

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ БЕЗДЕМОНТАЖНОЙ ПОВЕРКИ ПОГРУЖНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ В ТРУБОПРОВОДАХ

Симонов В.Н., к.т.н., Маринко С.В., к.т.н.

Московский Инженерно-Физический Институт (ТУ), г. Москва, 32ГНИИИ МО РФ, г. Мытищи

В настоящее время измерения температуры в сложных технических системах (СТС) объединяет общая проблемная ситуация, связанная с неэффективностью, а в ряде случаев – с невозможностью изъятия средств измерений для проведения работ по метрологическому обслуживанию. Бездемонтажная поверка средств измерений температуры является сверх актуальной задачей. Ее решение прямо определяет целый ряд важнейших специальных свойств СТС. Актуальные вопросы бездемонтажной поверки термометров, контролирующих температуру в трубопроводах, изложены в [1]. В развитие полученных результатов в данной работе приводятся теоретические расчеты, помогающие более конкретно оценить возможности метода бездемонтажной поверки.

### Проблемы реализации бездемонтажной поверки

Цели бездемонтажной поверки в своей основе достигаются тем, что в качестве образцового датчика (рабочего эталона) используют датчик температуры поверхности, который располагают на поверхности объекта в непосредственной близости к поверяемому датчику (рис.1) [2,3].

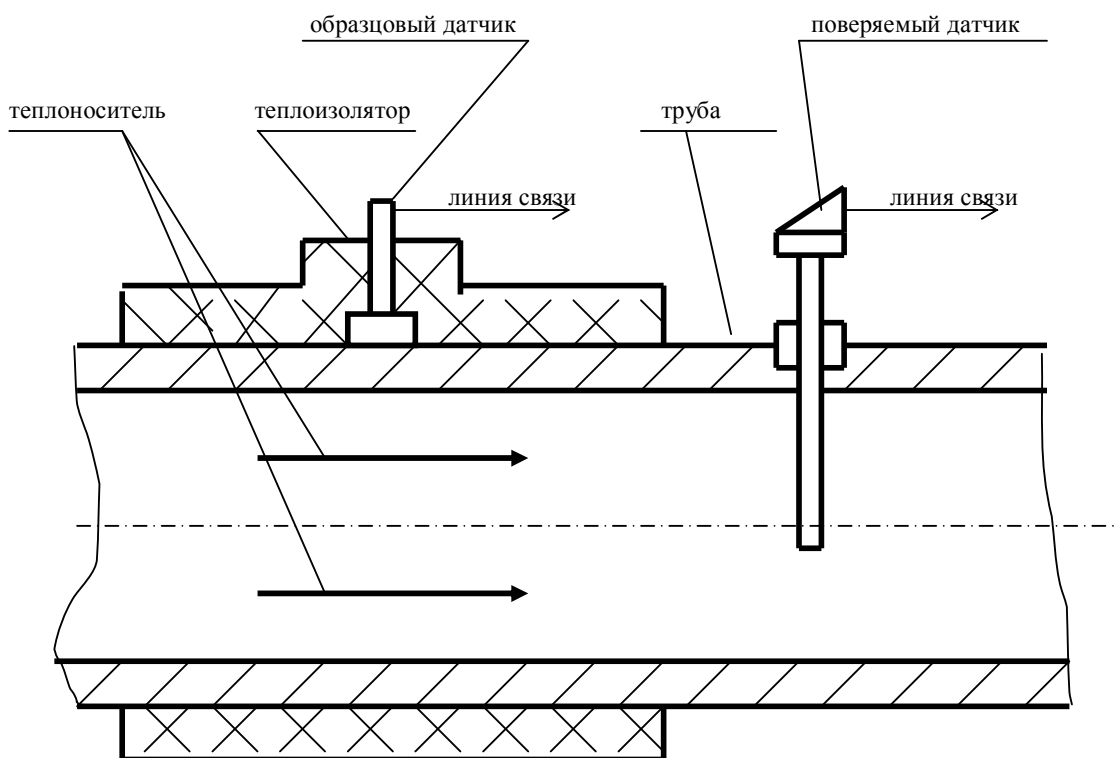


Рис.1. Схема бездемонтажной поверки.

