Министерство образования и науки Российской Федерации

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИШНКБ

_____ Баранов П.Ф.

“_____”_____ 2024 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ТЕПЛОВЫХ ПОЛЯХ

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 8
по дисциплине “ Физические основы получения информации ”

ТОМСК 2024

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8
" ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ТЕПЛОВЫХ ПОЛЯХ"

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Основным уравнением измерительных преобразований в тепловых полях является уравнение теплового баланса, согласно которому подводимое к объекту количество теплоты $\boldsymbol{Q}_{вн}$ равно сумме количества теплоты $\boldsymbol{Q}_{р}$, отдаваемой им в среду, и количества теплоты $\boldsymbol{Q}_{с}$, идущей на изменение его теплосодержания:

$$\boldsymbol{Q}_{вн} = \boldsymbol{Q}_{р} + \boldsymbol{Q}_{с} . \qquad (1)$$

Количество отдаваемой в единицу времени теплоты $\boldsymbol{q}_{р}$ (полный тепловой поток теплоотдачи) равно сумме тепловых потоков теплопроводности $\boldsymbol{q}_{т}$, конвекции $\boldsymbol{q}_{к}$ и излучения $\boldsymbol{q}_{л}$:

$$\boldsymbol{q}_{р} = \boldsymbol{q}_{т} + \boldsymbol{q}_{к} + \boldsymbol{q}_{л} . \qquad (2)$$

Теплообмен посредством теплопроводности происходит путем взаимодействия частиц, находящихся в непосредственном соприкосновении друг с другом и имеющих различную температуру. Тепловой поток теплопроводности в некотором объекте, создаваемый разностью температур $\Delta\theta$, определяется зависимостью:

$$\boldsymbol{q}_{т} = \gamma_{т} \ \Delta\theta , \qquad (3)$$

где $\gamma_{т}$ - теплопроводность объекта.

По аналогии с электрической проводимостью тепловая проводимость стержня длиной $\boldsymbol{l}$ и сечением $\boldsymbol{S}$ может быть определена как

$$\gamma_{т} = \lambda \frac{\boldsymbol{S}}{\boldsymbol{l}} , \qquad (4)$$

где λ - коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности зависит от природы и физического состояния вещества. Теплопроводность твердых тел в большинстве случаев обусловлена двумя механизмами: движением электронов проводимости (доминирует в металлах) и тепловыми колебаниями атомов решетки (определяет теплопроводность неметаллов). Соответственно теплопроводность металлов пропорциональна их электрической проводимости.

Теплообмен посредством конвекции осуществляется за счет перемещения материальных частиц, имеющих разную температуру. Тепловой поток конвекции равен:

$$\boldsymbol{q}_{к} = \gamma_{к} \ \Delta\theta = \alpha_{к} \boldsymbol{S}_{п} \Delta\theta, \qquad (5)$$

где $\gamma_{к}$ - проводимость теплоотдачи путем конвекции;

$\Delta\theta$ - разность температур окружающей среды и тела;

$\alpha_{к}$ - коэффициент конвективного теплообмена;

$S_п$ - площадь поверхности тела.

Коэффициент конвективного теплообмена зависит от размеров тела, формы поверхности, теплопроводности и вязкости взаимодействующей с телом среды, но главным образом от скорости V взаимного перемещения тела и среды. Можно ориентировочно принять, что $\alpha_к$ пропорционален $V^{0,4}$.

Сущность теплообмена посредством излучения заключается в излучении телом электромагнитных волн определенной длины. Тепловой поток излучения системы двух тел

$$q_л = \gamma_л \Delta\theta = \alpha_л S_{12} \Delta\theta, \qquad (6)$$

где $\gamma_л$- проводимость теплоотдачи путем излучения ;

$\Delta\theta$ - разность температур двух тел;

$\alpha_л$ - коэффициент теплообмена излучением;

S_{12} - взаимная поверхность излучения тел.

