

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Интерференция тепловых волн, теория, эксперимент, перспективы  
применения**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

направления 210100 «Электроника и нано-электроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Волкова Ивана Юрьевича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

А.А. Сагайдачный

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов, 2017

## **Введение**

В последнее время можно отметить увеличивающийся интерес к теме определения теплофизических параметров материалов различной природы с использованием тепловых волн. Перспективным направлением является использование тепловых волн для определения тепловых характеристик тонких пленок и фольг.

Зондирующие тепловые волны используются в тепловой дефектоскопии материалов, для выявления дефектов в приповерхностной области. Также тепловые волны рассматриваются в задачах о термоупругих волнах, возникающих в многослойных структурах и тонких фольгах. Поэтому представляется актуальным более глубокое изучение распространения температурных волн в различных средах, а также самой физики температурных колебаний и применения полученных результатов на практике.

### **Актуальность темы:**

Использование температурных волн и их физических свойств для разработки универсальных методов определения теплофизических характеристик материалов различной природы, а также для улучшения метода тепловой дефектоскопии материалов.

### **Цели и задачи работы:**

Цель исследования: изучение распространения температурных волн в различных средах и выявления основных закономерностей при распространении температурных волн, а также изучение физических явлений, связанных с температурной волной.

Для достижения поставленной цели в рамках работы были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ теоретических данных в рамках исследуемой темы;

2. Разработать экспериментальную установку, реализующую периодический нагрев, для создания тепловых волн в исследуемом образце;
3. Продумать методику постановки эксперимента;
4. Разработать методы обработки экспериментальных данных;
5. Сопоставить результаты проведенных экспериментов с теоретически предсказанными свойствами температурной волны.

Теоретическая база исследований сформирована публикациями, посвященными темам исследования физики распространения тепловых волн в конденсированных средах.

Структура и объем работы По своей структуре работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка используемых источников. Работа изложена на 40 страницах машинописного текста, содержит 26 рисунков и список литературы из 20 наименований.

#### Основное содержание работы

*Во введении* обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формулируется цель исследования и определяется научная новизна.

*В первой главе* рассматривается физика температурной волны и её математическое описание. По определению температурные волны – периодические изменения интенсивности температуры в среде, связанные с периодическими колебаниями плотности тепловых потоков, поступающих в среду.

Для того чтобы найти математическое соотношение, описывающее понятие температурной волны и её распространение в среде, решается дифференциальное уравнение параболического типа (1) с граничными условиями (2):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T(0, t) &= T_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \\ T(x, t) &= T_{\text{среды}}. \end{aligned} \quad (2)$$

В результате получаем, что в термически однородной, полубесконечной среде, распространение плоской температурной волны описывается соотношением (3):

$$T(x, t) = T_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \chi}} \cdot x} \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \chi}} \cdot x + \varphi_0\right) \quad (3)$$

Физический смысл решения заключается в следующем: если одна из сторон образца нагревается по гармоническому закону с некоторой амплитудой, а температура противоположной стороны постоянна и равна температуре среды, то колебания температуры любой точки образца (при условии, что он нагревается равномерно) также изменяется по гармоническому закону с периодом  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ .

Чтобы найти соотношение выражающее фазовую скорость распространения температурных возмущений в среде, дифференцируют аргумент гармонической функции (3):

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \chi}} \cdot x + \varphi_0\right) = \sqrt{2 \chi \omega} = 2 \sqrt{\frac{\pi \chi}{\tau}} \quad (4)$$