В качестве объекта измерений в данной работе рассматривается трубопровод с теплоносителем. Задача анализа условий проведения бездемонтажной поверки заключается в необходимости оценить методическую погрешность из-за разности действительной температуры теплоносителя и температуры на поверхности трубопровода. Проблемы, связанные с реализацией рассматриваемого метода, заключаются в необходимости снижения влияния некоторых факторов в значительной степени влияющих на суммарную погрешность измерений температуры. Рассмотрим эти факторы подробней.

На рис.2а качественно изображен график распределения температуры по сечению трубопровода, показывающий источник проявления погрешности, связанной с пространственным градиентом температуры. Из графика распределения температуры видно, что температура внешней поверхности трубы значительно отличается от температуры на оси трубы. Теплообмен с окружающей трубопровод средой сильно искажает температурное поле и, соответственно, показания датчика температуры, установленного на этой поверхности будут сильно отличаться от температуры теплоносителя на оси трубы. Слой теплоизоляции существенно снижает градиент температуры вдоль радиуса трубы и позволяет осуществлять бездемонтажную поверку (рис.2,б).

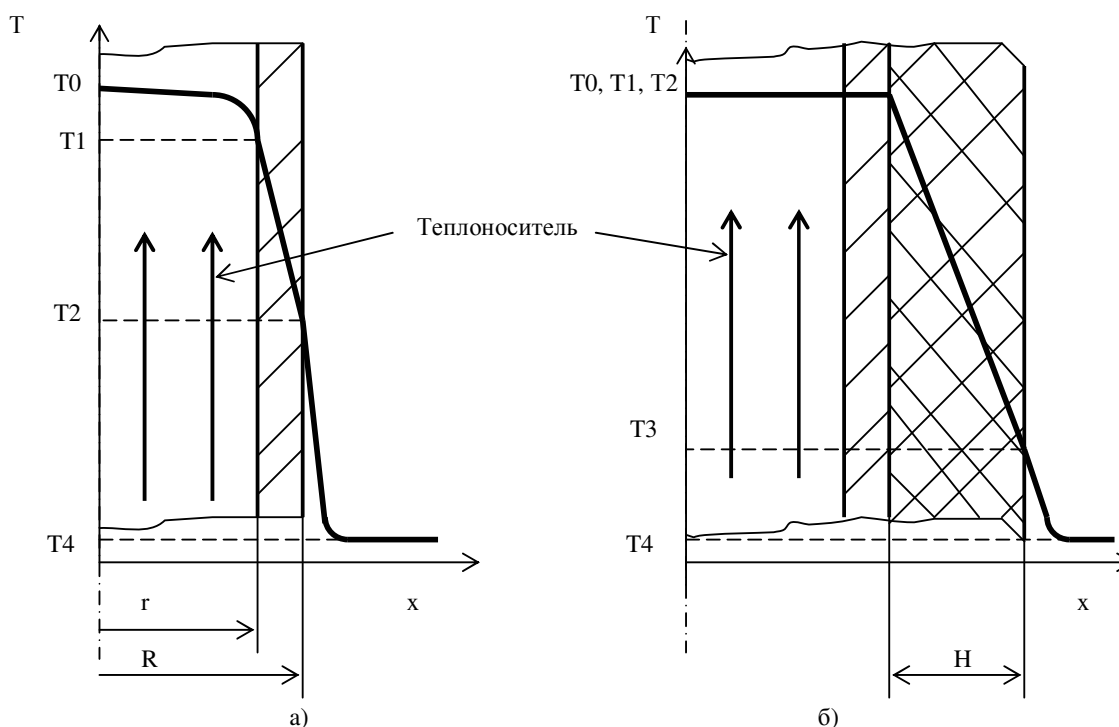


Рис.2. Распределение температуры  $T$  вдоль текущего радиуса  $x$  в трубе с теплоносителем, непокрытой теплоизоляцией (а) и покрытой теплоизоляцией (б). Температура на оси трубы -  $T_0$ , на внутренней поверхности трубы -  $T_1$ , на внешней поверхности трубы  $T_2$ , в окружающем воздухе -  $T_3$ , на поверхности теплоизолятора  $T_4$ .