Коэффициент теплообмена излучением зависит от формы, взаиморасположения, температуры взаимодействующих тел, от состояния и цвета их поверхностей. Взаимная поверхность излучения двух плоскопараллельных тел, квадрат расстояния между которыми меньше площадей их поверхностей, равна площади поверхности меньшего тела, обращенной к другому телу.

Тепловой поток изменения внутренней энергии (теплосодержания тела) описывается выражением:

$$q_с = \frac{dQ_c}{dt} = cm\frac{d\theta}{dt}, \qquad (7)$$

где c, m, θ - теплоемкость, масса, температура тела.

Наличие теплового потока $q_с$ обуславливает инерционность изменения температуры тела при изменении температуры окружающей среды или теплового потока $q_{вн}$, подводимого к телу. Если в момент времени $t = 0$ существовала разность $\Delta\theta_о$ температуры тела $\theta_т$ и температуры окружающей среды $\theta_с$, то при отсутствии $q_{вн}$ и постоянстве $\theta_с$ уравнивание температур $\theta_т$ и $\theta_с$ происходит по апериодическому закону:

$$\theta_т = \theta_с + \Delta\theta_о e^{-t/\tau}, \qquad (8)$$

где τ - показатель тепловой инерции (постоянная времени апериодического процесса).

Величина τ является функцией параметров тела и окружающей среды:

$$\tau = \frac{cm}{\gamma_\Sigma}, \qquad (9)$$

здесь γ_Σ - полная тепловая проводимость окружающей среды.

Следует отметить, что начальный участок реального теплового процесса, называемый дорегулярным режимом, отличается от описываемого уравнением (8), что обусловлено перераспределением температур в толще самого тела. В

нашем же случае будем считать, что весь тепловой переходный процесс протекает в регулярном режиме и описывается уравнением (8).

2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

2.1. Какие тепловые потоки определяют энергетический баланс подводимой к объекту и расходуемой тепловой энергии?

2.2. В чем заключается физическая сущность теплообмена посредством теплопроводности, конвекции, лучеиспускания?

2.3. В чем заключается физическая сущность изменения теплосодержания тела?

2.4. Почему теплопроводность металлов пропорциональна их электрической проводимости?

2.5. Какие свойства окружающей среды влияют на инерционность изменения температуры тела при скачкообразном изменении температуры окружающей среды?

2.6. Зависит ли длительность теплового переходного процесса от начальной разности температур тела и окружающей среды?

3. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

Ознакомиться с физическими основами измерительных преобразований в тепловых полях, вариантами их практической реализации. Экспериментально оценить для разных условий значения тепловых проводимостей посредством теплопроводности, конвекции, лучеиспускания, а также значения показателей тепловой инерции. Экспериментально определить зависимость этих величин от свойств объекта и окружающей среды.

4. ПРОГРАММА РАБОТЫ.

4.1. Определить экспериментально значения теплопроводности и коэффициента теплопроводности образцов из различных металлов.

4.2. Определить экспериментально зависимость проводимости теплоотдачи путем конвекции от скорости воздушного потока.

4.3. Сравнить экспериментально значения проводимости теплоотдачи путем лучеиспускания для объектов с разным цветом поверхности.

4.4. Определить экспериментально значения показателя тепловой инерции системы тело - окружающая среда для разных значений скорости движения среды.

5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ.

Объектами исследований являются три одинаковые по размерам полоски из разного металла (сталь, дюраль, медь), две одинаковые по размерам дюралевые пластинки с разным состоянием поверхности (полированная и черненая), дюралевая пластина большего размера с черненой поверхностью. В качестве нагревателя используется транзистор КТ818В. Для измерения температуры используется электронный преобразователь температура -