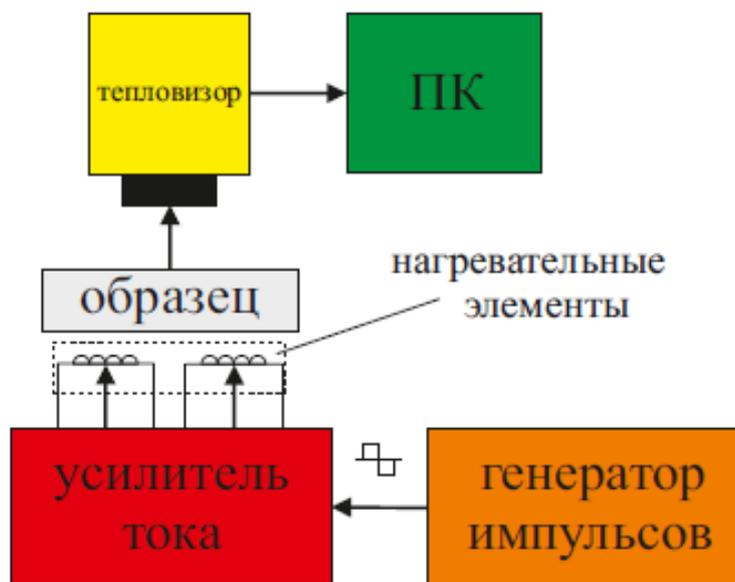
где:  $\tau$  – период колебаний температурной волны.

Согласно формуле (4), скорость температурной волны зависит от частоты, тем самым проявляется свойство дисперсии температурных волн.

*Во-второй главе* описываются этапы разработки и наладки установки периодического нагрева.

Общая схема экспериментальной установки с основными узлами показана на рисунке 1.

Генератор импульсов выполнен на основе микроконтроллера Atmega 8. Он задаёт колебания прямоугольной формы с необходимой частотой.

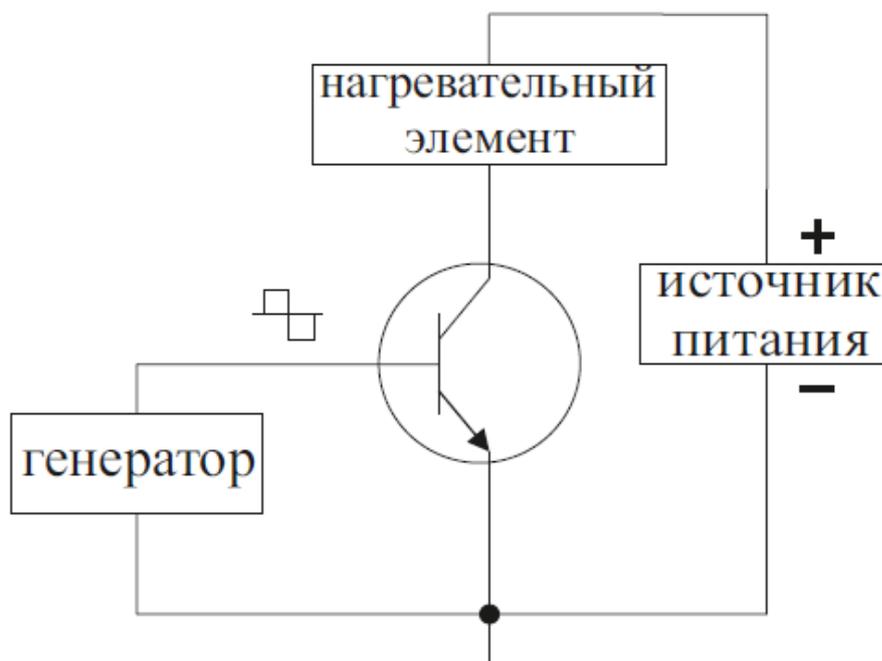


**Рисунок 1.** Общая схема экспериментальной установки

Сформированный сигнал далее поступает в усилитель тока, который выполнен в виде электронного ключа на основе кремниевого транзистора КТ829А. Данный транзистор имеет максимальный ток коллектора не более 10 А, обеспечивает высокое рабочее напряжение коллектор-эмиттер порядка 50 В и может работать на частотах до 4 МГц, что более чем достаточно. Электрическая схема усилителя тока показана на рисунке 2.

