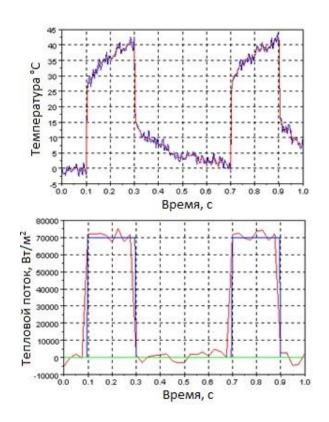


#### Н.В. Пилипенко

### ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЁМНИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА



Санкт-Петербург

### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

### Н.В. Пилипенко

### ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЁМНИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Учебное пособие



Санкт-Петербург

Пилипенко Н.В. Основы проектирования комбинированных приёмников теплового потока. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 52 с.

Учебное пособие разработано в соответствии с программой курса «Теория и техника физического эксперимента» Федерального образовательного стандарта Министерства высшего образования и науки РФ для магистров по направлению подготовки 16.03.01 — «Техническая физика» и 14.03.01 — «Ядерная энергетика и теплофизика».

В настоящее издание вошли лекции и практические занятия, посвященные методам и приборам нестационарной теплометрии, а также основам проектирования комбинированных приёмников теплового потока.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета лазерной и световой инженерии 11 октября 2016 года, протокол № 10.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

©Пилипенко Н.В., 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫ	
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ	
1.1 Некоторые понятия и определения	6
1.2 Методы измерения нестационарных тепловых потоков	7
1.2.1 Аналитические методы	8
1.2.2 Энтальпийный метод	9
1.2.3 Метод градуировочных характеристик	.12
1.2.4 Метод тонкого диска	.13
1.2.5 Метод вспомогательной стенки	.14
1.3 Сравнительные характеристики методов	.16
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЫЧНЫХ ПТП ТИПА «ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ СТЕНКА»	.19
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКО ПО ДВУМ ТЕМПЕРАТУРАМ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПТП	
4 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННЫХ ПТП	.24
4.1 Сущность метода и расчетные формулы	.24
5 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПТП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ	
ПОТОКОВ	
5.1 Постановка задачи	.27
5.2 Погрешность определения нестационарного теплового потока	.27
5.3 Техническое задание	.31
5.4 Тепловой режим ПТП	.31
5.5 Чувствительность ПТП	
5.6 Расчет и выбор основных конструктивных параметров ПТП	

5.7 Расчет параметров теплового режима, погрешности
определения теплового потока и чувствительности ПТП41
5.8 Получение тонких пленок фотолитографическим методом41
5.9 Измерительная схема
5.10 Источники погрешности измерения теплового потока44
ПРИЛОЖЕНИЕ46
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ49

#### **ВВЕДЕНИЕ**

более Измерение плотности тепловых потоков становится все большинства экспериментальных актуальным ДЛЯ исследований технологических процессов. Необходимость получения информации, адекватной происходящему процессу, заставляет непрерывно совершенствовать методы и приборы для измерения тепловых потоков. Методические и приборные успехи в свою очередь способствуют появлению все новых и новых задач. Такая «цепная реакция» привела к появлению самостоятельной области теплофизических измерений – теплометрии, которая объединяет методы и средства получения информации о плотности тепловых потоков.

В настоящее время существует большое разнообразие методов и устройств для измерения плотности тепловых потоков в различных областях естествознания. Это вызвано прежде всего многообразием объектов и условий исследования, а также отсутствием единого подхода к проблеме измерения тепловых потоков.

Обычно исследователи при решении возникших задач самостоятельно разрабатывают необходимые преобразователи теплового потока. Разобщенность, а иногда и противоречивость сведений о возможности использованных или вновь разработанных методов и устройств, отсутствие оценок погрешностей измерений приводят к ошибкам и неправильному истолкованию результатов исследований. Возникла настоятельная необходимость систематизации известных методов и устройств, объединение их в группы по общим признакам с тем, чтобы оценить достоинства и недостатки каждой группы и разработать практические рекомендации по их типовых условиях эксплуатации. Систематизация, объединение методов и устройств в группы, исследование возможностей каждой группы является первыми шагами на пути к решению основной задачи теплометрии – разработке теоретических основ методов измерения тепловых потоков и созданию ряда унифицированных преобразователей теплового потока.

Наиболее актуальна в настоящее время разработка методов и устройств для измерения быстро меняющихся во времени тепловых потоков. Однако именно в этой области состояние работ не удовлетворяет требованиям науки и техники [7,10,12].

В настоящем пособии особое внимание уделено тем методам и устройствам, которые могут быть пригодны для измерения нестационарных тепловых потоков.\*

<sup>\*</sup>Большую помощь в подготовке рукописи к печати оказали магистранты кафедры КТФиЭМ Бикмухаметов И.В. и Сергеев Д.А., которым автор выражает искреннюю признательность.

#### 1 МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Прежде чем переходить к характеристике отдельных методов и устройств, необходимо сформулировать требования с тем, чтобы в дальнейшем оценить соответствие каждого метода и устройства предъявляемым требованиям и выбрать тот способ измерения, который позволит получить информацию, адекватную исследуемому процессу.

Конкретные требования определяются целями и задачами проводимого исследования и в каждом случае будут различны. Вместе с тем можно сформулировать общие требования к методам и устройствам, используемым при теплофизических исследованиях. Эти требования во многом очевидны и могут быть сведены к следующему перечню:

- 1) возможность измерения тепловых потоков в заданной интенсивности;
- 2) обеспечение необходимой чувствительности, инерционности и погрешности измерений;
- 3) слабое влияние на результат внешних энергетических помех (под внешними тепловыми помехами будем понимать изменение температуры среды, в которой находится преобразователь теплового потока (ПТП); появление посторонних тепловых потоков на тех поверхностях ПТП, на которые не падает измеряемый поток);
- 4) хорошая воспроизводимость результатов;
- 5) малое искажение полей температур и потоков в объекте при внесении в него ПТП;
- б) возможность проведения измерений в различных средах твердой жидкой, газообразной;
- 7) простота и надежность конструкции ПТП и способа обработки экспериментальных данных;
- 8) возможность измерения всех видов теплового потока (конвективного, кондуктивного, лучистого);
- 9) возможность измерения нестационарных тепловых потоков в течение длительного времени исследования.

#### 1.1 Некоторые понятия и определения

Поскольку в настоящее время отсутствует единая терминология, характеризующая тепловые потоки и преобразователи тепловых потоков (ПТП), введем некоторые понятия и определения, которыми будем оперировать в дальнейшем.

Под нестационарным тепловым потоком, измеряемым с помощью ПТП, будем понимать переменный во времени поток, поглощаемый ПТП и вызывающий изменение его температуры.

Важными характеристиками потока являются его интенсивность (плотность) q и частота изменения w. Условно разобьем весь диапазон интенсивностей и частот на три интервала и будем считать, что:

$$\begin{cases} q \le 10^2, \frac{\text{BT}}{\text{M}^2}, \\ w \le 5 \cdot 10^{-2} \Gamma \text{II}. \end{cases}$$
 (1)

$$\begin{cases} w \le 5 \cdot 10^{-2} \Gamma \text{ µ.} \\ 10^{2} \le q \le 10^{4}, \\ 5 \cdot 10^{-2} \le w \le 1,0 \Gamma \text{ µ.} \end{cases}$$

$$\begin{cases} q > 10^{4}, \frac{\text{BT}}{\text{M}^{2}}, \end{cases}$$
(3)

$$\begin{cases} q > 10^4, \frac{\text{BT}}{\text{M}^2}, \\ w > 1.0\Gamma \text{H}, \end{cases}$$
 (3)

потоки малой (1), средней (2), высокой (3) интенсивности и частоты соответственно.

Отметим, что потоки могут быть малой интенсивности и высокой частоты, высокой интенсивности и малой частоты и т.д.

В качестве основных характеристик ПТП примем следующие: пределы измеряемой плотности теплового потока, чувствительность, инерционность, термическое сопротивление поглощаемому потоку, погрешность измерений.

Расшифруем два понятия – чувствительность и инерционность – трактовка которых не всегда однозначна.

Под чувствительностью ПТП будем понимать способность его внешнее реагировать минимальное энергетическое воздействие. Чувствительность будем характеризовать коэффициентом  $\eta$ , который определим как отношение величины выходного сигнала к величине теплового потока. Коэффициент измеряемого η ОНЖОМ коэффициентом преобразования ПТП или вольт – ваттной характеристикой, если выходной сигнал U измеряется в вольтах, а входной Р – в Ваттах, и тогда  $\eta = \frac{U}{R}$ .

Тепловую инерцию будем характеризовать параметром ε, равным промежутку времени, за который значение неизменного во времени потока, измеренного с помощью ПТП, будет составлять 0.63 поглощенного ПТП за тот же момент времени. Хотя такая характеристика динамических свойств не является исчерпывающей, она все же позволяет провести качественную оценку различных ПТП [6].

#### 1.2 Методы измерения нестационарных тепловых потоков

Большое разнообразие способов измерения нестационарных тепловых потоков можно объединить по общим признакам и отнести к одному из методов, перечисленных ниже:

- 1) аналитическому методу;
- 2) энтальпийному методу;
- 3) методу градуировочных характеристик;
- 4) методу тонкого диска;

5) методу вспомогательной стенки.

Остановимся на принципиальных особенностях каждого метода и устройствах ПТП, его реализующих.

#### 1.2.1 Аналитические методы

Аналитические методы, как правило, предполагают отсутствие специальных ПТП, а базируются на измерении температур объекта, на который падает тепловой поток. Задача определения нестационарного потока по данным температурных измерений в различных точках объекта (либо на поверхности, либо на некоторой глубине) [7,10,11] связана с решением граничных обратных задач теплопроводности (ГОЗТ). Как известно, математическая постановка задачи сводится к решению уравнения вида:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau'} \tag{4}$$

с начальным условием

$$t(x,0) = 0 (5)$$

и граничными условиями на бесконечности

$$t(x \to \infty, \tau) = 0$$
 или  $\frac{\partial t}{\partial x} = 0$ ,  $x \to \infty$ , (6)

где t – температура перегрева,  $\tau$  – время.

В качестве другого граничного условия могут рассматриваться два варианта:

а) задание на поверхности экспериментально найденной температуры  $t_n(\tau)$  поверхности:

$$t(0,\tau) = t_n(\tau),\tag{7}$$

б) задание на поверхности теплового потока  $q(\tau)$ , который подлежит определению после отыскания температурного поля тела с учетом экспериментально измеренной температуры поверхности  $t_n(\tau)$ , т.е.

$$q(\tau) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, x = 0. \tag{8}$$

В качестве расчетной после решения системы (4) - (8), используется зависимость

$$q(\tau) = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a}} \int_{0}^{\tau} \frac{dt_n(\tau)}{d\tau^*} \cdot \frac{d\tau^*}{\sqrt{\tau - \tau^*}} \ . \tag{9}$$

Здесь обозначены:  $\lambda$ , a — теплопроводность и температуропроводность материала объекта.

Аналитический метод определения нестационарного потока часто является не только эффективным, но и единственно возможным. Однако при его реализации возникают две проблемы. Первая определяется трудностью монтажа датчиков температуры в натурных изделиях и необходимостью

учета искажений температурного поля в них, вследствие чего при решении каждой задачи следует определять геометрические размеры и теплофизические свойства.

Вторая проблема носит чисто вычислительный характер и связана с неустойчивостью решения обратных задач, обусловленных их некорректной постановкой.

Укажем еще ряд недостатков рассматриваемого метода:

- невозможность непрерывно определять тепловой поток в течение длительного времени его действия, поскольку при этом нарушается условие (6), что не позволяет пользоваться закономерностями распространения тепла в полуограниченном теле;
- сложность обработки экспериментальных данных и часто неизвестная погрешность определения потока;
- небольшая надежность датчиков при исследованиях в специфических условиях запыленном потоке газа, наличии флуктуаций твердых макрочастиц и т.д.

Несмотря на указанные недостатки, аналитический метод широко используется при определении нестационарных тепловых потоков, в особенности там, где другие методы бессильны по частотным и временным характеристикам. Он позволил, например, получить ряд оригинальных результатов по определению мгновенных коэффициентов теплоотдачи от стенки к турбулентному потоку жидкости, исследовать процесс передачи тепла в сверхзвуковых ударных трубах и т.д.

Остальные методы определения нестационарных потоков (за исключением аналитического) являются расчетно-экспериментальными и предполагают сочетание традиционных типов тепломеров и быстродействующих современных ЭВМ.

#### 1.2.2 Энтальпийный метод

При определенных условиях измерения — более длительное время действия потока, точнее, необходимость определения потока за более длительный промежуток времени его действия; исследованиях в запыленных средах; при термомеханических воздействиях на ПТП потока газа высокой энергии; электризации поверхностного слоя надежное измерение температуры поверхности вызывает большие трудности. Тем не менее, сохраняется задача определения потока высокой интенсивности и частоты.

В этом случае используют энтальпийный метод, который реализуется с помощью ПТП, схема которых показана на рисунке 1, где 1 — чувтсвительный элемент, 2 — теплоизоляционный корпус. Сущность метода сводится к измерению скорости изменения среднеинтегральной температуры тела 1 и расчету неизвестного теплового потока  $q(\tau)$  по формуле вида:

$$q(\tau) = \frac{C_1}{S_1} \cdot \frac{d\overline{t_1}(\tau)}{d\tau}.$$
 (10)

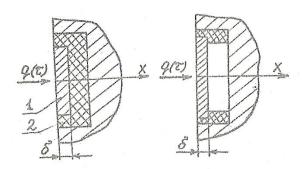


Рисунок 1 – Схемы ПТП

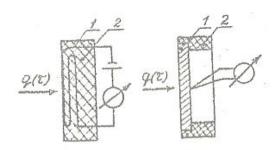
В (10) обозначены:  $C_1$ ,  $S_1$  — полная теплоемкость и площадь наружной поверхности тела 1;

$$\overline{t_1}(\tau) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} t_1(x, \tau) dx, \tag{11}$$

$$\overline{t_1}(\tau) = t_{1,v}(\tau). \tag{12}$$

Основным допущением энтальпийного метода является условие, что за время измерения отсутствует теплообмен тела 1 с телом 2, т.е. все тепло остается в теле 1, которое играет роль калориметра. Поэтому датчики называют калориметрическими.