Из уравнения Фурье, описывающего процессы теплопередачи, следует, что пространственные неоднородности температурного поля тесно связаны с временными через теплофизические свойства участвующих в процессе элементов конструкции. В

общем случае теоретическое описание этих процессов является чрезвычайно сложной задачей. Однако определенные упрощения позволяют получить приближенные оценки основных параметров.

Из характера использования получаемых результатов следует, что для нас представляет интерес зависимость разности между температурой теплоносителя на оси трубы  $T_0$  и температурой поверхности трубы  $T_2$  от параметров трубы, свойств теплоносителя, свойств окружающей трубу среды и скорости теплоносителя  $v$ . Значение разности  $\Delta t = T_2 - T_0$  определяет нижнюю границу погрешности рассматриваемого метода.

Прежде всего, рассмотрим стационарный случай, когда изменение температуры происходит достаточно медленно по сравнению с тепловыми постоянными поверяемого термометра и рабочего эталона. Для упрощения анализа предполагаем, что диаметр трубы, по крайней мере, на порядок превышает её толщину. Это позволяет не учитывать кривизну стенки трубы.

#### **Анализ влияния различных факторов на разность между температурой на оси трубы и температурой на её поверхности (стационарный процесс)**

Рассмотрим ситуацию, изображенную на рис.2, б. Распределение температуры вдоль радиуса описывается выражением [4]:

$$(T_2 - T_0) / (T_4 - T_0) = (R_{01} + R_{12}) / (R_{01} + R_{12} + R_{23} + R_{34}), \quad (1)$$

где  $R_{01}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{34}$  – отнесенные к единице поверхности тепловые сопротивления соответственно - контакта между теплоносителем и внутренней поверхностью трубы, стенки трубы, слоя теплоизоляции, контакта между поверхностью теплоизоляции и окружающей её средой.

Выражения для тепловых сопротивлений имеют вид:

$$R_{01} = 1/\alpha_{01}, \quad R_{12} = d_{12}/\lambda_{12}, \quad R_{23} = d_{23}/\lambda_{23}, \quad R_{34} = 1/\alpha_{34}, \quad (2)$$

где  $d_{12}$  и  $d_{23}$  – толщины соответственно стенки трубы и слоя теплоизоляции,  $\lambda_{12}$  и  $\lambda_{23}$  – коэффициенты теплопроводности материалов соответственно стенки трубы и слоя теплоизоляции,  $\alpha_{01}$  и  $\alpha_{34}$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно теплоносителя стенке трубы и внешней стенки теплоизоляции окружающей среде.

Коэффициенты теплоотдачи являются в общем случае весьма сложными функциями теплофизических параметров участвующих в процессе материалов и не могут быть описаны аналитически. Однако в достаточном приближении их можно определить из следующих выражений [4].

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{01}$

(вязкое ламинарное течение  $Re < 2100$ )

$$Nu = 1,55(Re \cdot D/L)^{1/3},$$

(турбулентное течение  $Re > 5000$ )

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4},$$

где  $Re$ ,  $Nu$ ,  $Pe$ ,  $Pr$  – безразмерные комплексы Рейнольдса, Нуссельта, Пекле и Прандтля, выражения для которых здесь не приводятся,  $D$  – средний диаметр трубы,  $L$  – длина т.н. стабилизированного участка трубы (10-40 диаметров).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{34}$ . Этот параметр был определен из следующих соображений. В подавляющем большинстве случаев трубопровод с теплоносителем находится в условиях окружающего воздуха при нормальном атмосферном давлении и естественной конвекции. В этом случае коэффициент теплоотдачи для широкого диапазона диаметров стальных труб и перепадов температур между поверхностью и помещением от 25 до 200°C лежит в пределах от 8 до 20 Вт/м<sup>2</sup>·°C. При численных вычислениях нами было принято  $\alpha_{34} = 15$ .