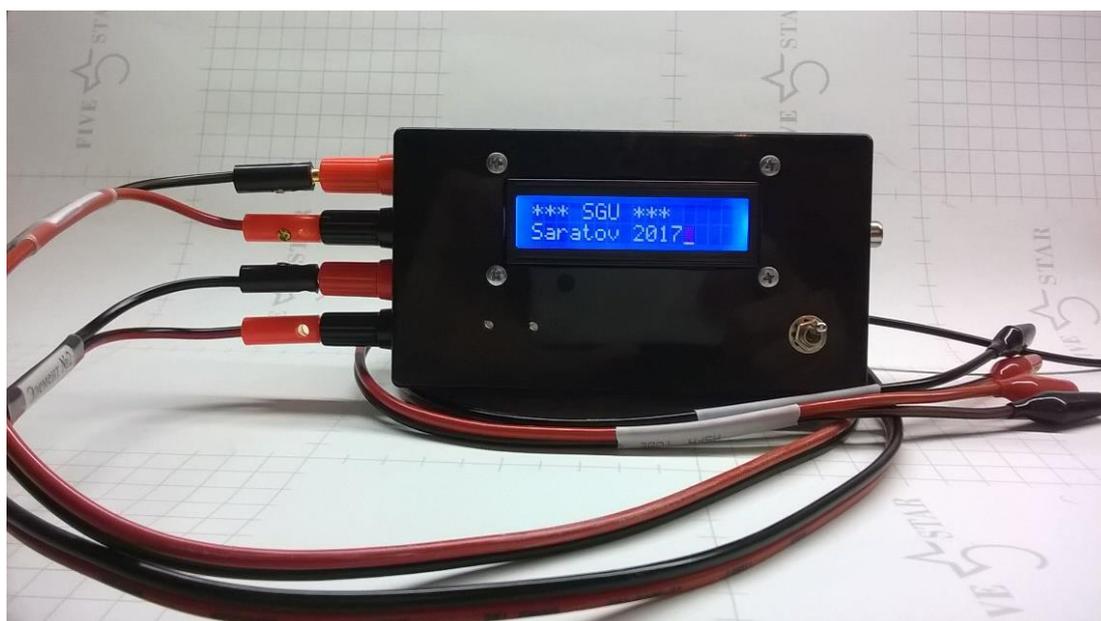
В качестве нагревательного элемента используется спираль из нихрома. Интенсивность нагрева спирали регулируется величиной проходящего через неё тока с помощью регулятора тока, встроенного в дополнительный источник питания для усилителя тока.

Температура верхней и нижней поверхности образца регистрировалась с помощью тепловизора ThermaCam SC 3000 шведской фирмы Flir Systems. Разрешение тепловизора по температуре составляет 0,02 °С. Запись термограмм и извлечение данных из них производились в программной среде ThermaCam ResearcherPro версии 2.8, которая прилагается к тепловизору.



**Рисунок 2.** Электрическая схема транзисторного ключа

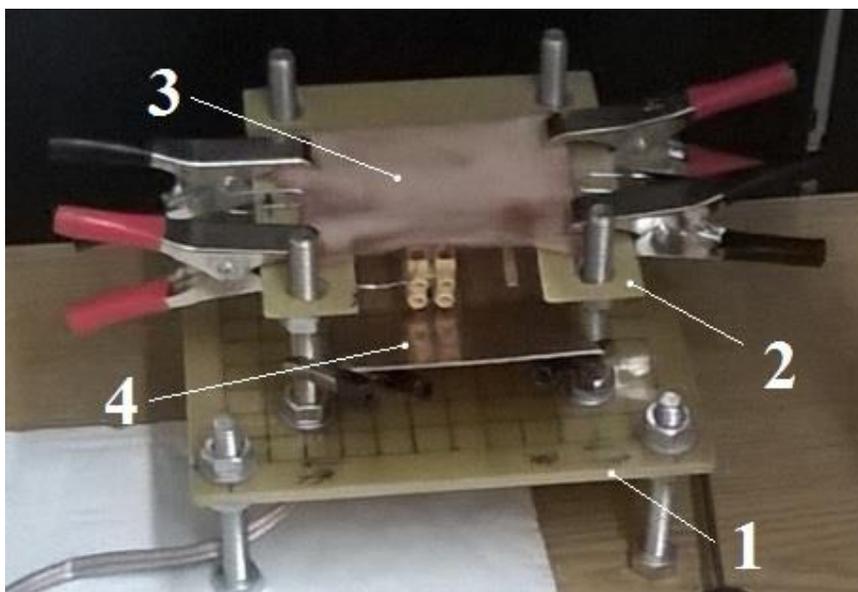
Монтаж радиоэлементов осуществлялся на макетных платах, выполненных на основе стеклотекстолита с односторонней металлизацией. Соединение элементов производилось с помощью кабеля МГТФ 0,3. Транзисторы выходных каскадов схемы крепились к небольшим радиаторам через термопасту. Внешний вид прибора показан на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Внешний вид генератора