Среди датчиков, реализующих энтальпийный метод, обращает на себя внимание оригинальная конструкция многосекционного калориметрического электрического сопротивления, показанная рисунке Чувствительным элементом датчика является сложенная «гармошкой» и спрессованная длинная полоска 1 металлической фольги. Размеры всех секций «гармошки» строго одинаковы, секции располагаются одна за другой, электрически изолируются друг от друга. Толщина фольги выбирается из условия обеспечения достаточной чувствительности, а количество секций рассчитывается из условий обеспечения малых тепловых потерь в подложку 2. В конструкции сочетается большая по сравнению с термочувствительными пленками суммарная толщина чувствительного элемента с достаточно сопротивлением, обеспечивает электрическим ЧТО чувствительность измерений тепловых потоков при сравнительно большой длительности процесса.



# Рисунок 2 — Схема многосекционного калориметрического датчика электрического сопротивления

Расчетная формула для теплового потока имеет вид:

$$q(\tau) = \frac{Gc}{dSR_0} \cdot \frac{dR}{d\tau} \,, \tag{13}$$

где G — вес полоски фольги; c, d —удельная теплоемкость и термический коэффициент материала фольги, S —площадь поверхности теплообмена датчика, равная площади поверхности теплообмена одной секции;  $R_0$  — начальное сопротивление одной секции,  $\frac{dR}{d\tau}$  —производная суммарного сопротивления всех секций датчика во времени.

Как видно из формулы, она не учитывает тепловое сопротивление изоляционных прокладок, тепловые потери через боковые грани, изменение коэффициента термического сопротивления фольги, тепловые потери в подложку 2. Несмотря на это, например, датчик из циркониевой фольги толщиной 0,1мм при изоляционных прокладках толщиной 0,1мм и состоящей из 8 секций при длительности процесса 0,1с обеспечивает удовлетворительную точность.

Основные недостатки энтальпийного метода следующие:

- невозможность непрерывного определения потока в течение длительного времени из-за нарушения основного допущения метода отсутствия теплопотерь в подложку;
- сильное влияние на результаты измерений внешних тепловых помех из-за невозможности полной изоляции чувствительного элемента от окружающей среды;
- большая погрешность измерений, особенно высокочастотных потоков, из-за погрешности определения среднеинтегральной температуры чувствительного элемента; а также, утечек тепла к подложке.

Несмотря на присущие энтальпийному методу и ПТП недостатки, он позволяет получить информацию там, где другие методы не могут быть использованы.

#### 1.2.3 Метод градуировочных характеристик

Сущность метода градуировочных характеристик заключается в экспериментальном установлении вида функциональной зависимости какойлибо величины (физической, электрической и т.д.) ПТП от пронизывающего его теплового потока. Рассматриваемый метод по сути является косвенным, поскольку при прохождении потока через ПТП изменяется, прежде всего, температура его чувствительного элемента. Изменение температуры вызывает отклонение какой-то регистрируемой термометрической величины, например, электрического сопротивления. Это отклонение и связывают с величиной теплового потока.

Очевидно, что каждый ПТП, реализующий данный метод, перед использованием его для определения неизвестного потока должен быть отградуирован, т.е. должна быть установлена зависимость термометрической величины от известного теплового потока в широком диапазоне изменения последнего.

Метод градуировочных характеристик нашел широкое распространение для определения переменных во времени лучистых тепловых потоков. В качестве регистрируемых термометрических величин наиболее широко используются: электрическое сопротивление металлов и полупроводников в болометрах; расширение жидкости в пиргелиометрах; линейные удлинения металлов в дилалометрах, ЭДС термобатарей, эффект фотосопротивления в радиодиометрах, пироэлектрических эффект в одноименных ПТП; диэлектрическая проницаемость полимерных металлов и сегнетоэлектриков во вновь разрабатываемых ПТП и ряд других.

Перспективными ДЛЯ динамических изменений приемниками излучения являются тонкопленочные болометрические и термоэлектрические, а также быстро развивающиеся в последние годы пироэлектрические приемники излучения. Постоянные времени современных пироэлектрических приемников достигают  $10^{-9}$ с. Наиболее характерными недостатками этих ПТП является зашумленность значительной паразитными пьезоэлектрическими частотного диапазона токами, невозможность осуществления абсолютных измерений и, в силу этого, отсутствие простых способов контроля изменений чувствительности в процессе эксплуатации приборов.

Основными недостатками метода градуировочных систем являются:

- необходимость индивидуальной градуировки каждого ПТП и для каждого вида потока;
- идентичность условий измерений условиям градуировки для обеспечения удовлетворительной погрешности;
- малая пригодность для измерения конвективных тепловых потоков;
- сложность и невысокая надежность конструкций ПТП;
- влияние на результат измерений внешних тепловых помех.

#### 1.2.4 Метод тонкого диска

Метод тонкого диска базируется на решении осесимметричной задачи теплопроводности о распределении температуры по радиусу тонкого диска с известными температурами в его центре и на максимальном радиусе.

ПТП, реализующего метод, показана Чувствительным элементом ПТП является тонкий диск 1, изготовленный из термоэлектронного материала (константан). Диск соединен термодиффузией с кольцевой втулкой 2, изготовленной также из термоэлектродного К центру материала (медь). диска И К втулке присоединены термоэлектродные провода 4 (медь). Таким образом, ПТП представляет собой по сути дифференциальную термопару с горячими и холодными спаями, расположенными в центре и на максимальном радиусе.

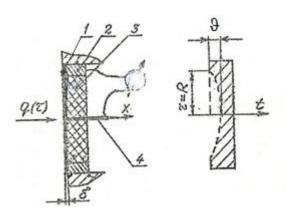


Рисунок 3 – Схема ПТП, основанного на методе «Тонкого диска»

Локальный тепловой поток, попадающий на диск 1, передается от диска к втулке 2, которая поддерживается при постоянной температуре. В результате наличия теплообмена между диском и втулкой температура центра диска будет всегда выше температуры втулки (рисунок 3). По величине перепада температур между центром диска и втулкой  $\vartheta$  в любой момент времени и судят об интенсивности теплового потока  $q(\tau)$ .

Расчетная формула для  $q(\tau)$  получается из решения уравнения вида:

$$\frac{c\rho}{\lambda} \cdot \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{q(\tau)}{\lambda \delta} \,, \tag{14}$$

при краевых условиях

$$v/_{\tau=0}=0;$$
  $v/_{r=R}=0;$   $\frac{\partial v}{\partial r}/_{r=0}=0,$  (15)

которое описывает процесс распространения тепла в диске при следующих допущениях: потери тепла с поверхности  $x = \delta$  диска отсутствуют;

температурное поле по толщине доска равномерное; отток тепла по центральной термопаре и ее теплоемкость незначительны и их не учитывают.

В уравнении (14) обозначены:  $\lambda$ , с,  $\rho$ ,  $\delta$  теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность и толщина диска.

Расчетная формула для вычисления  $q(\tau)$  при частотах его изменения  $w \leq \frac{2a}{\pi r^2}$  имеет вид:

$$q(\tau) = c\rho \delta \left[ \frac{3}{4} \frac{dt_{\mu}}{d\tau} + \frac{1}{4} \frac{dt_r}{d\tau} + \frac{4a}{R^2} (t_{\mu} - t_r) \right], \tag{16}$$

где с,  $\rho$  – удельная теплоемкость и плотность материала диска;  $\delta$  – толщина диска,  $t_{\rm u}$ ,  $t_r$  – температура в центре диска и на радиусе R.

В последние годы область применения ПТП расширяется для измерения конвективных потоков, делаются попытки увеличить чувствительность путем применения иных материалов, уменьшить погрешность за счет изоляции 3 (рисунок 3) тонкого диска.

К основным недостаткам этого метода можно отнести:

- большие погрешности при изменении высокочастотных потоков в связи с допущениями о равномерном по толщине диске поля температур; об отсутствии потерь с поверхности  $x = \delta$  диска и по центральной термопаре. На самом деле при высоких частотах изменения эти допущения не выполняются;
- необходимость индивидуальной градуировки в связи с тем, что технологически очень трудно смонтировать термопару 4 (рисунок 3) строго по центру. Смещение термопары от центра приводит к большой погрешности определения  $q(\tau)$  по расчетным формулам типа (16);
- необходимость термостатирования или охлаждения кольца 2, что связано с усложнением конструкции ПТП;
- значительное искажение поля температур и потоков в теле при монтаже в нем ПТП.

#### 1.2.5 Метод вспомогательной стенки

Суть метода вспомогательной стенки заключается в том, что на пути измеряемого потока располагают стенку с известной теплопроводностью  $\lambda$ . Измерив перепад температур  $\Delta t$  по толщине стенки  $\delta$ , вычисляют по формуле:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t, \tag{17}$$

где q — искомый поток.

Обычно тепловое сопротивление стенки  $\frac{\lambda}{\delta}$  стараются свести к минимуму, чтобы вспомогательная стенка, по возможности, не была дополнительной, как ее иногда называют.

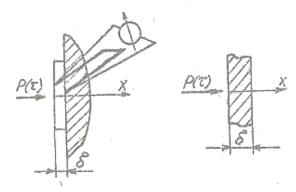


Рисунок 4 — Схема метода вспомогательной стенки

Тепломеры типа вспомогательной стенки нашли широкое применение для измерения стационарных тепловых потоков. Простота определения потока, успехи в технологии изготовления датчиков и техники измерений в последние годы побуждают исследователей применять этот метод для определения нестационарных потоков. Однако для их широкого использования имеется существенное ограничение — большая погрешность, особенно при определении быстро меняющихся потоков. В литературе [1] указывается, что удовлетворительная погрешность будет достигнута, если рассчитывать тепловой поток по формуле:

$$q(\tau) = \frac{\lambda}{\delta} \left[ t/\chi = 0 \left( \tau + \frac{\delta^2}{3a} \right) - t/\chi = \delta \left( \tau - \frac{\delta^2}{6a} \right) \right]. \tag{18}$$

При условии, что  $t/\chi = 0$  и  $t/\chi = \delta$  не содержат частот больше, чем  $0.1~a/\delta^2$ , где а — температуропроводность стенки. Как показали исследования, приведенные в [5], для измерения переменных токов с помощью тепломеров «вспомогательная стенка» необходимо знать кроме перепада температур по толщине тепломера в различные моменты времени, также соотношение свойств  $\omega = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$  тепломера и основания, на котором он размещен; в случае свободного тепломера — условие на тыльной его стороне (либо температуру, либо условия теплообмена).

#### 1.3 Сравнительные характеристики методов

О возможностях различных методов измерения нестационарных тепловых потоков обычно судят по основным характеристикам ПТП. Как было отмечено ранее, такими являются: интенсивность измеряемых потоков, чувствительность, инерционность, термическое сопротивление и погрешность измерений.

Определение названных характеристик обычно связано с изготовлением и исследованием конкретных ПТП и представляет собой непростую задачу.

Обычно исследователям при выборе метода и ПТП необходимо знать хотя бы ориентировочно, на что они могут рассчитывать. В литературе имеются попытки сравнения различных методов и ПТП по определенным характеристикам, например, зависимости безразмерной чувствительности ПТП от безразмерной частоты потока.

Результаты сравнения представлены на рисунке 5. Здесь обозначены 1 — аналитический метод, 2 — энтальпийный, 3 — метод тонкого диска, 4 — метод вспомогательной стенки. В силу специфических особенностей метода градуировочных характеристик, сравнение его с другими методами не приводится. Для идентичности условий сравнения принято, что все ПТП, реализующие различные методы, имеют одинаковую толщину и изготовлены из одинакового материала.

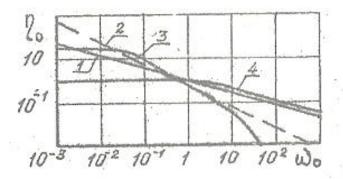


Рисунок 5 — Сравнительные характеристики тепломеров, где  $\eta_0$  и  $\omega_0$  безразмерные чувствительности ПТП и частота измерения сигнала

Как видно из рисунка 5, пологую характеристику имеют ПТП двух методов – вспомогательной стенки (рисунок 4) и тонкого диска (рисунок 3). Следовательно, именно эти методы необходимо выбирать, если поток содержит широкий спектр частот и чувствительность имеет важное значение. Отметим, что чувствительность этих ПТП ниже, чем у остальных (рисунки 1, 2) при малых частотах.

Метод тонкого диска (рисунок 3) позволяет получить большую чувствительность, чем метод вспомогательной стенки, но имеет более низкую границу по частоте.

Самую высокую чувствительность при низких частотах имеет энтальпийный метод, но он же обладает крутой характеристикой, что часто является преградой для его применения.

Возможности других методов наглядно представлены на рисунке 5.

Границы применения различных методов и ПТП, при которых обеспечивается допустимая погрешность, приведены в таблице 1. Эти рекомендации могут служить основанием для выбора того или иного метода и ПТП при решении конкретных задач.