Вычисления проводились в предположении, что

- материалом теплоносителя является вода,

- материалом трубы является сталь ( $\lambda_{12} = 40$ ),

- материал теплоизоляции имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda_{23} = 0,05$  (шлаковая вата, шерсть, пенопласт).

Результаты вычислений приведены на рис.3 для различных значений толщины слоя теплоизоляции. По оси ординат отложен параметр  $(T_2 - T_0)/(T_4 - T_0)$  в процентах, по оси абсцисс – скорость теплоносителя в см.

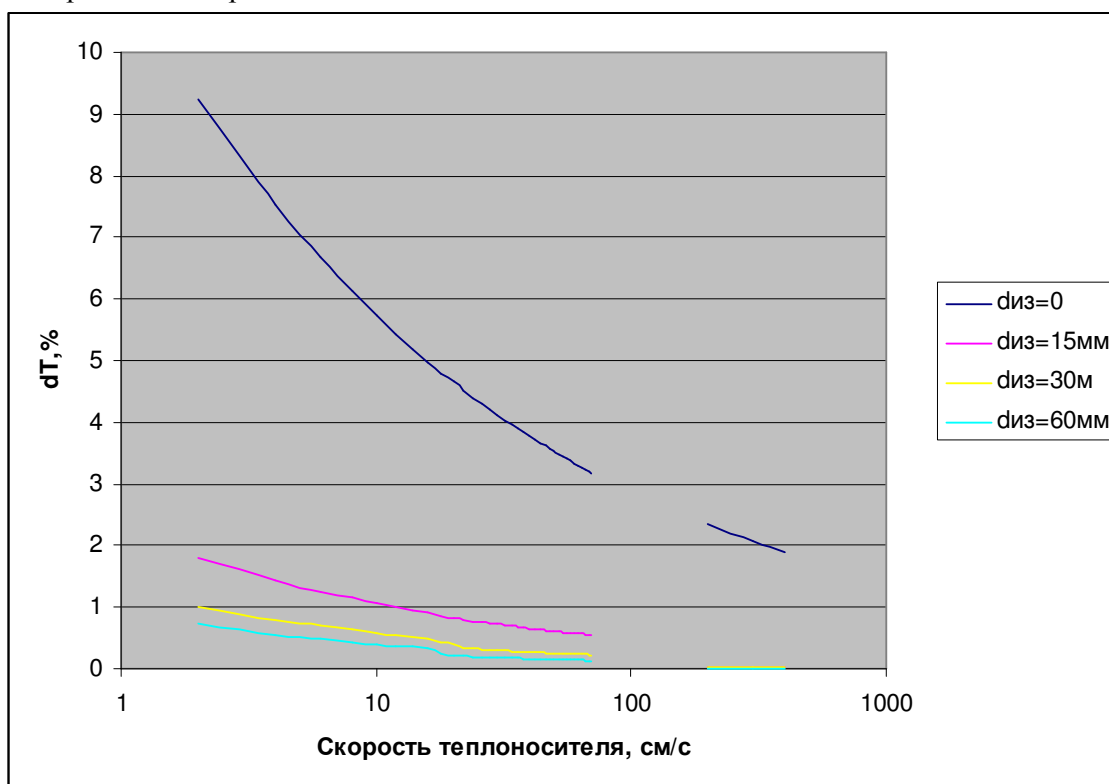


Рис.3. Относительный градиент температур между центром трубы и её внешней поверхностью в зависимости от скорости теплоносителя и толщины слоя теплоизоляции.

