

Министерство образования Российской Федерации  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский  
университет)

## **Измерение высоких температур методом яркостной пирометрии**

Лабораторная работа студентов группы Б04-901  
Аксеновой Светланы  
Гариной Ольги

Долгопрудный, 2022

## Содержание

<b>1</b>	<b>Теоретическое введение</b>	<b>2</b>
1.1	Теория излучения черного тела . . . . .	2
1.2	Яркостная температура и излучательная способность вещества .	3
<b>2</b>	<b>Экспериментальная установка</b>	<b>3</b>
2.1	Конструкция пирометра . . . . .	3
2.2	Калибровка пирометра . . . . .	5
2.3	Лазерный нагрев . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Оценка погрешностей</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Ход работы</b>	<b>7</b>
4.1	Калибровка пирометра . . . . .	7
4.2	Основные измерения . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Вывод</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Список литературы</b>	<b>15</b>

**Цель работы:** ознакомиться с бесконтактными измерениями температуры объекта, нагреваемого лазерным излучением, методом яркостной пирометрии.

## 1 Теоретическое введение

*Пирометр* - это прибор для измерения температуры тела по его тепловому излучению. Измерение происходит при сравнении мощности излучения исследуемого объекта и эталонного источника, такая температура называется *яркостной*. Так как для определения истинной температуры нужно ввести поправку на излучательную способность вещества, которая не может быть определена достаточно точно, то погрешность определения температуры таким методом - несколько десяткой градусов при измерении реальных температур  $\sim 3000$  К.

### 1.1 Теория излучения черного тела

Абсолютно черное тело (АЧТ) - тело с коэффициентом излучения, равным 1. Объемная спектральная плотность излучения АЧТ задается формулой Планка:

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} \Delta \lambda, \quad (1)$$

где  $C_1 = 2\pi h c^2$ ,  $C_2 = \frac{hc}{k}$ .

Формула (1) задает спектральное распределение энергии, излучаемой в полусферу единиц поверхности, нагретой до температуры  $T$ . Иногда для описания  $E_{\lambda,T}$  используют термин светимость. Также формулу можно применять для оценки мощности излучения поверхности с температурой  $T$  в спектральном интервале  $\Delta \lambda$ , середина которого характеризуется длиной волны  $\lambda$ .

В случае, когда  $h\nu/kT \ll 1$ , можно воспользоваться приближением Вина:

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T} \right)^{-1} \Delta \lambda. \quad (2)$$

Для измерения температур от 1000 до 5000 К на длинах волн, лежащих в видимой и ближней ИК-областях, для расчета температуры пирометрическими методами используют формулу Вина, так как линеаризация функции (1) существенно облегчает вывод формул пирометрии.

Для вычисления суммарной мощности излучения АЧТ в полусферу по всем длинам волн используется формул Стефана-Больцмана:

$$E = \sigma T^4, \quad (3)$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана. В случае излучения реального тела суммарная мощность излучения с единицы поверхности отличается от излучения АЧТ на коэффициент  $\alpha$ , называемый интегральной излучательной способностью тела.

## 1.2 Яркостьная температура и излучательная способность вещества

Для описания излучения реальных тел с помощью формул для излучения АЧТ необходимо ввести поправку на степень черноты (или излучательную способность). Процессы поглощения лучистой энергии и ее излучение взаимнообратные, способность тел поглощать лучистую энергию характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$ , который равен отношению интенсивностей поглощенного телом потока энергии к интенсивности упавшего на него потока энергии. Отношение излучательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, а является для всех тел одной и той же функцией длины волны и температуры (закон Кирхгофа). Допустим, мы имеем два тела, одно является абсолютно черным, другое имеет отличную от единицы степень черноты. Яркостью температурой тела в лучах с длиной волны  $\lambda$  называется такая температура АЧТ, при которой яркости (т.е. светимости в единицу телесного угла) обоих тел в свете одной и той же длины волны равны между собой. Обозначим через  $\varepsilon_{\lambda,T}$  степень черноты тела для длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$ , тогда мощность излучения с единицы поверхности реального тела при температуре  $T$  в спектральном интервале в приближении Вина можно записать:

$$E_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T} \right)^{-1} \Delta \lambda. \quad (4)$$