В третьей главе проводятся исследования дисперсии температурных волн в пористых средах.

Основная идея эксперимента заключалась в нагреве одной из сторон образца тепловым потоком на различных частотах, тем самым модулируя температурную волну на поверхности с определенным периодом. Регистрируя одновременно температурные изменения на нагреваемой(нижней) и контрольной(верхней) поверхности можно определить время запаздывания температурной волны, а зная толщину образца, также найти и скорость волны. Фотография рабочего стенда и образца, размещенного на предметном столике показана на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Образец, размещенный на рабочем стенде  
1 – основание стенда, 2 – предметный столик, 3 – образец, 4 – ИК зеркало.

Для регистрации температурных колебаний на нижней стороне образца используется ИК зеркало в виде фольгированного стеклотекстолита. Стеклотекстолит располагался фольгированной стороной к камере тепловизора под определенным углом так, чтобы имелась возможность обзора нагреваемой нижней части образца.

Для каждой частоты периодического нагрева производилась съёмка длительностью 10 минут, с частотой 2 кадра в секунду в режиме высокого

подавления шумов матрицы. При данной частоте дискретизации точность определения периода колебаний температурной волны, а также времени запаздывания составляет  $\pm 0,5$  сек.

Экспериментальные данные колебаний температуры от времени для нижней и верхней поверхности образца обрабатывались в программе MathCad 15. Алгоритм обработки включал в себя Фурье фильтрацию экспериментального сигнала, для удаления высокочастотных составляющих, которые вносили существенные помехи, а также для выделения основной гармоники на которой производился нагрев.

В результате постановки эксперимента по периодическому нагреву образца в диапазоне частот 0,005 – 0,1 Гц удалось вычислить время запаздывания температурных колебаний верхней поверхности относительно нижней для каждой частоты. По известным значениям времени запаздывания была получена скорость температурной волны для каждой частоты, которая определялась по формуле (23):

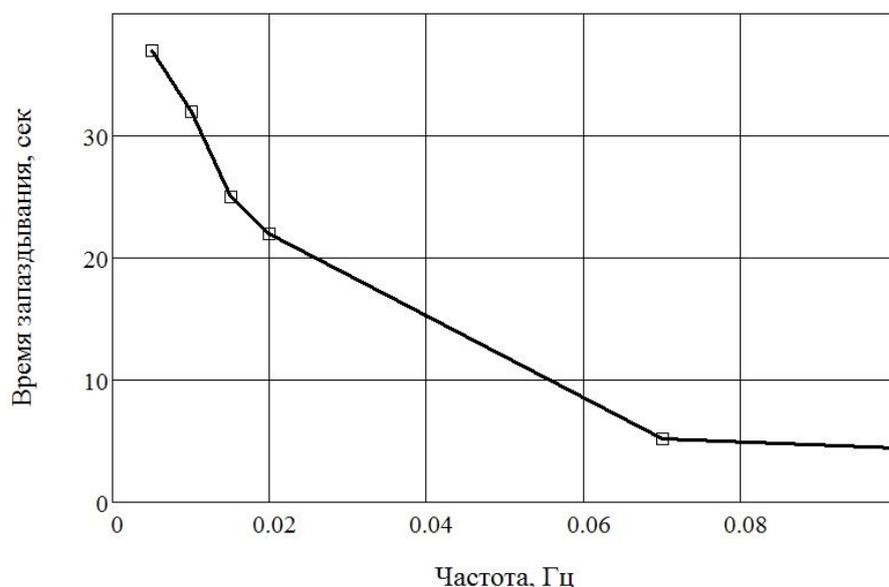
$$v = \frac{z}{t_{\text{зап}}} \quad (5)$$

где:  $v$  – скорость температурной волны (мм/сек);

$z$  – толщина образца (мм);

$t_{\text{зап}}$  – время запаздывания (сек).