Из результатов анализа графика следует:

- в отсутствие теплоизоляции разность температуры может достигать почти десятка процента от максимального перепада температуры между теплоносителем и окружающей среды;
- покрытие трубы слоем теплоизоляции снижает рассматриваемый перепад температуры в десятки раз, создавая предпосылки для использования поверхностного термометра;
- скорость теплоносителя очень сильно влияет на перепад температуры.

При скоростях, соответствующих ламинарному течению (для воды менее 2см/с), только использование весьма толстого слоя изоляции может снизить перепад температуры до значений менее 0,5%. При турбулентном процессе протекания теплоносителя (для воды более 10 см/с) использование теплоизоляции позволяет снизить перепад температуры до 0,05% и менее.

Использование труб из материала с более высоким коэффициентом теплопроводности снижает перепад температуры.

#### **Исследование влияния длины слоя теплоизоляции на перепад температуры (стационарный процесс)**

Незащищенный теплоизоляцией участок трубы имеет градиент температуры вдоль толщины стенки (рис.2, а). Этот градиент создает истечение тепла через стенку и является источником погрешности рассматриваемого метода. Даже «идеальный» теплоизолирующий слой не может устранить градиент температур вблизи своего края в связи с тем, что при переходе от неизолированного участка к изолированному градиент не

может исчезнуть скачком. В месте перехода градиент постепенно снижается по мере удаления от границы вглубь защищенного участка. Представляет интерес оценка скорости снижения градиента – для правильного выбора длины слоя изоляции и расстояния  $L_{из}$  от края изоляции до места расположения образцового поверхностного термометра.

Для анализа данной проблемы можно использовать подход, применяемый при расчете длины пробника датчика температуры, омываемого средой с постоянной температурой, отличающейся от температуры его основания [4]. Опуская промежуточные выкладки, приведем выражение для полученного авторами искомого расстояния:

$$L_{изК} = - \ln(1/K) \cdot (\lambda \cdot d_{12} / \alpha_{01})^{0.5}, \quad (3)$$

где  $K$  – кратность снижения градиента.

При этом условно предполагается, что тепловое сопротивление контакта «труба-теплоизоляция» во много раз превосходит тепловое сопротивление контакта «теплоноситель-труба».