напряжение, в котором в качестве чувствительных элементов используются диоды КД210. Преобразователь конструктивно выполнен в отдельном корпусе с выносными термочувствительными элементами. Питание преобразователя осуществляется с коммутационно - измерительной панели (КИП). Кабель питания подключается к разъему КИП “Внешнее устройство”. На этой же панели расположены переключатель и амперметр для регулирования и измерения тока нагревателя $\boldsymbol{I}$. Измерение напряжения нагревателя $\boldsymbol{U}$, а также выходных напряжений электронного блока, пропорциональных температурам чувствительных элементов (гнезда “ $\boldsymbol{t}_1$ - ⊥” и “ $\boldsymbol{t}_2$ - ⊥”), осуществляется с помощью вольтметра В7-16 (В7-16А). Крепление нагревателя и термочувствительных элементов на объектах исследования осуществляется с помощью имеющихся на последних пружинных зажимов. Для создания высокого градиента температуры при исследовании тепловой проводимости металлических полосок используется радиатор с зажимом для крепления полоски. Для устранения паразитных тепловых потоков при измерении тепловых потоков теплопроводности и лучеиспускания используются пенопластовые теплоизолирующие кожухи. При исследовании теплообмена посредством конвекции используется вентилятор, скорость воздушного потока которого регулируется путем изменения площади сечения всасывающих отверстий специальными шторками. Шкала угла поворота регулирующих шторок отградуирована в единицах скорости создаваемого вентилятором воздушного потока. Крепление объектов исследования осуществляется на специальных кронштейнах с помощью пружинных зажимов.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.

6.1. Для определения значений теплопроводности и коэффициента теплопроводности материала металлической полоски используется схема рис. 1*а*. Согласно выражению (3) теплопроводность участка образца между двумя его сечениями может быть определена следующим образом:

$$\gamma_{\text{т}} = \frac{\boldsymbol{q}_{\text{т}}}{\Delta\theta}, \qquad (10)$$

здесь $\boldsymbol{q}_{\text{т}}$ - тепловой поток теплопроводности через сечения образца; $\Delta\theta$ - разность температур в первом и втором сечениях.

Тепловой поток теплопроводности через металлическую полоску может быть создан с помощью нагрева одного конца полоски нагревателем и охлаждения другого конца полоски с помощью радиатора за счет естественной конвекции. Для исключения паразитных тепловых потоков объект исследования помещается в теплоизолирующий пенопластовый кожух. Благодаря этому можно условно принять, что при установившемся тепловом режиме весь тепловой поток $\boldsymbol{q}_{\text{вн}}$, создаваемый нагревателем, передается радиатору за счет теплового потока теплопроводности металлической полоски:

$$\boldsymbol{q}_{\text{т}} = \boldsymbol{q}_{\text{вн}}. \qquad (11)$$

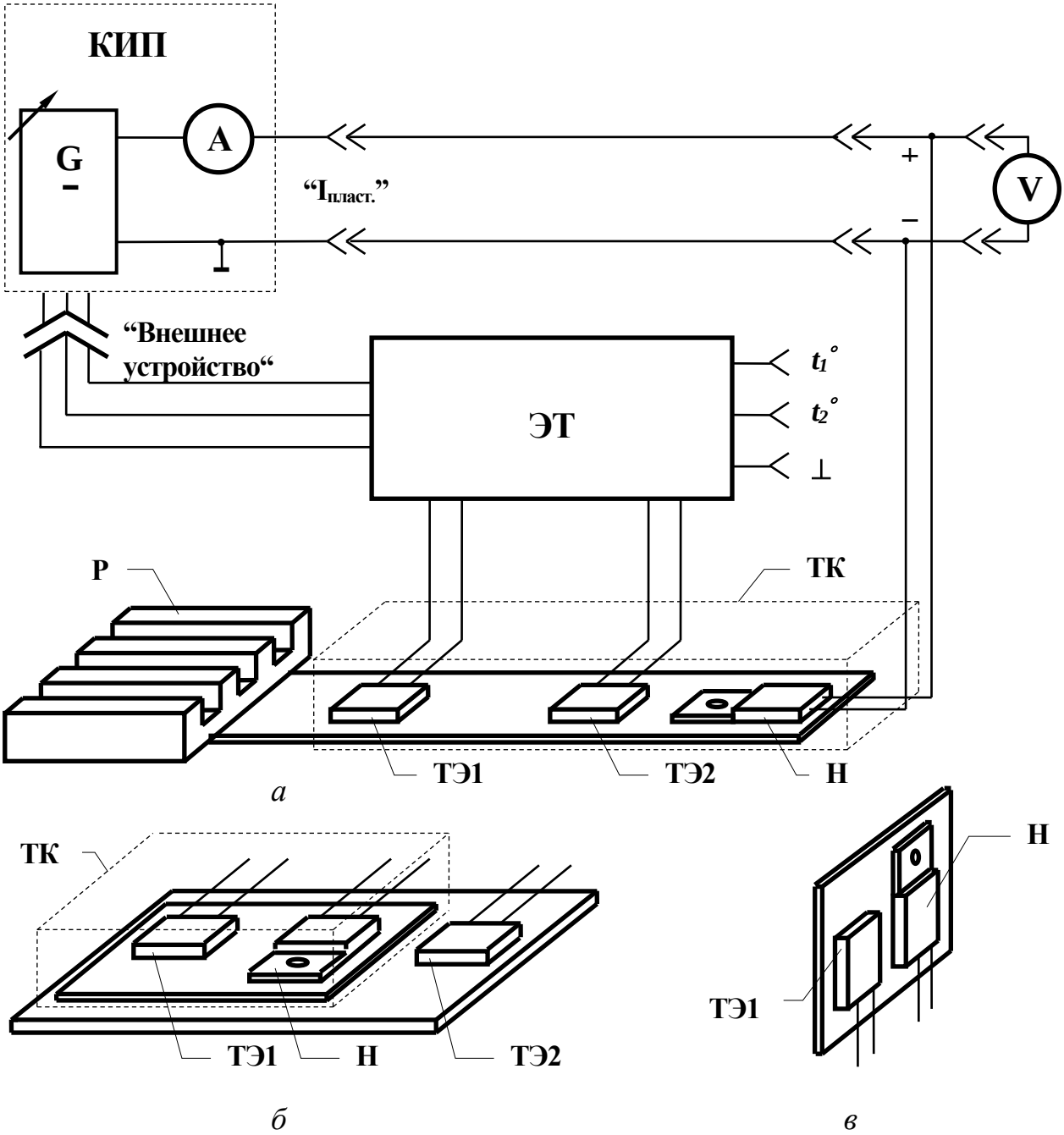

Рис.1. Схема измерения проводимости теплоотдачи путем теплопроводности (*а*), конвекции (*б*), лучеиспускания (*в*):
G - регулируемый источник постоянного напряжения;
ТЭ - термочувствительный элемент; **Н** - нагреватель;
ТК - теплоизолирующий кожух; **ЭТ** - электронный термометр;
Р – радиатор.

Подводимый к объекту тепловой поток $\boldsymbol{q}_{\text{вн}}$ равен мощности нагревателя и может быть определен путем измерения по схеме рис. 1 тока $\boldsymbol{I}$ и напряжения $\boldsymbol{U}$ нагревателя:

$$\boldsymbol{q}_{\text{т}} = \boldsymbol{q}_{\text{вн}} = \boldsymbol{I}\,\boldsymbol{U}. \qquad (12)$$

При проведении данного эксперимента на нагреватель подается максимальная мощность. Температуры сечений образца могут быть измерены с помощью электронного термометра, выходные напряжения которого прямопропорциональны температурам его термочувствительных элементов:

$$\theta^{\circ} = \boldsymbol{S}\, \boldsymbol{U}_{\text{вых}}, \qquad (13)$$

где θ°- температура в градусах Цельсия;

$\boldsymbol{S}$ - чувствительность преобразования, равная 100 град / В;

$\boldsymbol{U}_{\text{вых}}$ - выходное напряжение электронного термометра, В.

