрессный неразрушающий контроль ТКС промышленных биметаллических оребренных труб на этапе их изготовления.

01.04

**Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:**

1. Бессонный А.Н., Бессонный Е.А., Башенко А.Р., Савельев В.Н. Опыт проведения экспертизы промышленной безопасности АВО в химической и газовой отраслях промышленности. Тезисы докл. Всеросс. науч.-практич. конф. "Промышленная безопасность", Госгортехнадзор России, "НТЦ "Промышленная безопасность", М.: 2001, с. 54.

2. Бессонный А.Н., Бессонный Е.А., Платунов Е.С., Баранов И.В., Платунов А.Е. Способ контроля качества механического соединения оребренной оболочки с несущей трубой в биметаллической трубе. Патент РФ № 2211422, кл. 7F 28 D 1/00, G 01 K 17/08. Приоритет от 29.10.2002 г.

3. Баранов И.В., Бессонный А.Н., Бессонный Е.А. Возможности нестационарных методов определения контактного теплового сопротивления биметаллических труб // П-ая Международная научно-техническая конференция. "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке". Сборник трудов: СПбГУНИПТ, 2003, т. 2, стр. 307-313.

4. Баранов И.В., Бессонный А.Н., Бессонный Е.А., Платунов А.Е. Автоматизированный прибор для неразрушающего экспресс-контроля термического контактного сопротивления оребренных труб в АВО. Научно-технический сборник "Диагностика оборудования и трубопроводов". М: 2003 г., ИРЦ "Газпром", с 7-22.

5. Бессонный Е.А. Метод определения теплового контактного сопротивления биметаллических труб. Петербургские традиции хлебопечения, пивоварения, холодильного хранения и консервирования. Научно-техническая конференция молодежи, посвященная 300-летию Санкт-Петербурга. Сборник трудов. -СПб.: 2003, -с. 56-58.

6. Бессонный Е.А. Анализ нестационарных методов определения контактного сопротивления биметаллических труб. Сборник трудов молодых ученых. СПб.: 2004, - с. 19 - 21.

Подписано к печати 10 02 05 Формат 60x80 1/16 Бумага писчая.
Печать офсетная Печ л 10 Тираж 80 экз Заказ № 29

СПбГУНИПТ 191002, Санкт-Петербург, ул Ломоносова, 9
ИПЦ СПбГУНИПТ 191002, Санкт-Петербург, ул Ломоносова, 9

184

22 АПР 2005