Таблица 1 Пределы измеряемых тепловых потоков ПТП, реализующими различные методы (установлены из условия обеспечения допустимой погрешности)

Параметр	Аналитический	Энтальпийный	Метод	Метод тонного диска
1 1	метод	метод	вспомогательной	
	, ,	, ,	стенки	
Нижний предел как функция минимально измеряемой температуры и времени измерений	$q_{\scriptscriptstyle \rm H} = \lambda t_{min} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau_{min}}}$		$q_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}} = rac{\lambda}{\delta} \Delta t_{min},$ $ au_{min} = rac{5\delta^2}{lpha}$	$q_{ ext{H}} = rac{2\lambda\delta\Delta t_{min}}{lpha au_{min}}, \ \left( au_{min} < rac{R^2}{2lpha} ight), \ q_{ ext{H}} = rac{4\lambda\delta\Delta t_{min}}{R^2}, \ \left( au_{min} > rac{R^2}{2lpha} ight), \  au_{min} = 5  \delta^2/lpha$
Верхний предел как функция максимально допустимой температуры и времени измерения	$q_{\rm B} = \frac{\lambda t_{max}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau_{min}}}$		$q_{\scriptscriptstyle m B}=rac{\lambda}{\delta}\Delta t_{max}$	$q_{\rm B} = \frac{\lambda \delta \Delta t_{max}}{\alpha \tau_{max}},$ $\left(\tau_{max} < \frac{R^2}{4\alpha}\right),$ $q_{\rm B} = \frac{4\lambda \delta \Delta t_{max}}{R^2},$ $\left(\tau_{max} > \frac{R^2}{4\alpha}\right)$
Нижний предел для периодического (синусоидального)потока при максимально ожидаемой частоте	$q_{\scriptscriptstyle  m H} = \lambda t_{min} \sqrt{rac{\omega}{lpha}}$	$q_{_{\rm H}} = \frac{\lambda \delta \omega t_{min}}{\alpha}$	$q_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}} = \lambda \Delta t_{min} rac{\omega}{lpha}, \ \left(\omega > rac{lpha}{\delta^2} ight), \ q_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}} = rac{\lambda \Delta t_{min}}{\delta}, \ \left(\omega < rac{lpha}{\delta^2} ight)$	$q_{\mathrm{H}} = rac{4\lambda\delta\Delta t_{min}}{R^{2}},$ $\left(\omega < rac{4lpha}{R^{2}} ight),$ $q_{\mathrm{H}} = rac{\lambda\delta\omega\Delta t_{min}}{lpha},$ $\left(\omega > rac{4lpha}{R^{2}} ight),$ $\omega_{max} = \sqrt{4,5lpha/\delta^{2}}$

# 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЫЧНЫХ ПТП ТИПА «ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ СТЕНКА»

Как было показано выше, для определения нестационарных тепловых потоков в настоящее время используются различные методы. Каждый из методов обладает ограниченными возможностями, которые определяют выбор того или иного способа при решении конкретных задач. В последние годы все более часто ставится задача определения с заданной погрешностью меняющихся во времени тепловых потоков, кратковременно (менее 0,1 секунды) или сравнительно длительно (более одной секунды) действующих на объект. Причем эту информацию необходимо установить из одного опыта.

Для этой цели чаще всего используется аналитический метод, сущность которого, как известно, заключается в определении искомого потока из закономерностей распространения тепла в полуограниченном теле при известной температуре поверхности.

Однако и этот метод не всегда позволяет решить поставленную задачу. В частности, при определении высокочастотных потоков, действующих на объект длительный период, нарушаются основные предпосылки метода, существенно возрастает погрешность измерений, в результате чего применение аналитического метода становится нецелесообразным.

Удовлетворительные для практических целей результаты получены при использовании обычного ПТП типа «вспомогательная стенка», размещенного на поверхности полуограниченного тела. При этом, как указывалось ранее, необходима дополнительная информация о соотношении теплофизических свойств ПТП и основания, на котором он расположен.

Остановимся более подробно на постановке задачи и анализе расчетных зависимостей.

Тепловая модель ПТП 1, расположенного на полуограниченном теле 2, показана на рисунке 6. Предположим, что теплофизические свойства системы тел датчик — основание и условие теплообмена на границе не зависят от температуры. Между телами 1 и 2 — идеальный тепловой контакт. Поверхность  $x = -\delta$  воспринимает тепловой поток  $q(\tau)$ .

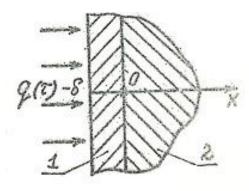


Рисунок 6 – Модель ПТП

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} \right); i = 1, 2. \tag{19}$$

Краевые условия:

$$q(\tau) = \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big/_{x = -\delta}, \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big/_{x \to \infty} = 0,$$

 $t_2/_{\chi} = const.$ 

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big/_{x=0} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big/_{x=0}, \qquad t_1 \Big/_{x=0} = t_2 \Big/_{x=0}. \tag{20}$$

$$t_i/_{\tau} = t_G$$
,  $i = 1,2$ .

Решение системы (19), (20) в общем случае приведено в [2]:

$$q(\tau) = q'^{(\tau)} + q''^{(\tau)} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1 \tau}} \left\{ 1 + \sum_0^{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{1 - \omega}{\omega + 1} \right)^n \right] \times exp\left( -\frac{n^2 A^2}{4\tau} \right) \right\} \Delta t(x) + \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1 \tau}} \int_0^{\tau} \frac{\Delta t(\tau) - \Delta t(\varepsilon)}{\sqrt{(\tau - \varepsilon)^3}} \times \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{1 - \omega}{\omega + 1} \right)^n \right] \frac{n^2 A^2 - 2(\tau - \varepsilon)}{2(\tau - \varepsilon)} \times exp\left( -\frac{n^2 A^2}{4(\tau - \varepsilon)} \right) \right\} d\varepsilon, \quad \omega = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, A = \frac{\delta}{\sqrt{a_1}}.$$

$$(21)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $q(\tau)$  — нестационарный тепловой поток, проходящий через тепломер,  $\lambda_1$ ,  $a_1$ ,  $\delta$  — теплопроводность и температуропроводность основания, на котором размещен тепломер,  $\Delta t(\tau)$  — перепад температур по толщине тепломера,  $\tau$  — время, t — температура окружающей среды.

Как видно из расчетной формулы (21), в процессе измерений необходимо знать в любой момент времени только  $\Delta t(\tau)$ . Хотя выражение (18) и является громоздким, тем не менее, расчеты на ЭВМ не требуют длительного времени и дают удовлетворительную погрешность.

Важной особенностью рассматриваемого метода измерения нестационарного потока является возможность еще на стадии проектирования определить вид расчетной зависимости для  $q(\tau)$ , а именно, ответить на вопрос, по какой формуле проводить расчет: по простейшей (17) или сложной (21). Для этого при проектировании вычисляют значение:

$$q''^{(\tau)} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1 \tau}} \int_0^{\tau} \frac{\Delta t(\tau) - \Delta t(\varepsilon)}{\sqrt{(\tau - \varepsilon)^3}} \times \left\{1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{1 - \omega}{\omega + 1}\right)^n\right] \frac{n^2 A^2 - 2(\tau - \varepsilon)}{2(\tau - \varepsilon)} \times exp\left(-\frac{n^2 A^2}{4(\tau - \varepsilon)}\right)\right\} d\varepsilon, \tag{22}$$

являющееся вторым слагаемым в правой части (21) и сопоставляют его с величиной допустимой погрешности, указанной в техническом задании. Если  $q''^{(\tau)} \leq \Delta q$ , то дальнейшее определение потока ведут по формуле (17).

Иными словами, использование зависимости (22) позволяет установить границы применения простейших зависимостей для определения искомого потока.

Второй важной особенностью рассматриваемого метода является возможность аналитического определения на стадии проектирования параметра  $\varepsilon$ , характеризующего тепловую инерцию тепломера. Как известно, обычно параметр  $\varepsilon$  определяют экспериментально при внезапной экспозиции тепломера постоянным тепловым потоком. В рассматриваемом случае для определения  $\varepsilon$  на стадии проектирования используют первый член в зависимости (21):

$$q'^{(\tau)} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1 \tau}} \left\{ 1 + \sum_0^{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{1 - \omega}{\omega + 1} \right)^n \right] \times exp\left( -\frac{n^2 A^2}{4\tau} \right) \right\} \Delta t(\tau) = K\Delta t(\tau). \quad (23)$$

Установлено, что при любых соотношениях теплофизических свойств ПТП 1 и основания 2 (рисунок 6) и любых законах изменения падающего потока  $q(\tau)$  через определенный промежуток времени  $\tau = \tau^*$  коэффициент  $k(\tau)$  в выражении (23) принимает постоянное значение k=const. Аналитически и экспериментально доказано, что время, за которое коэффициент k принимает постоянное значение, численно равно параметру  $\varepsilon$ , характеризующему тепловую инерцию, которую определяют по зависимости:

$$\tau^* = {}^{\tau}/_{k = const} = \varepsilon. \tag{24}$$

# З ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПО ДВУМ ТЕМПЕРАТУРАМ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПТП

Сравнительно простой способ определения потока, нашедший значительное распространение, вытекает из приближенного анализа температурного поля платины при известных из эксперимента температурах поверхностей [3].

Приведем постановку задачи.

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \overline{x^2}} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial F_0}, \quad -1 \le \bar{x} \le 1, F_0 \ge 0, \tag{25}$$

краевые условия:

$$\begin{cases} \vartheta(-1, Fo) = \vartheta_1(Fo), \\ \vartheta(1, Fo) = \vartheta_2(Fo), \\ \vartheta(\bar{x}, Fo) = 0, \end{cases}$$
 (26)

где  $\vartheta(\bar{x}, Fo)$  – перегрев поверхностей пластины относительно среды, Fo-критерий Фурье.

Процесс нагрева пластины разбивается на 2 стадии. Первая из них характеризуется наличием в пластине изотермической области и по своему физическому смыслу отражает модель полуограниченного тела. Тепловой поток, поглощаемый пластиной, определяется из зависимости [3]:

$$q_1 \tau = \frac{\lambda n \sqrt{Fo}}{L} \left\{ \frac{\vartheta_1 \sqrt{Fo}}{\sqrt{Fo}} + \frac{1}{2} \int_0^{F_0} \frac{\vartheta_1 (Fo')}{(F_0 - Fo')} dFo' \right\},\tag{27}$$

где  $\lambda$ , L — теплопроводность и толщина пластины; n=1,78 — показатель параболы с помощью которой аппроксимируется температурное поле пластины;

$$Fo^* = \frac{1}{2n(n+1)} = 0.1,$$

граница первой и второй стадии процесса.

На второй стадии процесса ( $Fo^* \le Fo \le \infty$ ) тепловой поток  $q(\tau)$  находят по формуле [3]:

$$q_{2}(Fo) = \frac{\lambda n \sqrt{Fo^{*}}}{L} \left\{ \frac{v_{1}\sqrt{Fo}}{\sqrt{Fo^{*}}} + \frac{1}{2} \int_{0}^{F_{0}} \frac{\vartheta_{1}(Fo')}{(F_{0} - Fo')} dFo' \right\} =$$

$$= \frac{\lambda \mu}{L} \left\{ \int_{0}^{Fo - Fo'} \frac{1}{2} \vartheta_{2}(Fo') + \left(n - \frac{1}{2}\right) \vartheta_{1}(Fo') \right\} exp[-\mu(Fo - Fo^{*} - Fo')] d(Fo'). \tag{28}$$

Удачная реализация метода осуществлена на кафедре теплофизики ЛИТМО [3]. ПТП изготовлен путем напыления на изоляционную подложку из металла тонкопленочного терморезистора. С помощью изготовленных

ПТП получены оригинальные результаты при исследовании быстропротекающих процессов, например, при сжигании низкосортного топлива в псевдоожиженных слоях, в процессах сушки и обжига дисперсных материалов в кипящем слое и другие.

#### 4 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННЫХ ПТП

Рассмотрим метод определения как кратковременных высокочастотных потоков, так и потоков практически любой длительности действия в условиях внешних тепловых помех. Метод реализуется с помощью так называемых комбинированных ПТП.

Конструктивная схема комбинированного ПТП показана на рисунке 7. Преобразователь состоит из чувствительного элемента 1, отделенного от основания 2 воздушным зазором 3 и изоляционными прокладками 4. На двух чувствительного элемента внутренней поверхностях И поверхности основания нанесены терморезисторные пленки, служащие для измерения среднеповерхностных температур. Собственно, чувствительный элемент может быть конструктивно выполнен в 2 вариантах. В первом – это тонкая высокотеплопроводная пластина, температурное поле которой одномерное. Во втором варианте чувствительный элемент представляет собой длинную полоску металлической фольги, сложенную и спресованную «гармошкой». Размеры секций «гармошки» одинаковы, секции располагаются одна за другой и электрически изолированы друг от друга. Изготовленный таким образом чувствительный элемент является одновременно термометром сопротивления, позволяющим измерять среднеобъемную температуру.

Переходим к сущности метода измерения потока с помощью комбинированных ПТП.

#### 4.1 Сущность метода и расчетные формулы

Нестационарный тепловой поток, поглощенный чувствительным элементом 1 ПТП, вызывает изменение его температуры. При этом могут соблюдаться два режима работы ПТП, отличающиеся друг от друга тепловыми и математическими моделями.

Первый режим. Отличительной его особенностью является затухание в толще чувствительного элемента температурного возмущения, вызванного искомым потоком. Иными словами, отсутствует теплообмен тела 1 с телом 2. Такой режим, как правило, будет наблюдаться при измерении кратковременных тепловых потоков. В случае представим ЭТОМ чувствительный элемент в виде полуограниченного тела, на поверхности которого имеется датчик температуры – пленочный терморезистор. Тепловое сопротивление такого терморезистора пренебрежимо мало и учитывать его не будем. Тогда искомый тепловой поток  $q(\tau)$  можно определить на основании закономерностей распространения тепла в полуограниченном теле при известной температуре поверхности и воспользоваться зависимостью, приведенной в [6].

**Второй режим.** Появление перепада температуры между телами 1 и 2, о чем свидетельствует изменение сопротивления терморезисторов, говорит

об окончании работы первого режима ПТП и начале второго. В этом режиме искомый тепловой поток полностью прогревает чувствительный элемент и рассеивается с его поверхности  $x = b_1$  (рисунок 7). Второй режим наиболее вероятен при изменении потоков, действующих длительный промежуток времени.