Используя определение яркостной температуры и формулу (4), получим следующее соотношение:

$$\varepsilon_{\lambda,T} \cdot C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}} \right)^{-1} \Delta \lambda = C_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}} \right)^{-1} \Delta \lambda, \quad (5)$$

где  $T_{\text{я}}$  и  $T_{\text{и}}$  - яркостная и истинная температура, соответственно.

После сокращения и логарифмирования получим

$$\frac{1}{T_{\text{я}}} - \frac{1}{T_{\text{и}}} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda,T}}. \quad (6)$$

## 2 Экспериментальная установка

### 2.1 Конструкция пирометра

На рис. 1 представлена схема установки, используемой в данной работе. Свет от объекта фокусируется объективом пирометра на зеркальную диафрагму. Диафрагма представляет собой тонкую зеркальную пластинку с отверстием диаметром около 300 мкм в центре. Фокусное расстояние объектива 200–300 мм.

Свет, прошедший сквозь диафрагму, попадает на интерференционный фильтр, который вырезает из всего спектра участок шириной 10 нм с центральной длиной волны 650 нм (рис. 2). Система линз фокусирует полученный монохрома-

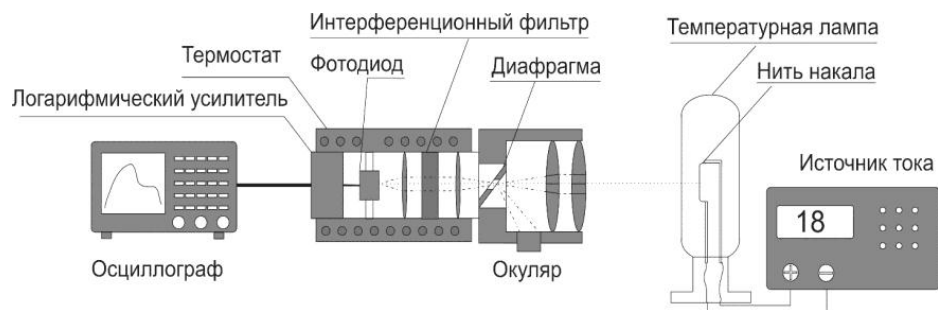


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки

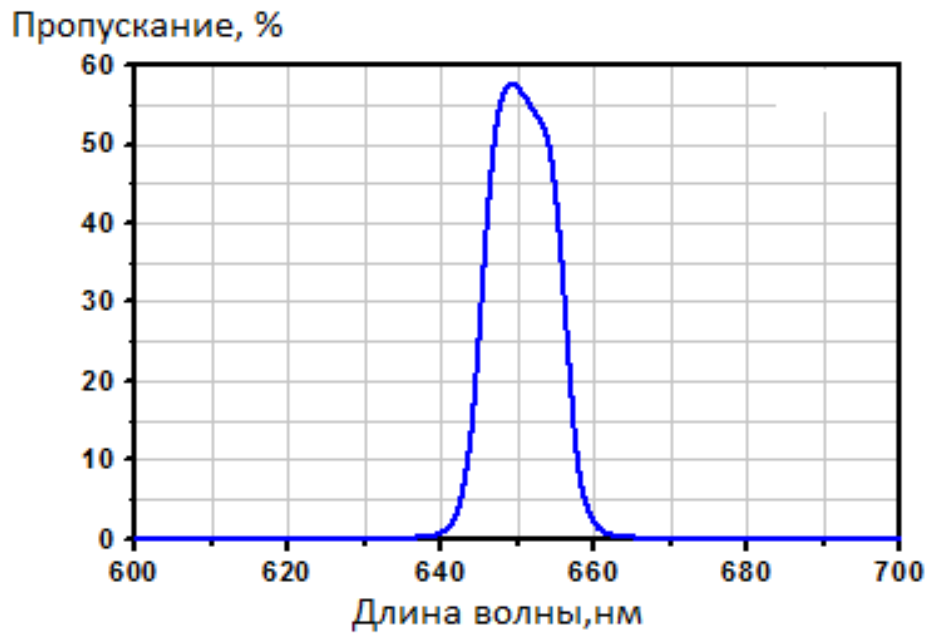


Рисунок 2 – Спектральная характеристика интерференционного фильтра пирометра

тический пучок на детектор. Фототок от детектора преобразуется логарифмическим усилителем  $\lg 114$  согласно формуле

$$U = 0,375 = \lg \left( \frac{I}{I_0} \right), \quad (7)$$

где  $I$  - ток с фотодиода,  $I_0$  - референсный ток на входе усилителя. Референсный ток определяется делением напряжения питания усилителя (2.5 В) на значение сопротивления, стоящего непосредственно перед входом усилителя. В работе его значение составляет порядка 1 мкА. Для того чтобы повысить точность измерений, производится стабилизация температуры логарифмического усилителя с помощью термостата.

Воспользуемся приближением Вина (2), логарифмируя данную функцию, получаем линейную зависимость  $\ln E$  от  $T^{-1}$ . Сравним полученную зависимость с функцией логарифмического усилителя, учитывая, что фототок линейно зависит от мощности излучения, падающего на фотодиод, получим, что зависимость выходного напряжения должна быть линейной функцией от обратной температуры.