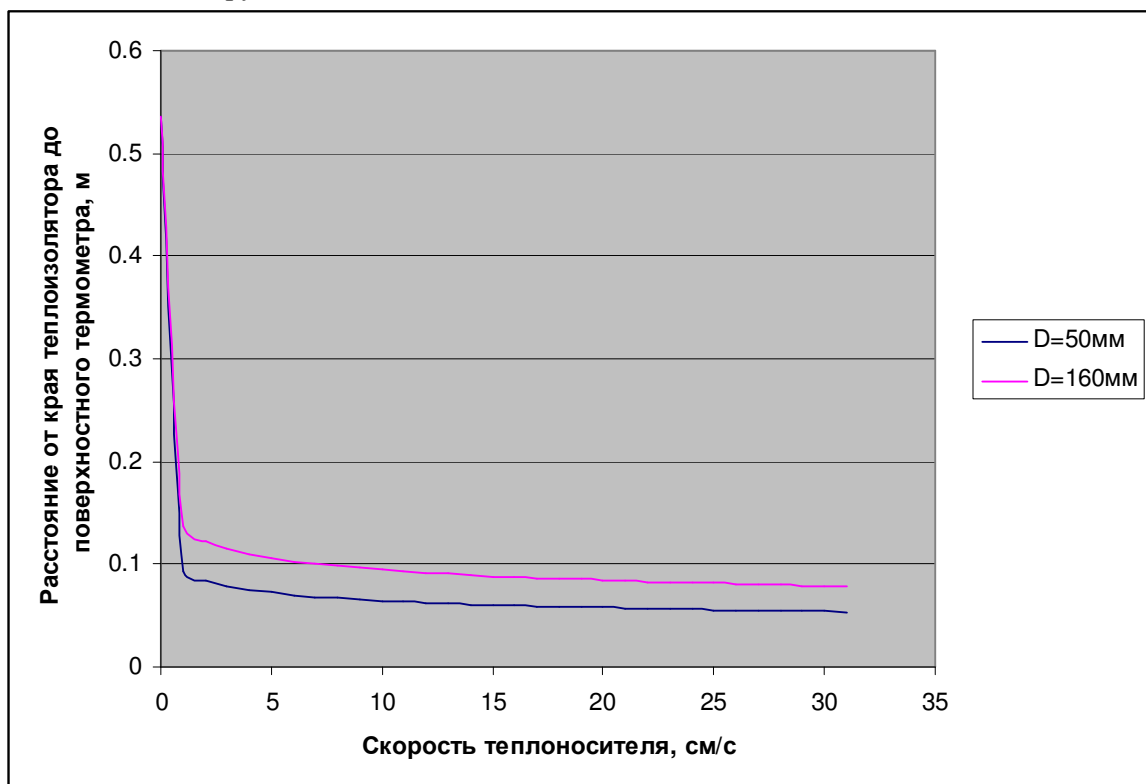


Рис.4. Зависимость расстояния от края «идеальной» изоляции до образцового термометра (при десятикратном снижении градиента) от скорости теплоносителя.

На рис. 4 приведена зависимость расстояния от края изоляции до места расположения образцового термометра при 10-тикратном уменьшении градиента  $L_{из10}$  от скорости теплоносителя. Остальные параметры аналогичны тем, что использовались при расчете в предыдущем разделе.

Из приведённых зависимостей видно, что  $L_{из10}$  при ламинарных скоростях составляет 50-60см, а при турбулентных около 10см.

Рассмотрим теперь динамический процесс, когда скорость изменения температуры теплоносителя велика. Предположим, что изменение температуры происходит скачкообразно. Тогда показания поверяемого датчика и рабочего эталона будут отличаться из-за различных тепловых постоянных. Представляет интерес тепловая постоянная прогрева стенки трубы, т.к. эта величина является нижней границей тепловой постоянной рабочего эталона.

### Тепловая постоянная прогрева стенки трубы

Искомый параметр  $T$  может быть получен из анализа классической задачи прогрева пластины, обтекаемой теплоносителем с изменившейся скачком температурой [4]:

$$T = C_p \cdot \rho \cdot d_{12} / \alpha_{01} \quad (4)$$

На рис.5 приведена зависимость тепловой постоянной от скорости теплоносителя для толщины стенки 5 мм и двух значений диаметра трубопровода. Как видно из графиков, значение тепловой постоянной сильно зависит от скорости теплоносителя. При ламинарном процессе постоянная может иметь значение в сотни секунд, а при турбулентном – несколько десятых долей секунд. Практически и в том и в другом случае это либо сравнимо с реальными значениями тепловой постоянной поверяемых датчиков либо во много раз меньше её.