Графически зависимость времени запаздывания от частоты показана на рисунке 5.

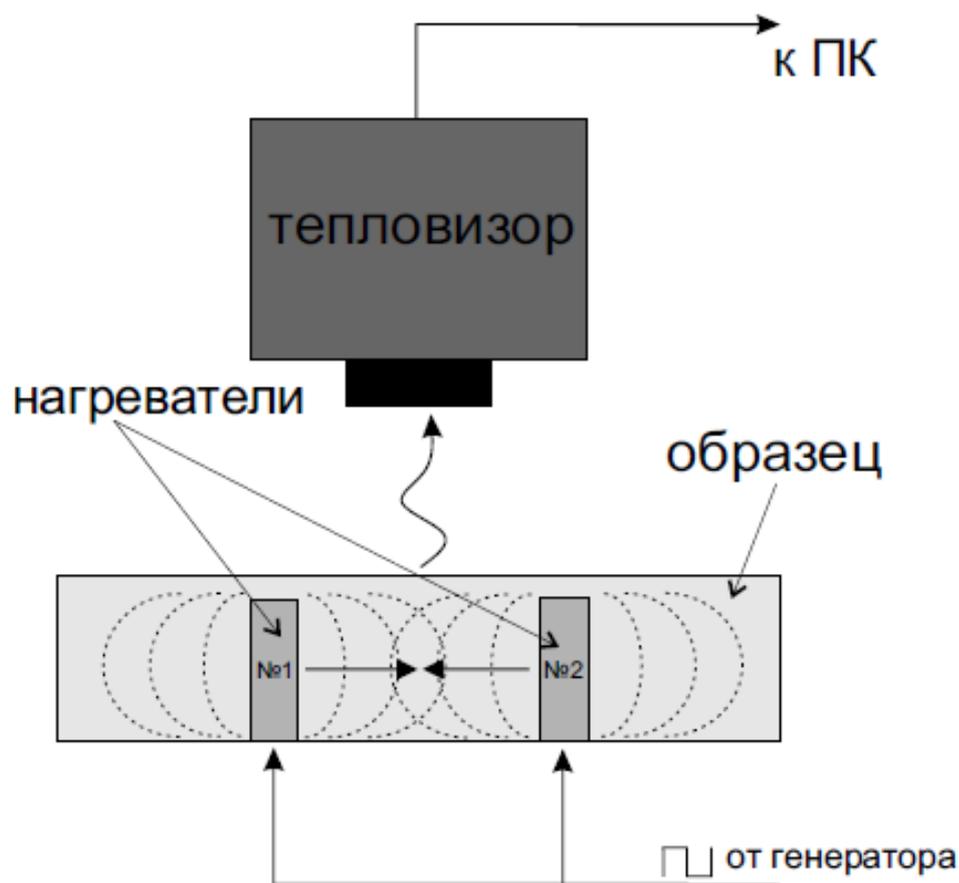


**Рисунок 5.** График зависимости времени от частоты колебаний плотности тепловых потоков, поступающих в среду.

*В четвёртой главе* проводятся исследования интерференции температурных волн в материале.

Чтобы создать условия для реализации возможности интерференции температурных волн в образце, была разработана следующая схема постановки эксперимента, представленная на рисунке 6.