## 2.2 Калибровка пирометра

Для того чтобы привязать значения напряжения на выходе пирометра к значениям температуры, необходимо провести калибровку по эталонному источнику. Для калибровки яркостных пирометров применяют температурные лампы. Лампа состоит из вакуумной или газонаполненной колбы, внутри которой закреплена вольфрамовая лента и электроды. Лампа подключается к стабилизированному источнику тока, пирометр фокусируют в центр ленты и подают ток на ламу. При выполнении калибровки очень важно правильно расположить пирометр и лампу на оптическом столе.

После включения лампы в цепь необходимо дождаться наступления теплового равновесия внутри лампы, в газонаполненных лампах процесс стабилизации теплового потока замедляется из-за конвекции. Время установления равновесия в используемой лампе составляет около 30 минут. При незначительном изменении тока время установления теплового баланса не столь велико и при переходе между соседними температурными точками достаточно подождать 5 минут. Калибровочная таблица температурной лампы представлена ниже (табл. 1).

Температура, К	Ток через лампу, А
1547	13,000
1631	14,000
1776	16,000
1841	17,000
1964	19,000
2022	20,000
2133	22,000
2186	23,000
2290	25,000
2341	26,000
2437	28,000
2484	29,000

Таблица 1 – Яркостная температура нити температурной лампы в зависимости от величины протекающего через нее тока

Выходное напряжение пирометра должно быть линейной функцией от обратной температуры, таким образом, после калибровки должна получиться функция вида  $U = a + \frac{b}{T}$ , где  $a$  и  $b$  - коэффициенты линейной аппроксимации калибровочных данных, а  $U$  и  $T$  - выходное напряжение пирометра и температура, соответственно. Выходное напряжение определяется по формуле (7), фототок - мощностью излучения, падающего на фотодиод в спектральном интервале  $\delta\lambda$ , середина которого характеризуется длиной волны  $\lambda$ ,  $I/I_0 \sim E_{\lambda,T}$ , подставляя

вместо  $E_{\lambda,T}$  формулу (2), получим:

$$U = 0,375 \lg \left( C_1 \lambda^{-5} \exp \frac{-C_2}{KT} \right), \quad (8)$$

$$U = \frac{0,375}{\ln 10} \left( \ln (C_1 \lambda^{-5}) - \frac{C_2}{\lambda T} \right). \quad (9)$$

Сравнивая калибровочную функцию и выражение (9), получим

$$b = -\frac{0,375}{\ln 10} \cdot \frac{C_2}{\lambda}. \quad (10)$$

Откуда легко можно вычислить эффективную длину волны  $\lambda$ .