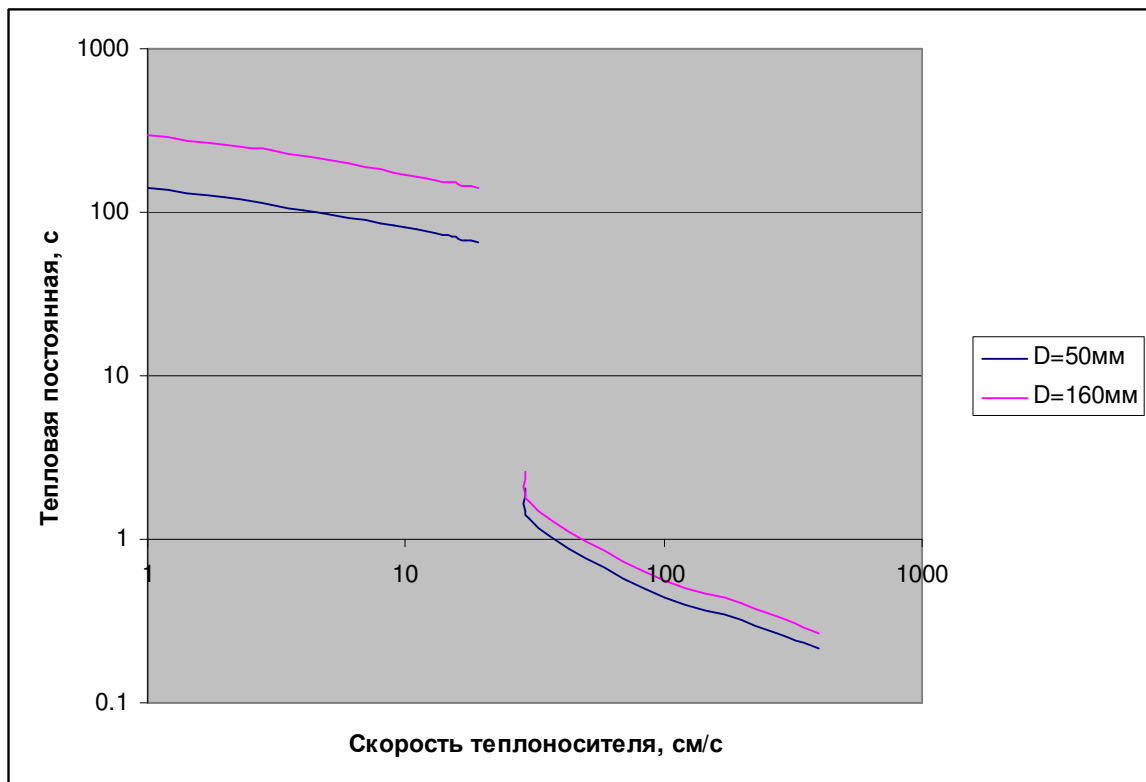


Рис. 5. Тепловая постоянная прогрева стенки трубы при скачкообразном изменении температуры теплоносителя в зависимости от скорости теплоносителя и диаметра трубы.

#### Выводы.

1. Метод бездемонтажной поверки основан на системной зависимости температуры теплоносителя, температуры поверхности трубы и температуры окружающей среды. При реализации метода выполняются совокупные измерения температуры, позволяющие получить систему уравнений, решаемую относительно температуры теплоносителя.

2. Основная составляющая методической погрешности рассматриваемого метода обусловлена наличием перепада между температурой теплоносителя и температурой поверхности трубы. Приближенная оценка пределов этой погрешности для конкретных условий может осуществляться на основе выражения (1). Для этого необходима априорная информация о значениях коэффициентов **R01, R12, R23, R34**.

3. Проведенный в работе анализ показал, что разность между температурой теплоносителя и температурой поверхности трубы находится в пределах от нескольких

десятых (при ламинарных процессах) до нескольких сотых долей (при турбулентных процессах) процента от перепада между температурой теплоносителя и температурой окружающей среды. Данный вывод косвенно подтверждает возможность эффективной практической реализации рассмотренного метода бездемонтажной поверки.

#### Литература.

1. Симонов В.Н., Маринко С.В. Способ бездемонтажной поверки датчиков температуры и кварцевый датчики температуры для реализации этого способа. Труды Всероссийской конференции «Датчики и системы», г. Москва, 2006 г.
2. Симонов В.Н., Маринко С.В. Способ поверки датчика температуры теплоносителя в трубе. Патент РФ № 2282836, Бюллетень изобретений №24, 2006г.
3. Симонов В.Н. Датчик температуры теплоносителя в трубе. Патент РФ № 2282834, Бюллетень изобретений №24, 2006г.
4. Жуковский В.С. Основы теории теплопередачи. «Энергия», 1969г.