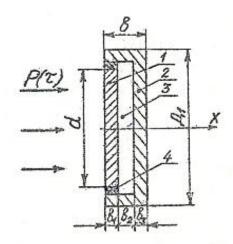


Рисунок 7 – Схема комбинированного ПТП

Если рассматривать общий случай использования ПТП при наличии внешних тепловых помех, то целесообразно для определения потока во втором режиме воспользоваться формулами, обоснованными в [4].

$$P(\tau) = \frac{1}{m_1 R} \frac{dt_{1v}}{d\tau} + \frac{1}{R} [t_{1s}(\tau) - t_2(\tau)], m_1 = \frac{1}{RC}, R = \frac{1}{\delta},$$
 (29)

где  $P(\tau)$  — тепловой поток, поглощенный чувствительным элементом,  $t_{1\upsilon}$ ,  $t_{1s}$  — среднеобъемная и среднеповерхностная температуры чувствительного элемента,  $t_2$ - среднеповерхностная температура основания,  $\delta$ , R — тепловая проводимость и сопротивление зазора,  $\tau$  — время.

Выражение (29) получено при следующих допущениях:

- теплофизические свойства чувствительного элемента и коэффициент теплообмена на его внутренней поверхности практически не зависят от температуры (в случае необходимости для уменьшения погрешности эту зависимость можно учесть);
- зазор 3 обладает непребрежимо малой теплоемкостью по сравнению с теплоемкостью чувствительного элемента. Величина зазора выбирается такой что в нем отсутствуют трудноучитываемые конвективные токи тепла и поэтому исключается условие неоднозначности определения параметра  $\delta$  (При этом выполняется условие  $Gr \cdot Pr < 700$ ).

Таким образом, для определения нестационарного теплового потока  $P(\tau)$  по формуле (26) необходимо знать в любой момент времени измерение среднеобъемной  $t_{1v}(\tau)$  температуры чувствительного элемента и измерение

среднеповерхностных температур чувствительного элемента и основания, т.е.  $t_{1s}(\tau)$  и  $t_2(\tau)$ . Параметры  $m_1$  и R являются постоянными комбинированного ПТП и определяются из градуировочных опытов.

Измерение зависимостей  $t_{1s}(\tau)$  и  $t_2(\tau)$  не представляет особых трудностей. Определение  $t_{1\vartheta}(\tau)$  не всегда просто и связано с оценкой допустимой погрешности.

Сказанное относится к случаю, если чувствительный элемент представляет собой платину (первый вариант). Если ее элемент изготовлен в виде «гармошки» (второй вариант), то определение зависимости  $t_{1\vartheta}(\tau)$  совсем просто и не требует никаких ухищрений. Отсюда следует, что предпочтительнее изготавливать чувствительный элемент в виде «гармошки». Однако этому препятствуют технологические трудности, неудовлетворительное преодоление которых может внести существенные погрешности в определение температуры и потока. Поэтому выбор того или иного варианта чувствительного элемента необходимо проводить с учетом имеющихся возможностей исследователей.

Задача определения потока  $P(\tau)$  существенно упрощается, если распределение температуры в чувствительном элементе равномерно и среднеобъемная температура его равна среднеповерхностной, т.е.  $t_{1v}=t_{1s}$ . Тогда расчетная формула (29) принимает вид:

$$P(\tau) = \frac{1}{m_1 R} \frac{dt_1}{d\tau} + \frac{1}{R} [t_1(\tau) - t_2(\tau)]. \tag{30}$$

Комбинированные тепломеры, в которых выполняется условие  $t_{1v} = t_{1s}$ , находят применение в различных теплофизических исследованиях, в тех случаях, когда частота изменения потока не превышает  $\omega \leq 1\Gamma$ ц, т.е. при потоках низкой и средней частоты. В случае, если не соблюдается условие  $t_{1v} = t_{1s}$ , среднеобъемная температура чувствительного элемента  $t_{1n}$  может быть оценена на основе информации о его среднеповерхностных температурах, измеряемых в процессе эксперимента. При этом путем решения обратной задачи теплопроводности по граничным условиям восстанавливается температурное поле чувствительного элемента среднеобъемная температура. Применение рассчитывается его быстродействующих ЭВМ позволяет решить задачу в реальном масштабе времени. Возможности метода при этом расширяются и ПТП позволяет измерять высокочастотные тепловые потоки.

Вследствие широких возможностей рассмотренного метода и ПТП, его реализующих, считаем необходимым остановиться на основах проектирования преобразователей теплового потока данного класса; рассмотреть пример расчета ПТП, обеспечивающих заданную погрешность, инерционность и чувствительность.

# 5 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПТП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

#### 5.1 Постановка задачи

При проектировании различных ПТП для измерения тепловых потоков, изменяющихся во времени по произвольному закону, обычно известна следующая исходная информация:

- уровень измеряемых потоков;
- ориентировочный характер и скорость их измерения;
- температура среды, окружающей ПТП при проведении опыта;
- минимальное изменение теплового потока, которое необходимо почувствовать;
- примерный характер и величина тепловых помех.

Преобразователь необходимо проектировать таким образом, чтобы он обеспечил допустимую погрешность определения нестационарного теплового потока.

# 5.2 Погрешность определения нестационарного теплового потока

Как было установлено ранее, тепловой режим комбинированного ПТП в общем случае меняется под действием как искомого потока, так и внешних тепловых помех (ВТП).

Отметим, что мы будем рассматривать случай измерения потоков средней и низкой частоты, действующих на ПТП длительный промежуток времени в условиях ВТП. Именно этот случай чаще всего встречается при различных теплофизических исследованиях. Поскольку в уравнениях (29), (30) ВТП учтены, то последние не должны оказывать влияние на погрешность измерения потока. Однако это не так.

Погрешность определения потока оказывается различной на разном уровне и характере помех. Для обоснования этого положения получим формулу погрешности определения потока. В качестве исходной зависимости для получения формулы погрешности примем выражение (30). Для упрощения последующих выкладок допустим, что  $t_{1\nu} = t_{1s} = t_1$ .

Вывод формулы погрешности проведем при двух предположениях:

- систематические погрешности исключены или учтены соответствующими поправками, т.е. определяющими являются случайные погрешности;
- случайные погрешности подчинены нормальному закону распределения.

Поток  $P(\tau)$  является результатом косвенных измерений. Обозначим в уравнении (30):

$$\frac{1}{m_1 R} = A, \qquad \frac{1}{R} = B, \quad \frac{dt_1}{d\tau} = \Pi, \tag{31}$$

перепишем (30) в виде:

$$P = A \cdot \Pi + B \cdot (t_1 - t_2). \tag{32}$$

Выражение для среднеквадратичной погрешности косвенных измерений потока  $\Delta P$  будет иметь вид:

$$\Delta P = \sqrt{(\Pi \cdot \Delta A)^2 + (A \cdot \Delta \Pi)^2 + [(t_1 - t_2)\Delta B]^2 + (B\Delta t_1)^2 + (B\Delta t_2)^2}.$$
 (33)

Разделим обе части уравнения (33) на значение Р из (32). В результате чего получим выражение для относительной величины среднеквадратичной погрешности:

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\frac{(\Pi \cdot \Delta A)^{2} + (A \cdot \Delta \Pi)^{2}}{[A \cdot \Pi + B \cdot (t_{1} - t_{2})]^{2}} + \frac{[(t_{1} - t_{2}) \Delta B]^{2} + (B \Delta t_{1})^{2} + (B \Delta t_{2})^{2}}{[A \cdot \Pi + B \cdot (t_{1} - t_{2})]^{2}}} = \sqrt{\frac{1}{\left[1 + \frac{B \cdot (t_{1} - t_{2})}{A \cdot \Pi}\right]} \left[\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^{2} + \left(\frac{\Delta \Pi}{\Pi}\right)^{2}\right] + \frac{1}{\left[1 + \frac{A \cdot \Pi}{B \cdot (t_{1} - t_{2})}\right]} \left[\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^{2} + \left(\frac{\Delta t_{1}^{2} + \Delta t_{2}^{2}}{(t_{1} - t_{2})^{2}}\right)\right]}.$$
(34)

Подставим вместо А значения из (31) и после преобразования получим

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{m_1 \frac{(t_1 - t_2)}{\Pi}} \sqrt{\left(\frac{\Delta \Pi}{\Pi}\right)^2 + m_1^2 \frac{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2}{\Pi^2} + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2} + \left[1 + m_1^2 \frac{\Delta t_1^2 - \Delta t_2^2}{\Pi^2}\right] \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2.$$
(35)

Определим относительные погрешности  $\frac{\Delta\Pi}{\Pi}$ ;  $\frac{\Delta m_1}{m_1}$ ;  $\frac{\Delta R}{R}$ .

Согласно обозначению (31)

$$\Pi = \frac{dt_1}{d\tau} = \frac{t_1'' - t_1'}{\tau'' - \tau'}.$$

Тогда

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \sqrt{\frac{(\Delta t_1')^2 + (\Delta t_1'')^2}{(t_1'' - t_1')^2} + \frac{(\Delta \tau')^2 + (\Delta \tau'')^2}{(\tau'' - \tau')^2}}.$$
(36)

Коэффициенты  $m_1$  и R определяются из градуировочных опытов по формулам:

$$m_{1} = \frac{\ln(t_{1} - t_{2})_{3} - \ln(t_{1} - t_{2})_{4}}{\tau_{4} - \tau_{3}},$$

$$R = \left[\frac{(t_{1} - t_{2})}{P}\right]_{C}.$$
(37)

Относительные погрешности их определения равны:

$$\frac{\Delta m_1}{m_1} = \sqrt{\frac{1}{(\ln Q)^2} \left[ \frac{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2}{(t_1 - t_2)^2} \right]_3 + \frac{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2}{(t_1 - t_2)^2} \right]_4 + \frac{\Delta \tau_3^2 + \Delta \tau_4^2}{(\tau_3 + \tau_4)}},$$
(38)

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_C^2 + \frac{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2}{(t_1 - t_2)^2}\Big|_C},$$
(39)

$$Q = \frac{(t_2 - t_3)_3}{(t_1 - t_2)_4}. (40)$$

Подставим значение  $\frac{\Delta\Pi}{\Pi}$  из (36) в уравнение (34) и получим:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1}{1 + m_1 \frac{t_1 - t_2}{\Pi}} *$$

$$\sqrt{\frac{\left(\Delta t_{1}^{\prime}\right)^{2} + \left(\Delta t_{1}^{\prime\prime}\right)^{2}}{\left(t_{1}^{\prime\prime} - t_{1}^{\prime}\right)^{2}} + \frac{\left(\Delta \tau^{\prime}\right)^{2} + \left(\Delta \tau^{\prime\prime}\right)^{2}}{\left(\tau^{\prime\prime} - \tau^{\prime}\right)^{2}} + m_{1}^{2} \frac{\Delta t_{1}^{2} + \Delta t_{2}^{2}}{\Pi^{2}} + \left(\frac{\Delta m_{1}}{m_{1}}\right)^{2} + \left[1 + \left(m_{1} \frac{(t_{1} - t_{2})}{\Pi}\right)^{2}\right] \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^{2}}$$
(41)

Введем обозначения:

$$t_1 - t_2 = X; \frac{\Pi}{m_1} = Y; \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = b,$$
 (42)

$$\frac{(\Delta \tau')^2 + (\Delta \tau'')^2}{(\tau'' - \tau')^2} + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 = C,\tag{43}$$

$$m_1^2 \frac{(\Delta \tau')^2 + (\Delta \tau'')^2}{(\tau'' - \tau')^2} + \Delta t_1^2 + \Delta t_2^2.$$
 (44)

И перепишем уравнение (41) в виде:

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\frac{a+bX^2+cY^2}{(X+Y)^2}}.$$
(45)

Параметры a, b, c мало зависят от теплового режима чувствительного элемента и корпуса; в первом приближении их можно считать постоянными величинами. Это следует из приведенных ниже рассуждений. Погрешности измерения температуры  $\Delta t$  и времени  $\Delta \tau$  в обозначениях (42), (43), (44) зависят от класса точности применяемых измерительных приборов и значения измеряемых величин. При малом изменении последних можно считать, что указанные погрешности определяются только классом точности применяемых измерительных приборов и для выбранных приборов эти погрешности практически постоянны.

Коэффициенты  $m_1$  и R и их относительные погрешности  $\frac{\Delta m_1}{m_1}$  и  $\frac{\Delta R}{R}$ , входящие в заданные параметры, определяются по формулам (38) и (39). Поскольку величины, стоящие в знаменателе в этих выражениях, меняются в опыте незначительно, то погрешности  $\frac{\Delta m_1}{m_1}$  и  $\frac{\Delta R}{R}$  зависят в основном от погрешности измерения температуры и времени, которые определяются классом точности измерительных приборов. Тогда при выбранных приборах погрешности  $\frac{\Delta m_1}{m_1}$  и  $\frac{\Delta R}{R}$  являются практически постоянными. Следовательно, погрешность измерения теплового потока зависит от:

- коэффициентов  $m_1$  и R, характеризующих конструкцию ПТП;
- класса точности применяемых измерительных приборов;
- теплового режима чувствительного элемента и корпуса, характеризуемого параметрами  $X(\tau)$  и  $Y(\tau)$ .

Для определенного ПТП и выбранных измерительных приборов изменение погрешности в опыте связано с изменением параметров  $X(\tau)$  и  $Y(\tau)$ , которые зависят от измеряемого потока  $P(\tau)$  и внешних тепловых помех.

На рисунке 8 показаны зависимости погрешности  $\frac{\Delta P}{P}$  от теплового режима  $[X(\tau),Y(\tau)]$ , построенные по формуле (45) для одного из ПТП, откуда видно, что погрешность существенно зависит от теплового режима.

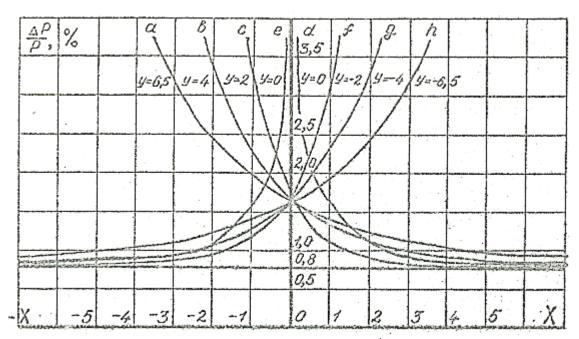


Рисунок 8 — Зависимость погрешности  $\frac{\Delta P}{P}$  измерения теплового потока от теплового режима ПТП  $X(\tau)$  и  $Y(\tau)$ 

Ниже рассмотрены основы проектирования комбинированного ПТП, обеспечивающего измерения нестационарного потока с заранее заданной погрешностью. Рассчитаны параметры конкретного ПТП, заданы условия его применения, установлены основные характеристики. Иными словами рассмотрен пример, который используется в дальнейшем студентами при курсовом проектировании.