В эксперименте используются два источника периодического нагрева, которые могут создавать в среде колебания теплового потока как в фазе (одновременный разогрев нагревательных элементов), так и в противофазе (попеременный разогрев) на различных частотах. Оба источника располагаются на нагреваемой (нижней) поверхности образца. Тепловой поток в образце, создаваемый каждым нагревателем движется от него во всех направлениях, в том числе и навстречу тепловому потоку от другого нагревательного элемента. Тем самым между нагревателями, где тепловые потоки от каждого движутся навстречу друг другу, создаётся область пространства в которой может возникнуть процесс интерференции температурных волн. Регистрация изменения температуры в пространстве между нагревателями на верхней стороне образца производится с помощью тепловизора.



**Рисунок 6.** Схема постановки эксперимента

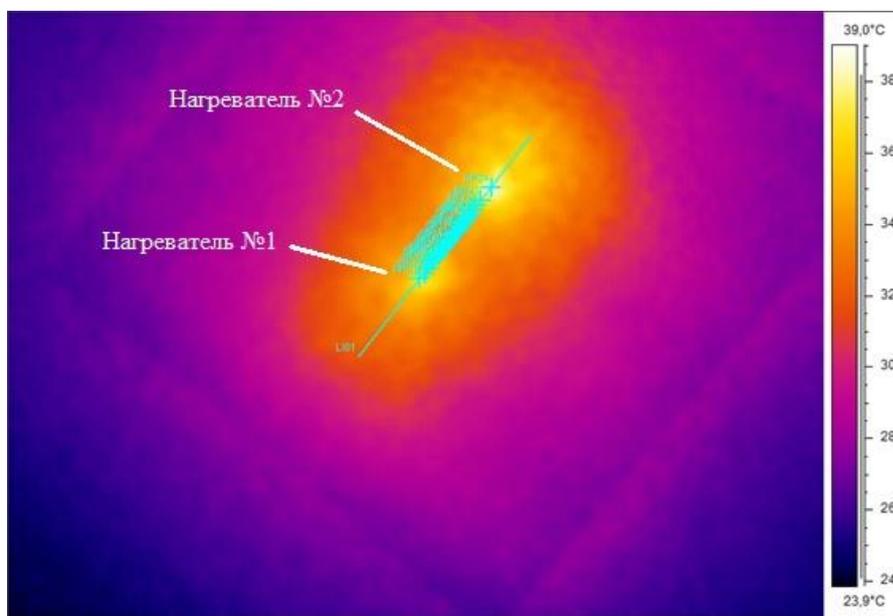
Эксперимент проводится в 2 этапа:

1. нагревательные элементы разогреваются одновременно с одинаковой частотой и амплитудой, тем самым создавая когерентные температурные волны в среде;
2. нагревательные элементы разогреваются по переменному с одной частотой и амплитудой, создавая одинаковые волны с разностью фаз  $180^\circ$ .

Расстояние между нагревательными элементами в данном эксперименте составляет 2 см. Основная частота нагрева 0,02 Гц. Длительность съёмки для каждого этапа эксперимента составляет 10 минут, с частотой 2 кадра в секунду в режиме высокого подавления шумов матрицы.

Для регистрации температуры в пространстве по прямой, проходящей через центры нагревательных элементов, выставляются специальные контрольные точки. Общее количество контрольных точек равно 24. Для каждой контрольной точки можно получить зависимость изменения

температуры с течением времени. Тем самым можно пронаблюдать изменение амплитуды и формы температурной волны в зависимости от расстояния между нагревателями. ИК изображение исследуемого образца, а также расстановка контрольных точек между нагревателями показана на рисунке 7.