Следует обратить особое внимание на то обстоятельство, что используемое в расчетах соотношение (11) справедливо только в случае установившегося температурного режима (при отсутствии теплового потока изменения теплосодержания тела). В соответствии с этим следует, учитывая инерционность теплового процесса ($\tau \approx 3$ мин), проводить измерение разности температур $\Delta\theta$ не ранее 15 мин. после включения нагревателя. Значение теплопроводности $\gamma_{\text{т}}$ участка пластин между центрами чувствительных элементов определяется по формуле (10), а коэффициент теплопроводности λ - из соотношения (4) при известных значениях геометрических параметров металлической полоски: $\boldsymbol{S}$ = 12 мм^2; $\boldsymbol{l}$ = 45 мм.

6.2. Для определения экспериментальной зависимости проводимости теплоотдачи путем конвекции от скорости воздушного потока используется электрическая схема рис. 1. Объектом исследования в этом случае является металлическая пластинка из полированного дюраля. Пластинка с закрепленными на ней нагревателем и термочувствительным элементом устанавливается на кронштейне вентилятора. Второй термочувствительный элемент крепится на пластинке из черненого дюраля и служит для измерения температуры окружающей среды. Согласно выражению (5) проводимость теплоотдачи путем конвекции может быть определена по формуле:

$$\gamma_{\text{к}} = \frac{\boldsymbol{q}_{\text{к}}}{\Delta\theta}. \qquad (14)$$

В данном случае при установившейся температуре пластинки (отсутствии теплового потока изменения теплосодержания) можно принять, что практически весь подводимый к пластинке тепловой поток нагревателя расходуется на теплообмен с окружающей средой путем конвекции:

$$\boldsymbol{q}_{\text{к}} = \boldsymbol{q}_{\text{вн}} = \boldsymbol{I}\, \boldsymbol{U}. \qquad (15)$$

Другими составляющими теплообмена ввиду крепления пластинки на теплоизолирующем кронштейне, относительно низкой ее температуры и полированной поверхности в данном случае можно пренебречь.

Как и в предыдущем случае на нагреватель подается максимальная мощность. Первое измерение температур нагреваемой пластинки и окружающей среды производится при скорости воздушного потока равной нулю (естественная конвекция). Следует учесть, что ввиду тепловой инерции

стационарный тепловой режим устанавливается в данном случае через 12 минут после включения нагревателя.

Следующие измерения разности температур производятся для значений скорости $\boldsymbol{V}$ воздушного потока 0.3; 0.4; ..., 1.0 м /с через 2 минуты после изменения скорости.

На основе полученных данных строится зависимость $\gamma_к(\boldsymbol{V})$ в диапазоне скоростей 0 ... 1 м/с.

6.3. Измерение проводимости теплоотдачи путем лучеиспускания осуществляется с использованием электрической схемы рис.1. Объектами исследования в этом случае являются дюралевые пластинки с полированной и черненой поверхностями. При проведении эксперимента на одной из этих пластинок закрепляются нагреватель и чувствительный элемент. Второй термочувствительный элемент устанавливается на массивную дюралевую пластину большего размера (в дальнейшем основание), с которой и осуществляется теплообмен лучеиспусканием. Исследуемая пластинка помещается в теплоизолирующий кожух, уменьшающий паразитные тепловые потоки. Теплообмен с основанием осуществляется через отверстие в нижней части кожуха.

Согласно выражению (6) проводимость теплоотдачи путем лучеиспускания может быть определена по формуле:

$$\gamma_л = \frac{\boldsymbol{q}_л}{\Delta\theta}, \qquad (16)$$

здесь $\Delta\theta$ - разность температур пластинки и основания.

При установившемся тепловом режиме (отсутствии теплового потока изменения теплосодержания) можно принять, что основная часть теплового потока теплоотдачи пластинки обусловлена теплообменом нагреваемой исследуемой пластинки и основания путем лучеиспускания. И соответственно:

$$\boldsymbol{q}_л = \boldsymbol{q}_{вн} = \boldsymbol{I}\,\boldsymbol{U}. \qquad (17)$$

Значения тока и напряжения нагревателя выбираются в данном случае порядка 1.4 А и 1.4 В (восьмое положение переключателя установки тока).