#### 5.3 Техническое задание

Необходимо провести проектирование ПТП, позволяющего измерять нестационарные потоки в условиях внешних тепловых помех. При этом требуется:

- установить (рассчитать) характер зависимости параметров, описывающих: разность температуры  $X(\tau)$ , чувствительного элемента 1 и основания 2, а также скорость изменения температуры  $Y(\tau)$  чувствительного элемента. При этом задан:
- различный закон изменения теплового потока, поглощаемого поверхностью чувствительного элемента 1;
- характер влияния на погрешность внешних тепловых помех. В данном случае это изменение температуры окружающей среды.

В качестве примера рассмотрим следующие заданные условия: тепловой поток изменяется по закону

$$P(\tau) = \begin{cases} P_1, \tau \leq \tau_1 \\ P_2, \tau > \tau_1 \end{cases}, \tag{46}$$

а температура среды

$$v_{c}(\tau) = v_{0}[1 - exp(-k_{c}\tau)],$$
 (47)

где  $v_{\rm c} = t_{\rm c} - t_{\rm 0}$  — перегрев среды относительно начальной температуры  $t_{\rm 0}$ .

Значения параметров указаны в таблице 2.

Таблица 2

$P_1$ , BT	$P_2$ , BT	$\tau_1$ , c	$v_0$ , K	$k_{\rm c}$ , $c^{-1}$
0.5	1.5	300	20	$10^{-2}$

#### 5.4 Тепловой режим ПТП

Выше было установлено, что для того, чтобы разработать ПТП, обеспечивающий заданную погрешность, необходимо получить зависимости, характеризующие температурный режим устройства при различных законах изменения искомого теплового потока и внешних тепловых помех. Переходим к анализу теплового режима рассматриваемого ПТП (рисунок 7).

Температурный режим систем трех тел (чувствительный элемент – газовый зазор – корпус) описывается уравнениями:

$$P(\tau) = C_1 \frac{dt_1}{d\tau} + \sigma_1 (t_1 - t_2), \tag{48}$$

$$\sigma_1(t_1 - t_2) = C_2 \frac{dt_2}{d\tau} + \frac{1}{R} (t_2 - t_c), \tag{49}$$

$$\sigma_1 = KS_1, \ \frac{1}{R} = \sigma_2,$$

где  $\sigma_1$  — тепловая проводимость от чувствительного элемента 1 к корпусу 2;  $\sigma_2$  — тепловая проводимость от корпуса к внешней среде;  $t_c$  — температура внешней среды.

Предположим, что теплофизические параметры  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  известны и не зависят от температуры. Выразим температуру корпуса  $t_2$  через температуру чувствительного элемента  $t_1$ . Из выражения (30) получим:

$$t_2 = t_1 + \frac{C_1}{\sigma_1} \frac{dt_1}{d\tau} - \frac{P}{\sigma_1} \,. \tag{50}$$

Подставляя значение  $t_2$  из (50) в уравнение (49), получим:

$$\frac{d^2t_1}{d\tau^2} + e^{\frac{dt_1}{d\tau}} + gt_1 = f(\tau) + gt_c(\tau).$$
 (51)

Здесь приняты следующие обозначения:

$$d = m_{2} + m_{1}(1 + \beta), \quad g = m_{1}m_{2},$$

$$m_{1} = \frac{\sigma_{1}}{c_{1}}, m_{2} = \frac{\sigma_{2}}{c_{2}}, \beta = \frac{c_{1}}{c_{2}},$$

$$f(\tau) = \frac{1}{C_{1}} \left[ \frac{dP}{d\tau} + (m_{2} + \beta m_{1})P \right].$$
(52)

Общий интеграл (46) равен:

$$t_1 = t_{10} + t_{1,\eta}, (53)$$

где  $t_{10}$  – общее решение соответствующего (51) однородного уравнения;  $t_{1,\eta}$  – частное решение неоднородного уравнения.

Общий интеграл соответствующего однородного уравнения:

$$\frac{d^2t_{10}}{d\tau^2} + e\frac{dt_{10}}{d\tau} + gt_{10} = 0, (54)$$

При выполнении условия:

$$\lambda^2 = d^2 - 4g > 0, \tag{55}$$

имеет вид

$$\vartheta_{10} = A_1 e^{-m_3 \tau} + A_2 e^{-m_4 \tau}. \tag{56}$$

В (56) приняты следующие обозначения:

 $A_1$  и  $A_2$  – постоянные интегрирования;

$$m_3 = 0.5(d + \lambda); m_4 = 0.5(d - \lambda);$$

$$\lambda = \sqrt{[m_2 + m_1(1 + \beta)]^2 - 4m_1m_2},$$
(57)

частное решение уравнения (51) имеет вид:

$$t_{1,\eta} = \frac{2}{\lambda} \int_{c}^{t} \varphi(u)e^{\frac{1}{2}d(u-\tau)} sh\frac{\lambda}{2}(\tau-u)du.$$
 (58)

Здесь

$$\varphi(u) = f(\tau) + g\vartheta_c(\tau). \tag{59}$$

Если функция  $\varphi(u)$  задана, то из уравнения (50) и (51) с учетом (56) и (58) можно найти зависимости  $X(\tau)$  и  $Y(\tau)$ , которые и характеризуют тепловой режим комбинированных ПТП. Иными словами, при известных

законах изменения мощности  $P(\tau)$  и температуры среды  $\tau_{\rm c}$  ( $\tau$ ) можно определить:

$$X(\tau) = t_1(\tau) - t_2(\tau)$$
 и  $Y(\tau) = \frac{1}{m_1} \frac{dt_1}{d\tau}$ .

Для удобства дальнейшего изложения будем отсчитывать температуры чувствительного элемента, корпуса и среды от начальной температуры  $t_0$ . т.е. будем говорить о перегреве отдельных частей относительно начальной температуры. Введем обозначения:

$$\vartheta_1 = t_1 - t_0; \ \vartheta_2 = t_2 - t_0; \ \vartheta_{cp} = t_{cp} - t_0,$$

с учетом которых уравнения (50) и (51) примут вид:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + \frac{C_1}{\sigma_1} \frac{dv_1}{d\tau} - \frac{P}{\sigma_1},\tag{60}$$

$$\frac{d^2\vartheta_1}{d\tau^2} = d\frac{d\vartheta_1}{d\tau} + g\vartheta_1 = f(\tau) + g\vartheta_{\rm cp}(\tau). \tag{61}$$

Определим параметры  $X(\tau)$  и  $Y(\tau)$  для примера, указанного в техническом задании.

а) рассмотрим случай 
$$au \leq au_1$$
, тогда  $P = P_1, \frac{dP}{d au} = 0$ ,  $\vartheta_{10} = A_1 e^{-m_3 au} + A_2 e^{-m_4 au}$ ,  $A_1$  и  $A_2$  – постоянные интегрирования,  $m_3 = 0.5(e + \lambda)$ ,  $m_4 = 0.5(e - \lambda)$ ,  $\lambda = \sqrt{[m_2 + (1 + \beta)m_1]^2 - 4m_1m_2} = \sqrt{e^2 - 4g}$ ,  $\vartheta_{14} = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\tau} \psi(u) \, e^{\frac{1}{2}e(u - \tau)} sh \frac{\lambda}{2} (\tau - u) du$ ,  $\eta = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\tau} \psi(u) \, e^{\frac{1}{2}e(u - \tau)} sh \frac{\lambda}{2} (\tau - u) du$ ,  $\eta = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\tau} \psi(u) \, e^{\frac{1}{2}e(u - \tau)} sh \frac{\lambda}{2} (\tau - u) du = \frac{2\psi(\tau)}{\lambda} \int_0^{\tau} e^{\frac{1}{2}e(u - \tau)} \cdot \frac{e^{\frac{\lambda}{2}(\tau - u)} - e^{\frac{\lambda}{2}(u - \tau)}}{2} du = \frac{\psi(u)}{\lambda} \int_0^{\tau} \left( e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e - \lambda)} - e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e + \lambda)} \right) du = \frac{\psi(u)}{\lambda} \left( \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e - \lambda)} - \frac{2}{e + \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e + \lambda)} \right) du = \frac{\psi(u)}{\lambda} \left( \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e - \lambda)} - \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e + \lambda)} \right) du = \frac{\psi(u)}{\lambda} \left( \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e - \lambda)} - \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e + \lambda)} \right) du = \frac{\psi(u)}{\lambda} \left( \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e - \lambda)} - \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e + \lambda)} \right) du = \frac{\psi(u)}{\lambda} \left( \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(u - \tau)(e - \lambda)} - \frac{2}{e - \lambda} e^{\frac{1}{2}(e - \lambda)\tau} + \frac{2}{m_1} e^{-m_3\tau} \right) du = \frac{\psi(u)}{\lambda} \left( \frac{2}{m_2} e^{-m_3\tau} + \frac{2}{m_2} e^{-m_4\tau} + \frac{1}{m_3} e^{-m_3\tau} \right),$   $\vartheta_1 = \vartheta_{10} - \vartheta_{14} = \frac{1}{c_1} (m_2 + \beta m_1) P_1 + g \vartheta_0 (1 - e^{-k_c\tau}) \right] \cdot \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_4} e^{-m_4\tau} + \frac{1}{m_5} e^{-m_3\tau} \right).$ 

#### б) для случая $\tau > \tau_1$ ,

$$P = P_2, \psi(u) = \frac{1}{c_1} (m_2 + \beta m_1) P_2 + g \vartheta_0 (1 - e^{-k_c \tau}).$$

Уравнение (61) можно записать в виде:

 $\frac{d^2\vartheta_1}{d(\tau-\tau_1)}$ + $e\frac{d\vartheta_1}{d(\tau-\tau_1)}$  +  $g\vartheta_1$ = $f(\tau-\tau_1+\tau_1)$ +  $g\vartheta_c(\tau-\tau_1+\tau_1)$ , тогда аналогично случаю (а) можно получить:

$$\begin{array}{lll} \vartheta_1 = A_3 e^{-m_3(\tau-\tau_1)} & + & A_4 e^{-m_4(\tau-\tau_1)} + \psi(\tau) \cdot \frac{1}{\lambda} \Big(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_4} e^{-m_4(\tau-\tau_1)} + \frac{1}{m_3} e^{-m_3(\tau-\tau_1)} \Big) & = & A_3 e^{-m_3(\tau-\tau_1)} + A_4 e^{-m_4(\tau-\tau_1)} & + & \psi(\tau) \cdot \frac{1}{\lambda} \Big[\frac{1}{c_1} (m_2 + \beta m_1) P_2 + g \vartheta_0 (1 - e^{-k_c \tau}) \Big] \cdot \Big(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_4} e^{-m_4(\tau-\tau_1)} + \frac{1}{m_3} e^{-m_3(\tau-\tau_1)} \Big), & \text{где } A_3, A_4 & - & \text{постоянные интегрирования.} \end{array}$$

# 1) Найдем $\frac{dv_1}{d\tau}$ .

#### а) В случае $\tau \leq \tau_1$ ,

$$\frac{d\vartheta_1}{d\tau} = -m_3 A_1 e^{-m_3 \tau} - m_4 A_2 e^{-m_4 \tau} + \frac{1}{\lambda} g \vartheta_0(-1) e^{-k_c \tau} \cdot (-k_c) \cdot \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_4} e^{-m_4 \tau} + \frac{1}{m_3} e^{-m_3 \tau}\right) + \frac{1}{\lambda} \left[\frac{1}{c_1} (m_2 + \beta m_1) P_1 + g \vartheta_0(1 - e^{-k_c \tau})\right] \cdot \left(e^{-m_4 \tau} - e^{-m_3 \tau}\right) = -m_3 A_1 e^{-m_3 \tau} - m_4 A_2 e^{-m_4 \tau} + \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3}\right) e^{-k_c \tau} - \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \frac{1}{m_4} e^{-(k_c + m_4) \tau} + \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \frac{1}{m_3} e^{-(k_c + m_3) \tau} + \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_1 e^{-m_4 \tau} - \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_1 e^{-m_3 \tau} + \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-m_4 \tau} - \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-m_3 \tau} - \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-(k_c + m_4) \tau} + \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-(k_c + m_3) \tau} = \left(-m_3 A_1 - \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_1 - \frac{g \vartheta_0}{\lambda}\right) e^{-m_3 \tau} + \left(-m_4 A_2 - \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_1 - \frac{g \vartheta_0}{\lambda}\right) e^{-m_4 \tau} + \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \left(\frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3}\right) e^{-k_c \tau} + \frac{g \vartheta_0}{\lambda} \left(1 + \frac{k_c}{m_s}\right) e^{-(k_c + m_3) \tau} - \frac{g \vartheta_0}{\lambda} \left(1 + \frac{k_c}{m_s}\right) e^{-(k_c + m_4) \tau}.$$

Обозначим постоянные:

$$\begin{split} D_1 &= \frac{1}{\lambda c_1} \left( m_2 + \beta \, m_1 \right) P_1 - \frac{g v_0}{\lambda}, \, D_2 = \frac{g \vartheta_0}{\lambda m_3} \,, \, \text{тогда} \, D_3 = \frac{g \vartheta_0}{\lambda m_4}. \\ &\frac{d \vartheta_1}{d \tau} = \left( -m_3 A_1 - D_1 \right) \, e^{-m_3 \tau} + \left( -m_4 A_2 \, + \, D_1 \right) \, e^{-m_4 \tau} + k_c \, \left( D_3 - \, D_2 \, \right) \, e^{-k_c \tau} \\ &+ D_2 \, \left( k_c + m_3 \right) \, e^{-(k_c + \, m_3) \tau} - D_3 \, \left( k_c + m_4 \right) \, e^{-(k_c + \, m_4) \tau}. \end{split}$$