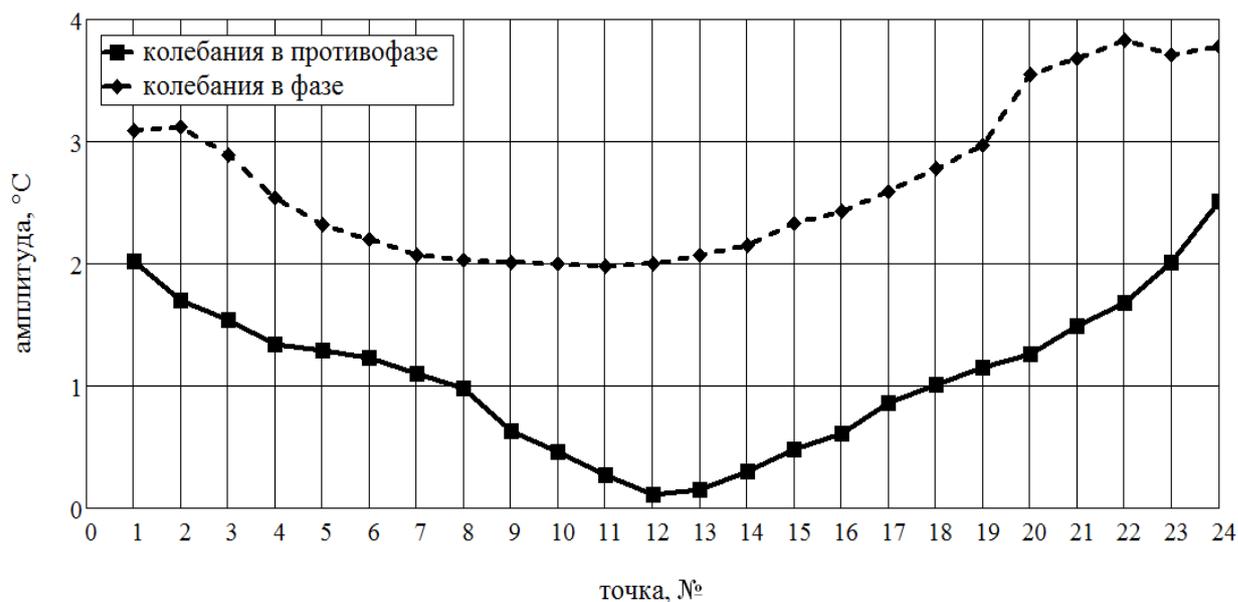
**Рисунок 7.** Тепловизионное изображение температурных полей нагревателей и контрольных точек

Для оценки амплитуды температурной волны в каждой контрольной точке, полученные экспериментальные данные в виде зависимости температурных колебаний от времени для каждой точки переводились в Фурье спектр по формуле (6):

$$C(f) = \frac{2}{N} \sum_{t=0}^{N-1} x(t) e^{\frac{-i2\pi f t}{N}} \quad (6)$$

Использование амплитудного множителя  $2/N$  в (6) позволяет перевести амплитуду спектральных составляющих непосредственно в значение температуры в градусы Цельсия.

По полученным данным был построен профиль распределения колебания температуры от расстояния между нагревателями. Полученные графики для колебаний в фазе и противофазе показаны на рисунке 8.



**Рисунок 8.** Зависимость амплитуды колебаний температуры от координаты на частоте 0,02 Гц

На графике видно, что амплитуда колебаний температуры в центре для колебаний в фазе на несколько градусов выше относительно средней температуры нагрева тела. Также отчётливо видно, что для режима противофазы амплитуда колебаний в центре практически не отличается от средней температуры нагреваемого тела, т.е. температурные волны в противофазе практически полностью исчезают между нагревателями.

## **Заключение**

В результате дипломной работы был выполнен анализ литературы по тематике теории стационарной и нестационарной теплопроводности, а также статей, посвященных теме исследования температурных волн.

Для проведения эксперимента была разработана экспериментальная установка, включающая в себя испытательный стенд для закрепления исследуемых образцов материала, а также прибор, непосредственно генерирующий тепловые колебания необходимой частоты и амплитуды. Также была разработана методика проведения эксперимента для изучения скорости температурных волн в среде, а также явления интерференции температурных волн при наличии нескольких источников нагрева.

В ходе анализа экспериментальных данных скорости температурных волн в зависимости от частоты плотности теплового потока, поступающего в среду было установлено, что скорость распространения температурных волн в пористой среде увеличивается с увеличением частоты колебаний теплового потока.

В ходе исследования свойства интерференции температурных волн удалось установить, что при сложении колебаний когерентных температурных волн результирующая температура в точке сложения увеличивалась.