Измерение температур пластинки и основания для определения разности их температур $\Delta\theta$ с учетом тепловой инерции производится не ранее 15 минут после включения нагревателя. После проведения экспериментов с полированной и черненой пластинками определяется соотношение тепловых проводимостей в том и другом случаях.

6.4. Значения показателя тепловой инерции при разных скоростях воздушного потока, обуславливающего теплообмен конвекцией, могут быть определены путем анализа кривой переходного процесса изменения температуры объекта при скачкообразном изменении температуры окружающей среды или теплового потока, подводимого к объекту нагревателем. В нашем случае удобнее использовать второе. При проведении эксперимента используются те же электрическая схема, объект исследования и дополнительное оборудование, что и в разделе 6.2. Методика проведения

эксперимента по определению теплового переходного процесса заключается в следующем. На кронштейн вентилятора устанавливается полированная дюралевая пластинка с нагревателем и термочувствительным элементом. Черненая пластинка с другим термочувствительным элементом размещается вблизи вентилятора. При выключенном вентиляторе осуществляется нагрев пластинки в течении 15 минут до установившегося значения температуры. Режим нагрева: $\boldsymbol{I} \approx 1.4$ А; $\boldsymbol{U} \approx 1.4$ В (восьмое положение переключателя установки тока). Далее устанавливается фиксированная скорость воздушного потока и снимается кривая изменения температуры пластинки $\theta^{\circ}_{т}(\boldsymbol{t})$. Значения времени, в которые производятся измерения, удобно брать равными 0; 1; 2; ..., 15 мин. Значение показателя тепловой инерции τ может быть определено на основе полученной зависимости $\theta^{\circ}_{т}(\boldsymbol{t})$ двумя способами.

По первому способу в уравнение (8), описывающее апериодический тепловой процесс подставляется значение $\boldsymbol{t} = \tau$. В этом случае получаем:

$$\theta_{\tau} = \theta_{c} + \frac{\Delta\theta_0}{\boldsymbol{e}}, \qquad (18)$$

здесь θ_{τ} - температура пластинки в момент времени $\boldsymbol{t} = \tau$;

θ_{c} - температура окружающей среды;

$\Delta\theta_0$ - начальная разность температур пластинки и среды.

Таким образом, искомое значение τ равно значению времени $\boldsymbol{t}$, при котором температура пластинки достигает значения $\theta_{c} + \Delta\theta_{o} / \boldsymbol{e}$.

По второму способу из графика зависимости $\theta^{\circ}_{т}(\boldsymbol{t})$ определяются значения $\theta_{т}(\boldsymbol{t}_1)$ и $\theta_{т}(\boldsymbol{t}_2)$, соответствующие значениям времени $\boldsymbol{t}_1$ и $\boldsymbol{t}_2 = 2\,\boldsymbol{t}_1$. Искомое значение τ может быть найдено после некоторых математических преобразований (8) по формуле:

$$\tau = -\frac{\boldsymbol{t}_1}{\ln\left[\theta_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{t}_2)/\theta_{\boldsymbol{m}}(\boldsymbol{t}_1) - 1\right]}. \qquad (19)$$

Соотношение показателей инерционности тепловых процессов при разных скоростях конвекционного потока должно соответствовать соотношению тепловых проводимостей теплообмена путем конвекции для этих же значений скоростей (см. результаты выполнения п. 4.2 программы экспериментов).

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1. Название работы.
7.2. Цель работы.
7.3. Программа работы.
7.4. Схемы экспериментальных установок.
7.5. Основные соотношения, примеры расчетов.
7.6. Результаты экспериментов и расчетов, оформленные в виде таблиц.
7.7. Графики зависимостей.
7.8. Выводы.

8. ЛИТЕРАТУРА

8.1. Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации: учебник Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.

8.2. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. пособие Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.

8.3. Электрические измерения неэлектрических величин. /Под ред. П. В. Новицкого. - Изд. 5-е. Л.: Энергия, 1975 - 576 с.

8.4. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи. Киев : Вища школа, 1981. - 296 с.

Составитель: профессор, д.т.н. А.Е. Гольдштейн.