### 2.3 Лазерный нагрев

Часть образца нагревается импульсом лазерного луча таким образом, что температура на периферии образца остается достаточно низкой, поэтому взаимодействия с держателем не происходит. В таких исследованиях температура нагретой поверхности, как правило, определяется методом оптической пирометрии, а точка фазового перехода – по характерному плато на термограмме, полученной в процессе охлаждения жидкости и ее кристаллизации. Плато на термограмме можно объяснить тем, что при кристаллизации жидкости выделяется тепловая энергия, позволяющая поддерживать постоянное значение температуры достаточно долгое время. Необходимо отметить, что при нагреве и переходе из твердой фазы в жидкую плато на термограмме практически не наблюдается. Это вызвано следующими факторами: диссипация энергии лазерного излучения происходит в тонком поверхностном слое, масса расплава нарастает медленно, а температура поверхности растет непрерывно. Поэтому на этапе нагрева на термограмме в точке плавления виден только излом, причем кривая роста температуры достаточно гладкая и точно определить температуру появления жидкой фазы не представляется возможным.

В данной работе для нагрева используется отпаянный  $\text{CO}_2$ -лазер, который представляет собой газоразрядную трубку и резонатор. Излучение такого лазера имеет узкую полосу с центром 10,6 мкм, его не видно глазом, и оно не проникает через большинство материалов.

## 3 Оценка погрешностей

Возникновение ошибок при измерении температуры может быть обусловлено следующими причинами:

1. низкое соотношение сигнал/шум в требуемом диапазоне температур;
2. ошибки при измерении калибровочных точек температурной лампы и, как следствие, нарастание ошибки при экстраполяции;

3. наличие поглощающей среды в промежутке между пирометром и объектом (газ, окно камеры);
4. несоответствие эффективной длины волны пирометра и калибровочных данных.

## 4 Ход работы

### 4.1 Калибровка пирометра

Калибровка пирометра проводилась по яркостной температуре нити температурной лампы (табл. 1), ток измерялся с помощью последовательно подключенного шунта и цифрового вольтметра. Глядя в окуляр пирометра и смещая его по оси, перпендикулярно поверхности объекта, было получено четкое изображение вольфрамовой ленты для настройки пирометра на нить лампы. Часть экспериментальной установки для калибровки представлен на рис. 3. После включения лампы для установления равновесия необходимо было прогревать её в течение 30 минут.