#### б) В случае $\tau > \tau_1$ ,

$$\frac{d\vartheta_1}{d\tau} = -m_3 A_3 e^{-m_3(\tau - \tau_1)} - m_4 A_4 e^{-m_4(\tau - \tau_1)} + \frac{1}{\lambda} g\vartheta_0 e^{-k_c \tau} \cdot (k_c) \cdot \left( \frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_4} e^{-m_4(\tau - \tau_1)} + \frac{1}{m_3} e^{-m_3(\tau - \tau_1)} \right) + \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{1}{c_1} (m_2 + m_3) \right]$$

$$\begin{split} \beta m_1) P_2 + g \vartheta_0 (1 - e^{-k_c \tau}) \Big] \cdot \Big( e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} - e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} \Big) &= -m_3 A_1 e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} - m_4 A_2 e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} + \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \cdot \Big( \frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3} \Big) e^{-k_c \tau} - \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \frac{1}{m_4} e^{-(k_c + m_4)\tau + m_4 \tau_1} + \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \frac{1}{m_3} e^{-(k_c + m_3)\tau + m_3 \tau_1} + \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_1 e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} - \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_2 e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} + \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} - \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} - \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-(k_c + m_4)\tau + m_4 \tau_1} + \frac{g \vartheta_0}{\lambda} e^{-(k_c + m_3)\tau + m_3 \tau_1} = \Big( -m_3 A_1 - \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_2 - \frac{g \vartheta_0}{\lambda} \Big) e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} + \frac{g \vartheta_0 k_c}{\lambda} \Big( \frac{1}{m_4} - \frac{1}{m_3} \Big) e^{-k_c \tau} + \frac{g \vartheta_0}{\lambda} \Big( 1 + \frac{k_c}{m_3} \Big) e^{-(k_c + m_3)\tau + m_3 \tau_1} - \frac{g \vartheta_0}{\lambda} \Big( 1 + \frac{k_c}{m_4} \Big) e^{-(k_c + m_4)\tau + m_4 \tau_1} = (-m_3 A_3 - D_4) e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} + (-m_4 A_2 + D_4) e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} + k_c (D_3 - D_2) e^{-k_c \tau} - D_3 (k_c + m_4) e^{-(k_c + m_4)\tau + m_4 \tau_1} + D_2 (k_c + m_3) e^{-(k_c + m_3)\tau + m_3 \tau_1}. \\ 3 \text{Десь } D_4 = \frac{1}{\lambda c_1} (m_2 + \beta m_1) P_2 + \frac{g \vartheta_0}{\lambda}. \end{split}$$

2) Найдем постоянные интегрирования  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ , используя начальные условия  $\vartheta_1|_{\tau=0}=0$  и  $\vartheta_2|_{\tau=0}=0$ .

$$\theta_1|_{\tau=0} = A_1 e^{-m_3 0} + A_2 e^{-m_4 0}, 0 = A_1 + A_2, A_1 = A_2.$$

$$\frac{d\theta_1}{d\tau}\Big|_{\tau=0} = -m_3 A_1 e^{-m_3 0} - m_4 A_2 e^{-m_4 0} = -m_3 A_1 + m_4 A_1.$$

3) С учетом обозначений  $X(\tau) = \vartheta_1(\tau) - \vartheta_2(\tau), Y(\tau) = \frac{1}{m_1} \cdot \frac{d\vartheta_1}{d\tau}$ , получим:

$$X(\tau) = \begin{cases} \frac{P_1}{\sigma_1} - \frac{1}{m_1} \left[ (-m_3 A_1 - D_1) e^{-m_3 \tau} + (-m_4 A_2 - D_1) e^{-m_4 \tau} + k_c (D_3 - D_2) e^{-k_c \tau} + \\ + D_2 (k_c + m_3) e^{-(k_c + m_3)\tau} - D_3 (k_c + m_4) e^{-(k_c + m_4)\tau} \right], & 0 \le \tau \le \tau_1, \\ \frac{P_2}{\sigma_1} - \frac{1}{m_1} \left[ (-m_3 A_3 - D_4) e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} + (-m_4 A_4 + D_4) e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} + k_c (D_3 - D_2) e^{-k_c \tau} - \\ - D_3 (k_c + m_4) e^{-(k_c + m_4)\tau + m_4 \tau_1} - D_2 (k_c + m_3) e^{-(k_c + m_3)\tau + m_3 \tau_1} \right], & \tau > \tau_1, \end{cases}$$

$$Y(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{m_1} \left[ (-m_3 A_1 - D_1) e^{-m_3 \tau} + (-m_4 A_2 - D_1) e^{-m_4 \tau} + k_c (D_3 - D_2) e^{-k_c \tau} + \\ + D_2 (k_c + m_3) e^{-(k_c + m_3) \tau} - D_3 (k_c + m_4) e^{-(k_c + m_4) \tau} \right], & 0 \le \tau \le \tau_1, \\ \frac{1}{m_1} \left[ (-m_3 A_3 - D_4) e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} + (-m_4 A_4 + D_4) e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} + k_c (D_3 - D_2) e^{-k_c \tau} - \\ - D_3 (k_c + m_4) e^{-(k_c + m_4) \tau + m_4 \tau_1} - D_2 (k_c + m_3) e^{-(k_c + m_3) \tau + m_3 \tau_1} \right], & \tau > \tau_1. \end{cases}$$

## 5.5 Чувствительность ПТП

Чувствительностью комбинированных ПТП назовем отношение реакции  $(\vartheta_1 - \vartheta_2)$  ПТП к измеряемому тепловому воздействию  $P(\tau)$ , т.е.

$$\eta = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{P} \,, \tag{62}$$

где  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  — температуры перегрева чувствительного элемента и основания.

При известном законе изменения мощности  $P(\tau)$  для определения чувствительности необходимо знать разность температур  $(\vartheta_1 - \vartheta_2)$ . Получим из уравнения (60) выражение для  $(\vartheta_1 - \vartheta_2) = f(\tau)$ :

$$(\theta_1 - \theta_2) = \frac{1}{\sigma_1} \left[ P(\tau) - C_1 \frac{d\theta_1}{d\tau} \right],\tag{63}$$

подставим последнее выражение в формулу (62). Тогда зависимость, позволяющая рассчитать на стадии проектирования необходимую чувствительность ПТП, будет иметь вид:

$$\eta = \frac{1}{\sigma_1} \left[ 1 - \frac{C_1}{P(\tau)} \frac{d\theta_1}{d\tau} \right]. \tag{64}$$

Из формулы (64) следует, что чувствительность в общем случае зависит от конструктивных параметров  $\sigma_1$  и  $C_1$  и режимных факторов  $P(\tau)$  и  $\frac{d\vartheta_1}{d\tau}$  при различных законах изменения искомого потока и внешних помех.

Чувствительность рассматриваемого ПТП для случая теплового удара, а именно, при ступенчатом воздействии теплового протока и экспоненциальном изменении температуры среды, будет иметь вид:

$$\begin{split} &\eta(\tau) = \\ &= \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{m_1 P_1} \big[ (-m_3 A_1 - D_1) e^{-m_3 \tau} + (-m_4 A_2 - D_1) e^{-m_4 \tau} + k_c (D_3 - D_2) e^{-k_c \tau} + \\ &\quad + D_2 \left( k_c + m_3 \right) e^{-(k_c + m_3) \tau} - D_3 (k_c + m_4) \left. e^{-(k_c + m_4) \tau} \right], \quad 0 \leq \tau \leq \tau_1, \\ \frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{m_1 P_2} \big[ (-m_3 A_3 - D_4) e^{-m_3 (\tau - \tau_1)} + (-m_4 A_4 + D_4) e^{-m_4 (\tau - \tau_1)} + k_c (D_3 - D_2) e^{-k_c \tau} - \\ &\quad - D_3 (k_c + m_4) e^{-(k_c + m_4) \tau + m_4 \tau_1} - D_2 (k_c + m_3) e^{-(k_c + m_3) \tau + m_3 \tau_1} \big], \quad \tau > \tau_1. \end{array} \right. \end{split}$$

**Погрешность** измерения теплового потока определяется по формуле (45).

#### Программа для расчета погрешности приведена ниже:

```
clear;
P1=0.5;
P2=1.5;
taul=300;
ml = 0.16;
m2=0.7e-3;
C1=0.1;
C2=19.7; a=0.7;
b=2.25e-4; c=4,43e-3;
W=0.03; sigmal=m1*C1; sigma2=m2*C2; beta=C1/C2; q=m1*m2;
d=m2+m1*(1+beta); lambda=sqrt(d*d\sim4*q); m3=0.5*(d+lambda);
         m4=0.5*(d-lambda);
         A1=P1/(C1*(ш4-ш3));
         A2 = -A1;
          f=1/C1*(m2+beta*m1)*P1+q*5*cos(W*ta)
          ul); fl=-g*5*W*sin(W*taul);
          Tltaul=Al*exp(-taul*m3)+A2*exp(-taul*m4)+f/lambda*(1/m4-1/m4 *exp(-taul*m4)+f/lambda*)
          taul*m4)+1/m3*exp(-taul*m3)-1/m3);
          Yl=1/ml*(-m3*Al*exp(-taul*m3)-m4*A2*exp(-taul*m4)+(f1)/lambda*(1/m4-1/m3-m4)+(f1)/m4+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/m3+f1/
          1/m4*exp(-m4*0)+1/m3*exp(-taul*m3))+f/lambda*(exp(-taul*m4)-exp(-taul*m3)))
          T2=Tltaul+Yl-Pl/sigmal;
          Xtaul=Tltaul-T2;
          A3=((P2/sigmal-Xtaul)*ml+m4*Tltaul)/(m4-m3);
          A4=Tltaul-A3;
          X=0;
          X1=0; tau=0;
          N\Box = 0; i=1;
          while tau<=600
                                        F=1/C1*(m2+beta*m1)*P1+g*5*cos(W*tau);
                                        Fl=-g*5*W*sin(W*tau); if
                              tau<=taul
                                       X=P1/sigmal-1/m1*{-m3*A1*exp(-m3*tau)}-
          m4*A2*exp(-m4*tau) +F1/lambda* (l/m4-3-/m3-1/m4*exp (-m4*tau) +1/m3*exp (-m3*tau) )
          +F/lambda* (exp (-m4 *tau) -exp (-m3*tail) ) );
                                        Y=1/ml*(-m3*Al*exp(-m3*tau)-m4*A2*exp(-m3*tau)
          m4*tau)+FI/lambda*(1/m4-1/m3 1/m4*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)+1/m3*exp(-m4*tau)
          m3*tau))+F/lambda*(exp(-m4*tau)-exp(-m3*tau)));
                                        T1=A1*exp(-tau*m3)+A2*exp(-tau*m4)+F/lambda*(1/m4-1/m4 *exp{-
          tau*m4)+1/m3*exp(-tau*m3)-1/m3);
                                        T2=T1+Y-Pl/sigmal;
                                        NU=1/sigmal*(1-C1/P1*m1*Y); else
                                        X=P2/sigmal-1/ml*(\sim m3*A3*exp(-m3*(tau-taul)).-m4*A4*exp(-m3*(tau-taul))
          m4*(tau- taul))+FI/lambda*(1/m4-1/m3-1/m4 *exp(-m4*(tau-
          taul))+1/m3*exp(-m3*(tau-taul)))+<math>F/lambda*(exp(-m4*(tau-taul))-
          exp(-m3*(tau-taul))));
                                        Y=1/ml*(-m3*A3*exp(-m3*(tau-taul))-m4 *A4 *exp(-m4 *(tau-
```

```
taul) )+FI/lambda*(1/T4-1/m3-1/m4 *exp(-m4*(tau-taul))+1/m3*exp(-
m3*(tau-taul)))+F/lambda*(exp(-m4*(tau-taul))-exp(-m3*(tau-taul)))
taul))));
                                   Tl=A3*exp(-(tau-taul)*m3)+A4*exp(-(tau-
taul)*m4)+F/lambda*(1/m4-1/m4*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(tau-tau-taul)*m4)+1/m3*exp(-(t
 taul)*m3)-1/m3);
                                  T2=T1+Y-P2/sigmal;
                                  NU=1/sigmal*(1-C1/P2*ml*Y);
                     Tc(i) = 5*cos(W*tau);
                     pogr(i) = sqrt((a+b*X^A2+c*Y^A2)/((X
                     +Y)^{A}2)); x(i)=X; y(i)=Y;
                     XI(i)=T1;
                     X2(i)=T2; nu(i)=NU; f (i) =F;
t(i)=tau; tau=tau+l; i=i+l; end
 subplot(3,2,1); plot(t,x); subplot(3,2,3); plot(t,y);
 subplot(3,2,5); plot\{t,Tc,t,XI,t,X2\}; subplot(3,2,2); plot(t,nu);
 subplot(3,2,4); plot(t,pogr);
```

## 5.6 Расчет и выбор основных конструктивных параметров ПТП

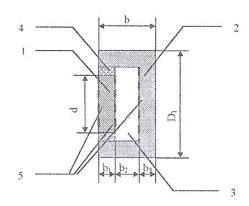


Рисунок 9 – Конструктивная схема ПТП:

1- чувствительный элемент;

3-зазор, заполненный сухим воздухом;

4-изоляционные прокладки из огнеупорного материала,

$$\lambda = 0.93 \frac{BT}{M \cdot K}$$
;

5-тонкопленочные термометры сопротивления (3 шт.).

Выберем следующие размеры элементов из таблицы 3.

Таблица 3

$D_1$ , mm	d, мм	$b_1$ , мм	$b_2$ , мм	$b_3$ , мм
21	16	0.5	2.5	3.5

Общая толщина «b» будет равна:

$$b = b_1 + b_2 + b_3 = 6.5 \text{ MM}$$

I. Найдем площадь поверхности и объем корпуса  $S_2$  и  $V_2$ , площадь поверхности и объем чувствительного элемента  $S_1$  и  $V_1$  соответственно.

$$S_2 = \pi D_1 \mathbf{b} + \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi D_1 \left(\mathbf{b} + \frac{D_1}{4}\right) - \pi \frac{d^2}{4} = \pi \cdot 2.1 \cdot 10^{-2} \mathbf{m}$$

$$(6.5 \cdot 10^{-3} \mathbf{m} + \frac{2.1 \cdot 10^{-2} \mathbf{m}}{4}) - \pi \left(\frac{1.6 \cdot 10^{-2}}{4}\right)^2 = 5.74 \cdot 10^{-4} \mathbf{m}^2,$$

$$V_2 = \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \mathbf{b} - \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 (b_1 + b_2) = \pi \left(\frac{2.1 \cdot 10^{-2} \mathbf{m}}{2}\right)^2 \cdot 6.5 \cdot 10^{-3} \mathbf{m} - \pi$$

$$\cdot \left(\frac{1.6 \cdot 10^{-2} \mathbf{m}}{2}\right)^2 \cdot (0.5 \cdot 10^{-3} \mathbf{m} + 2.5 \cdot 10^{-3} \mathbf{m}) = 1.65 \cdot 10^{-6} \mathbf{m}^3,$$

$$S_1 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \left(\frac{1.6 \cdot 10^{-2} \mathbf{m}}{2}\right)^2 = 2.01 \cdot 10^{-4} \mathbf{m}^2,$$

$$V_1 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 b_1 = \pi \left(\frac{1.6 \cdot 10^{-2} \mathbf{m}}{2}\right)^2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \mathbf{m} = 1.01 \cdot 10^{-7} \mathbf{m}^3.$$

II. Определим коэффициент теплопередачи K в зазоре между чувствительным элементом и корпусом.

Примем степень черноты внутренних поверхностей корпуса и чувствительного элемента  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.9$ . Тогда приведенный коэффициент черноты  $\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = 0.81$ .

Угловой коэффициент равен единице.

Примем P = 1.5 Вт. При  $t_2 = 20^{\circ}C = \text{const}$ , будем задавать  $t_1$ .

1) Пусть  $t_1 = 50$  °C = 323K,  $t_1 - t_2 = 30$  K,  $T_1$  и  $T_2$  соответствующие абсолютные температуры.

абсолютные температуры. 
$$f(t_1,t_2) = 5.67 \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{t_1 - t_2} = \frac{\left(\frac{323 \, K}{100}\right)^4 - \left(\frac{293 \, K}{100}\right)^4}{30 \, K} = 6.64 \frac{\text{BT}}{\text{м}^2 K}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением  $K_n$ :

$$K_{\pi} = \varepsilon \cdot 1 \cdot f(t_1, t_2) = 0.81 \cdot 1 \cdot 6.64 \frac{BT}{M^2 K} = 5.4 \frac{BT}{M^2 K}.$$

Коэффициент теплоотдачи теплопроводностью в воздушном зазоре  $K_{\rm T}$ :

 $K_{\mathrm{T}}=\frac{\lambda_{\mathrm{B}}|\mathrm{t=35^{\circ}C}}{b_{2}}=\frac{2.72\cdot10^{-2}\frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{M}\cdot K}}{2.5\cdot10^{-3}\,\mathrm{M}}=10.9\frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{M}^{2}\mathit{K}},~\lambda_{\mathrm{B}}$  — теплопроводность воздуха в зазоре.

Суммарный коэффициент теплоотдачи (считаем, что конвекции нет):

$$K = K_{\pi} + K_{\tau} = 5.4 \frac{B_{T}}{M^{2}K} + 10.9 \frac{B_{T}}{M^{2}K} = 16.3 \frac{B_{T}}{M^{2}K},$$

$$t_{1} = t_{2} + \frac{P}{k \cdot S_{1}} = 20 + \frac{16.26 \frac{B_{T}}{M^{2}K} \cdot 2.01 \cdot 10^{-4} M^{2}}{16.26 \frac{B_{T}}{M^{2}K} \cdot 2.01 \cdot 10^{-4} M^{2}} = 20 + 460 = 480^{\circ}C.$$

$$2) t_{1} = 480^{\circ}C = 753K, t_{1} - t_{2} = 460K,$$

$$f(t_{1}, t_{2}) = \frac{(7.53)^{4} - (2.93)^{4}}{480} = 37.1 \frac{B_{T}}{M^{2}K},$$

$$K_{\pi} = 0.81 \cdot 1 \cdot 37.11 \frac{B_{T}}{M^{2}K} = 30.1 \frac{B_{T}}{M^{2}K},$$

$$K_{T} = \frac{\lambda_{B}|t = 250^{\circ}C}{b_{2}} = \frac{4.06 \cdot 10^{-2} \frac{B_{T}}{M^{2}K}}{2.5 \cdot 10^{-3} M} = 16.2 \frac{B_{T}}{M^{2}K},$$

$$K = K_{\pi} + K_{\tau} = 30.06 \frac{B_{T}}{M^{2}K} + 16.24 \frac{B_{T}}{M^{2}K} = 46.3 \frac{B_{T}}{M^{2}K},$$

$$t_{1} = t_{2} + \frac{P}{k \cdot S_{1}} = 20 + \frac{1.5 B_{T}}{46.3 \frac{B_{T}}{M^{2}K} \cdot 2.01 \cdot 10^{-4} M^{2}} = 20 + 161 = 181^{\circ}C.$$

$$3) t_{1} = 181^{\circ}C = 454K, t_{1} - t_{2} = 161K.$$

$$f(t_1, t_2) = \frac{(4.54)^4 - (2.93)^4}{161} = 12.37 \frac{BT}{M^2 K},$$

$$K_{\pi} = 0.81 \cdot 1 \cdot 12.37 \frac{BT}{M^2 K} = 10 \frac{BT}{M^2 K},$$

$$K_{T} = \frac{\lambda_{B} | t = 250^{\circ} C}{b_2} = \frac{3.06 \cdot 10^{-2} \frac{BT}{M \cdot K}}{2.5 \cdot 10^{-3} M} = 12.2 \frac{BT}{M^2 K},$$

$$K = K_{\pi} + K_{T} = 10 \frac{BT}{M^2 K} + 12.2 \frac{BT}{M^2 K} = 22.2 \frac{BT}{M^2 K},$$

$$t_1 = t_2 + \frac{P}{k \cdot S_1} = 20 + \frac{1.5 BT}{22.26 \frac{BT}{M^2 K} \cdot 2.01 \cdot 10^{-4} M^2} = 20 + 335 = 355^{\circ} C.$$

Результаты последующих итераций сведены в таблицу 4.

Таблица 4

N итер	$t_1, {}^{\circ}C$	$(t_1-t_2), K$	$f(t_1, t_2), \frac{\text{BT}}{\text{M}^2 K}$	$K_{\pi}, \frac{\mathrm{Br}}{\mathrm{m}^2 K}$	$\lambda_{\mathrm{B}}, 10^{-2}, \frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{M} \cdot K}$	$K_{\mathrm{T}}, \frac{\mathrm{B}_{\mathrm{T}}}{\mathrm{m}^2 K}$	$K, \frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{M}^2 K}$
•					м·К		
4	355	335	25.08	20.3	3.6	14.5	34.8
5	234	214	15.56	12.6	3.3	13.0	25.6
6	311	291	21.23	17.2	3.5	14.1	31.3
7	258	238	17.18	13.9	3.4	13.5	27.4
8	292	272	19.70	16.0	3.3	13.2	29.2
9	276	256	18.40	15.0	3.3	13.2	28.2
10	285	265	19.17	15.5	3.3	13.2	28.7
11	280	260	18.79	15.2	3.3	13.2	28.4
12	283	263	19.01	15.4	3.3	13.2	28.6
13	281	261	18.86	15.3	3.3	13.2	28.5

Отсюда получаем, что  $K = 28.5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 K}$  при  $t_1 = 282 \, ^{\circ} C$ .

III. Проверим выполнение условия отсутствия конвекции в зазоре между чувствительным элементом и корпусом.

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{282^{\circ}C + 20^{\circ}C}{2} = 151^{\circ}C.$$

Все свойства воздуха примем при температуре  $t=151^{\circ}C$ .

Определим критерий Грасгофа Gr и Прандтля Pr.

Gr = 
$$g\beta \cdot \frac{b_2^3}{v^2} (t_1 - t_2) = 10 \frac{M}{c^2} \cdot \frac{1}{(151 + 273)K} \cdot \frac{(2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^3}{(29.84 \cdot 10^{-6} \frac{M^2}{c})^2} 262K = 108.43$$

 $Gr \cdot Pr = 108.4 \cdot 0.71 = 76.9.$ 

Как известно, если произведение Gr·Pr<700, то конвекция отсутствует.

IV. Тепловая проводимость  $\sigma_1$  от чувствительного элемента к корпусу и от корпуса к среде  $\sigma_2$ :

$$\sigma_1 = k \cdot S_1 = 28.5 \frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{M}^2 K} \cdot 2.01 \cdot 10^{-4} \cdot \mathrm{M}^2 = 5.73 \cdot 10^{-3} \frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{K}}.$$
 Примем  $k_2 = 15 \frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{M}^2 K}$ , тогда  $\sigma_2 = 15 \cdot 5.74 \cdot 10^{-4} = 8.61 \cdot 10^{-3} \frac{\mathrm{BT}}{\mathrm{K}}.$ 

Определим теплоемкости чувствительного элемента и корпуса.

$$C_1 = c_{\scriptscriptstyle M} \cdot \rho_{\scriptscriptstyle M} \cdot V_1 = 3.9 \cdot 10^2 \, \cdot 0.88 \cdot 10^4 \, \cdot 1.01 \cdot 10^{-7} \, = 0.35 \, \frac{\mbox{Дж}}{\mbox{\scriptsize K}} \; ,$$

$$C_2 = c_{\text{M}} \cdot \rho_{\text{M}} \cdot V_2 = 3.9 \cdot 10^2 \cdot 0.88 \cdot 10^4 \cdot 1.65 \cdot 10^{-6} = 5.66 \, \frac{\text{Дж}}{\text{K}} \,,$$

 $ho_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}$  и  $c_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}$  – плотность и удельная теплоемкость красной меди соответственно.

$$m_1 = \frac{\sigma_1}{C_1} = \frac{5.73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{BT}}{\text{K}}}{0.35 \frac{\text{A} \times \text{K}}{\text{K}}} = 16.4 \cdot 10^{-3} c^{-1},$$

$$m_2 = \frac{\sigma_2}{c_2} = \frac{8.61 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Bt}}{\text{K}}}{5.66 \frac{\text{A} \times \text{K}}{\text{K}}} = 1.52 \cdot 10^{-3} c^{-1}.$$

# 5.7 Расчет параметров теплового режима, погрешности определения теплового потока и чувствительности ПТП

Вычисленные значения постоянных указаны в таблице 5, постоянных множителей – в таблице 6, постоянных интегрирования в таблице 7.

Таблица 5

β	$g, c^{-2}$	$e, c^{-1}$	$\lambda, c^{-1}$	$m_3, c^{-1}$	$m_4, c^{-1}$
0.0062	$2.5 \cdot 10^{-5}$	0.019	0.016	0.018	$1.4 \cdot 10^{-3}$

Таблица 6

$D_1, \frac{\kappa}{c}$	$D_2$ , K	$D_3$ , K	$D_4, \frac{\kappa}{c}$
0.256	1.77	21.77	0.706

Таблица 7

$A_1$ , K	$A_2$ , K	$A_3$ , K	$A_4$ , K
-89.0	89.0	-193.0	298.1

Графики зависимостей  $X = X(\tau)$ ,  $Y = Y(\tau)$ ,  $\eta = \eta(\tau)$  и  $\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta P}{P}$  ( $\tau$ ) представлены в приложении. При вычислении погрешности предполагается, что приборы для измерения температуры имеют класс точности 1,0. Тогда коэффициенты: a = 0.7,  $b = 2.25 \cdot 10^{-4}$ ,  $c = 4.43 \cdot 10^{-3}$ .

## 5.8 Получение тонких пленок фотолитографическим методом

Для получения тонких пленок заданной конфигурации используют фотолитографический метод [8,9].

Вначале тонкие пленка металла (в нашем случае хром, и платина) напылют на всю поверхность подложки. Далее необходимо получить на ней

определенный рисунок (в данном случае в виде «змейки»), т.е. удалить ненужные участки. Для этого выполняют следующие действия:

- 1) изготавливают фотошаблон, нанесенный на прозрачную для света основу;
- 2) на поверхность тонкой пленки наносят слой фоторезиста полимерного материала, который изменяет свою растворимость под действием света. Толщина такого слоя несколько микрон;
- 3) пленку, покрытую фоторезистом, освещают через фотошаблон определенное время. При этом становятся защищенными участки покрытые нерастворимым полимером, а оставшиеся не защищены;
- 4) не защищенные участки вытравливают различными химическими соединениями. Нерастворимая полимерная пленка защищает те участки, которые не нужно удалять;
- 5) удаляют остатки полимера.

## 5.9 Измерительная схема

Измерение температуры осуществляется тремя тонкопленочными платиновыми термометрами сопротивления, конструкция которых показана на рисунке.

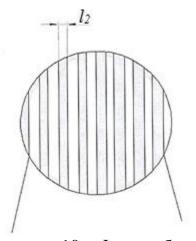


Рисунок 10 – Фотошаблон чувствительного элемента

Тонкопленочные термометры сопротивления получают фотолитографическим методом.

Выберем размеры полос термометра сопротивления и их количество.

 $l_{01} = 1.09 \, \cdot \, 10^{-2}$ м — длина полосы термометра сопротивления,

 $l_1 = 0.1 \text{ мм} = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \text{ширина полосы,}$ 

 $\bar{l_2} = 0.1 \text{ мм} = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \text{расстояние между полосами,}$ 

 $N_1 = 55, \ N_2 = N_1 - 1 = 54$  — количество полос и промежутков между ними соответственно,

$$l_{02} = l_1 \cdot N_1 + l_2 \cdot N_2 = 0.1 \cdot 55 + 0.1 \cdot 54 = 10.9$$
 мм =  $1.09$  ·  $10^{-2}$  м,

h = 7 мкм =  $7 \cdot 10^{-6}$  м - толщина тонкой пленки,

суммарная длина термометра сопротивления l:

$$l = l_{01} \cdot N_1 + l_2 \cdot N_2 = 1.09 \cdot 10^{-2} \text{m} \cdot 55 + 0.1 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot 54 = 10.9 = 6.05 \cdot 10^{-1} \text{ m}$$

Сопротивление термометра  $R_0$  при  $0^{\circ}\mathcal{C}$  равно:

$$R_0 = \frac{\rho \cdot l}{s} = \frac{\rho \cdot l}{h \cdot l_1} = \frac{0.11 \cdot 10^{-6} \,\mathrm{OM \cdot M} \cdot 6.05 \cdot 10^{-1} \,\mathrm{M}}{7 \cdot 10^{-6} \,\mathrm{M} \cdot 0.1 \cdot 10^{-3} \,\mathrm{M}} = 95 \,\mathrm{OM}$$
, где  $\rho$  – удельное сопротивление платины,  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

Это значение может не соответствовать реальному, так как сложно изготовить пленку с заданными характеристиками. Поэтому при проведении измерений нужно использовать измеренное значение  $R_0$ .

Для подключения термометра сопротивления в электрическую схему предусматривают четыре металлических (медных) вывода, по два с каждой стороны – один токовый, один потенциальный.

Найдем максимально допустимый ток  $I_{max}$  через термометр сопротивления из условия, что в нем выделяемая мощность не превышала значение  $P_m = 0.5\% P_{min} = 0.005 P_1$ .

Сопротивление платины при повышении температуры от  $0^{\circ}C$  до  $300^{\circ}C$  увеличивается не более чем в 2 раза и тогда можно записать:

$$P_m = I_{max}^2(2R_0), I_{max} = \sqrt{\frac{P_m}{2R_0}} = \sqrt{\frac{0.005 \cdot 0.5 \text{BT}}{2.95 \text{ OM}}} = 3.63 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 3.63 \text{ MA}.$$

Электрическая схема измерения сопротивления показана на рисунке 11.

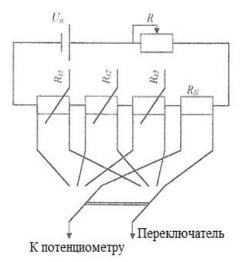


Рисунок 11 – Измерительная электрическая схема

Обычно используют четырехпроводную схему включения термометра сопротивления. Для питания измерительной цепи выбирают источник стабилизированного питания постоянного тока (ИПС). Его выходное напряжение  $U_n=5$ В практически постоянно и не зависит от сопротивления.

 $R_{t1}, R_{t2}, R_{t3}$  — термометры сопротивления, установленные на внешней и внутренней поверхностях чувствительного элемента и корпуса.

Найдем сопротивление резистора R, необходимое для обеспечения допустимого тока:

$$U_n = I(R + R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_N),$$

где  $R_N = 51 \, \text{Ом} - \text{образцовая катушка из манганина (сопротивление которой практически не меняется с изменением температуры).$ 

$$R \ge \frac{U_n}{I_{max}} - 3R_0 - R_N = \frac{5}{3.63 \cdot 10^{-3}} - 3 \cdot 95 - 51 = 1041 \text{ Om}.$$

Принимаем  $R=1.1~{\rm кOm}=1100~{\rm Om}.$  Тогда максимальный ток в измерительной цепи будет равен:

$$I = \frac{U_n}{R + 3R_0 + R_N} = \frac{5}{1100 + 3 \cdot 95 + 51} = 3.5 \text{ MA}.$$

При этом падение напряжения на резисторе  $R_0$  составит  $U_{R_0} = IR_0 = 3.5 \cdot 95 = 3.33 \cdot 10^{-1} = 333$  мВ.

Падение напряжения на резисторах измеряется автоматическим показывающим и самопишущим потенциометром типа, в который встроен переключатель на 6 каналов. Показания термометров записываются на диаграммную ленту. Класс точности потенциометра равен 0.5.

Сопротивления резисторов  $R_t$  определяют по формуле:

$$R_t = R_N \frac{U_{R_{t1}}}{U_{R_N}},$$

где  $U_{R_{t1}}$  и  $U_{R_N}$  — падения напряжения на резисторах  $R_t$  и образцовом резисторе  $R_N$  соответственно. По значениям  $R_t$  с помощью градуировки платинового термометра сопротивления определяют температуры  $t_1$  и  $t_2$ . Также находят  $\frac{dt_1}{d\tau}$ . Равенство  $R_{t1}=R_{t2}$  позволяет судить о равномерности температурного поля чувствительного элемента.

## 5.10 Источники погрешности измерения теплового потока

Перечислим источники погрешности.

## Методические погрешности:

- неравномерность температурного поля по ширине чувствительного элемента, обусловленная его конечной теплопроводностью;
- утечки теплового потока через изоляционные прокладки в корпус, минуя воздушный зазор;
- зависимость теплофизических свойств материалов ПТП от температуры (теплоемкость, тепловая проводимость);
- выделение теплоты при прохождении тока через тонкопленочные терморезисторы;
- отток теплоты по электрическим проводам;
- отсутствие теплоемкости воздушного зазора;
- отсутствие учета теплопроводности и теплоемкости термометра сопротивления.

# Инструментальные погрешности:

- повреждения тонкопленочных термометров сопротивления и, следовательно, изменение их свойств в процессе проведения опыта;
- нестабильность источника питания, изменение напряжения питания;
- погрешность измерения напряжения потенциометром (зависит от класса точности);
- изменение сопротивления образцовой катушки или неравенство его номинальному значению.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

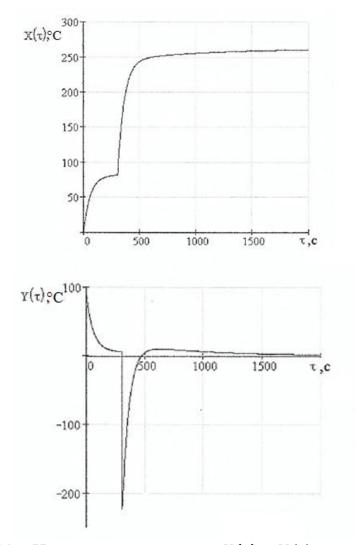


Рисунок 12 — Изменение параметров  $X(\tau)$  и  $Y(\tau)$ , характеризующих тепловой режим ПТП

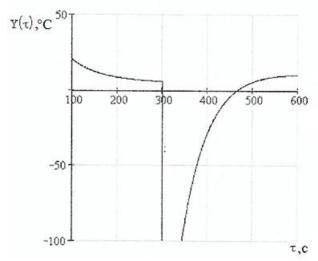


Рисунок 13 – Параметры  $Y(\tau)$ , °С в увеличенном масштабе

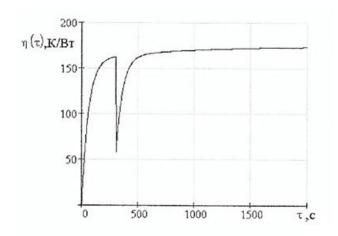


Рисунок 14 – Изменение чувствительности во времени

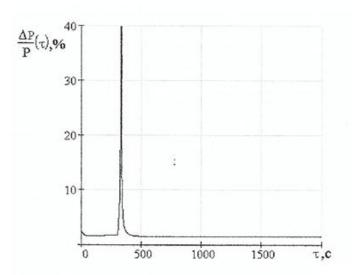


Рисунок 15 — Погрешность определения теплового потока

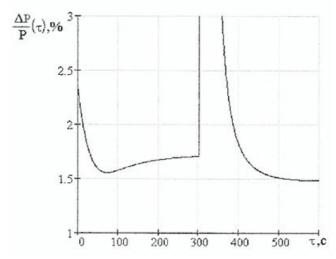


Рисунок 16 – Погрешность определения теплового потока в увеличенном масштабе

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В. Об измерении нестационарных тепловых потоков с помощью тепломеров. // ИФЖ. 1975. №15. Т.19. С. 814–820.
- 2. Пилипенко Н.В., Лукьянов Г.Н. Проектирование приборов и устройств для тепловых измерений. // Л., изд. ЛИТМО. 1984. 85 с.
- 3. *Дульнев* Г.Н. *Тихонов* С.В. Об одном приближенном методе решения задач теплопроводности. // ИФЖ. 1979. №2. Т.36. С. 357–363.
- 4. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В. Об измерении нестационарных тепловых потоков различной длительности действия. // Изв. Вузов СССР. Приборостроение, 1977. №9. Т.20.
- 5. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Кузьмин В.А. Измерение нестационарных потоков датчиками «вспомогательная стенка». // ИФЖ. 1979. №1. Т. 37. С. 99–103.
- 6. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Кузьмин В.А. Об инерционности измерений с помощью тепломеров «вспомогательная стенка». // ИФЖ. 1980. №2. Т.39. С. 298–305.
- 7. *Пилипенко Н. В.* Методы и приборы нестационарной теплометрии на основе решения обратных задач теплопроводности // Учебное пособие. СПбНИУ ИТМО, 2011 г., 180 с.
- 8. Аметистов Е.В., Григорьев В. А., Емцев Б.Т. и др.; Под общ. ред. Еригорьева В. А. и Зорина В. М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент // Справочник. М: Энершиздат, 1982. 512 с.
- 9. Под ред. Майссела Л., Глэнга Р. Пер. с англ. Под ред. Елинсона М. И., Смолко Е. Е. Технология тонких пленок // Справочник. М, «Сов. радио». 1977. Т.1. 664 с.
- 10. Пилипенко Н.В. Приборы и методы нестационарной теплометрии. // Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2016 г., 82 с.
- 11. *Пилипенко Н.В.* Неопределенность измерения нестационарной температуры поверхности массивных тел. // Известия вузов. Приборостроение, 2016 Т. 59, №9, с. 767 772.
- 12. *Pilipenko N*. Parametrical Identification of Differential-difference Heat Transfer Models in Non-stationary Thermal Measurements // Advances in heat transfer: Proceedings of the Baltic heat transfer conference, 2007. Vol. 2. P. 598–602.



**Миссия университета** — генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

# КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Начало теплофизической научной школы в университете было положено организацией в 1938 году кафедры приборов теплосилового контроля, заведующим которой стал профессор, доктор технических наук Г.М.Кондратьев (1887-1958). В 1954 году вышла в свет его монография «Регулярный тепловой режим». Изложенные в ней идеи впоследствии были успешно применены в различных областях, например, при создании нового типа приборов для исследования теплофизических свойств веществ и параметров теплообмена. В начале 50-х годов началась разработка методов теплового расчета радиоэлектронных устройств, а в дальнейшем и других приборов - оптических, оптикоэлектронных, гироскопических. Серия этих работ была выполнена под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора, доктора технических наук Дульнева Г.Н., возглавлявшего кафедру с 1958 года по 1995 год. В результате был создан новый математический аппарат анализа теплового режима сложных технических систем и приборов, разработаны методы проектирования приборов с заданным тепловым режимом. Комплекс этих работ признается и в нашей стране, и за рубежом как новое научное направление в теплофизике. Кафедра приборов теплосилового контроля за свою многолетнюю историю не раз изменяла свое название. Так, с 1947 года она именовалась кафедрой тепловых и контрольно-измерительных приборов, с 1965 года – кафедрой теплофизики, с 1991 года – кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга. Однако основным направлением ее научной и педагогической деятельности оставалось применение учения о теплообмене в физике и приборостроении. С 1995 года заведующим кафедрой является профессор, доктор технических наук А.В.Шарков.

Многолетняя деятельность кафедры привела к созданию научной и педагогической школы теплофизиков-приборостроителей, из которой вышли доктора наук А.Н.Гордов, А.И.Лазарев, Г.Н.Дульнев, Б.Н.Олейник, Е.С.Платунов, Н.А.Ярышев, В.Н.Васильев, Ю.П.Заричняк, А.В.Шарков, Н.В. Пилипенко и другие ученые-теплофизики.

Сотрудники кафедры принимали участие в разработке нового поколения вычислительных машин, исследовании термооптических явлений в космических комплексах, в реализации международных программ космических исследований. Так, предложенные на кафедре методы были использованы при проектировании

телевизионных камер космических аппаратов в проекте «ВЕГА», при создании лазерного устройства в проекте «ФОБОС». Возможности разработанных на кафедре методов математического моделирования тепловых процессов в сложных системах и технике теплофизического эксперимента были продемонстрированы при анализе процессов теплообмена в организме человека; при создании электрогенераторов, работа которых использует явления сверхпроводимости; при создании оригинальных образцов оборонной, медицинской и измерительной техники.

В рамках традиционных направлений развиваются работы по созданию методов и приборов для измерения температуры, тепловых потоков, теплофизических свойств веществ, исследования коэффициентов переноса в неоднородных средах, а также работы по созданию принципиально новых композиционных материалов — особо прочных, термостойких, теплоизоляционных и т.д.

В последние годы наряду с традиционными научными направлениями появился ряд новых направлений, связанных с экологическим мониторингом, энергосберегающими технологиями, биологией и медицинским теплофизическим приборостроением. На базе ведущихся на кафедре научных исследований осуществляется обучение молодых специалистов, первый выпуск которых по специальности «Теплофизика» состоялся в 1969 году. В 1998 году кафедра получила также право обучения по новому для нашего университета направлению – «Техническая физика». В июне 1998 года состоялся первый выпуск бакалавров, а в 2000 году – магистров.

На кафедре ведется подготовка научных кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по специальностям 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и 05.11.01 «Приборы и методы измерения тепловых величин». Сейчас коллектив кафедры продолжает развитие как ставших уже традиционными научных направлений и направлений подготовки специалистов, так и ведет поиск в новых областях науки и техники.

### Николай Васильевич Пилипенко

## ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЁМНИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

#### Учебное пособие

Н.Ф. Гусарова

В авторской редакции Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО Зав. РИО Подписано к печати Заказ № Тираж Отпечатано на ризографе