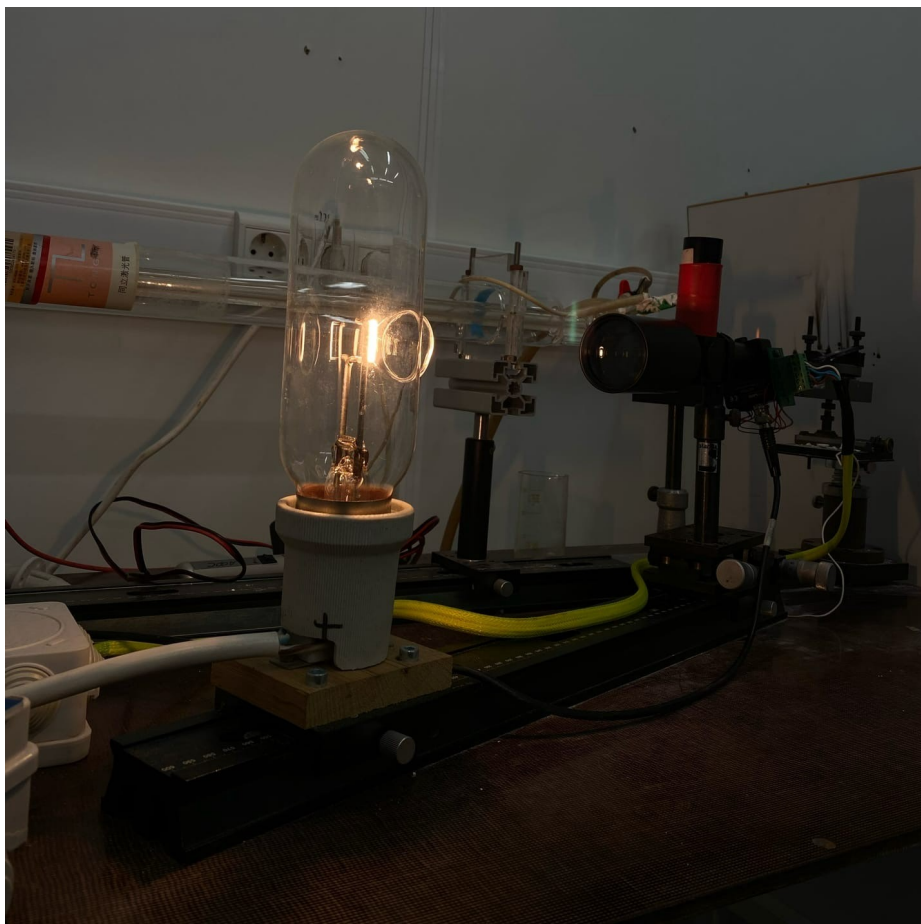


Рисунок 3 – Часть экспериментальной установки для калибровки пирометра

Далее было измерено значение напряжения в зависимости от тока. При изменении величины подаваемого напряжения необходимо было выждать 5 минут для установления равновесия системы. Измерения проводились на стадии возрастания тока. Для вычисления значения напряжения для каждого значения



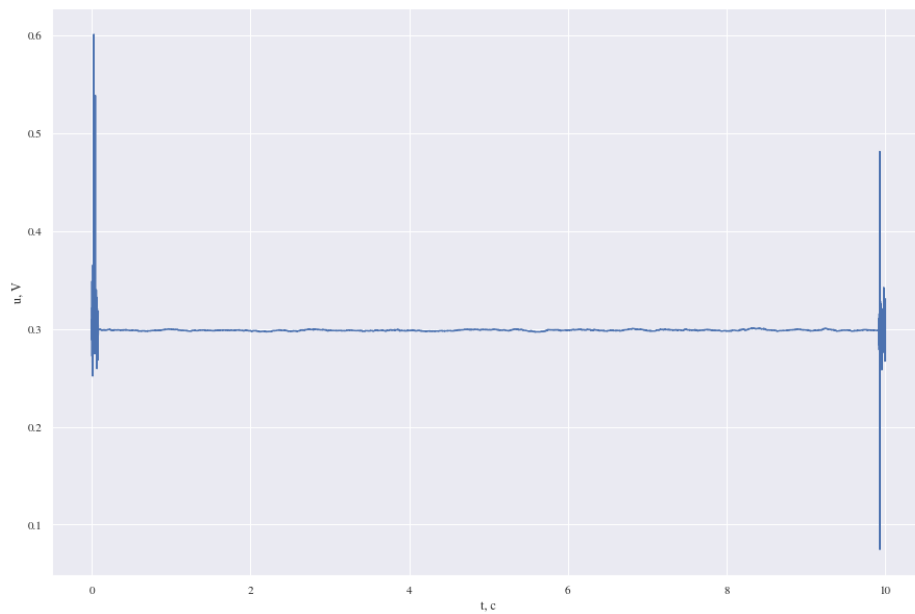


Рисунок 4 – Усреднение показаний пирометра при температуре 16°C

тока было проведено усреднение по 400 точкам (пример на рис. 4). Зависимость напряжения от обратной температуры показана на рис. 5.

Для температуры 29°C измерения проводилась три раза с интервалом в 5 минут. Средние значения для каждого измерения

$$U_1 = 0,960 \text{ В}, U_2 = 0,982 \text{ В}, U_3 = 0,985 \text{ В}$$

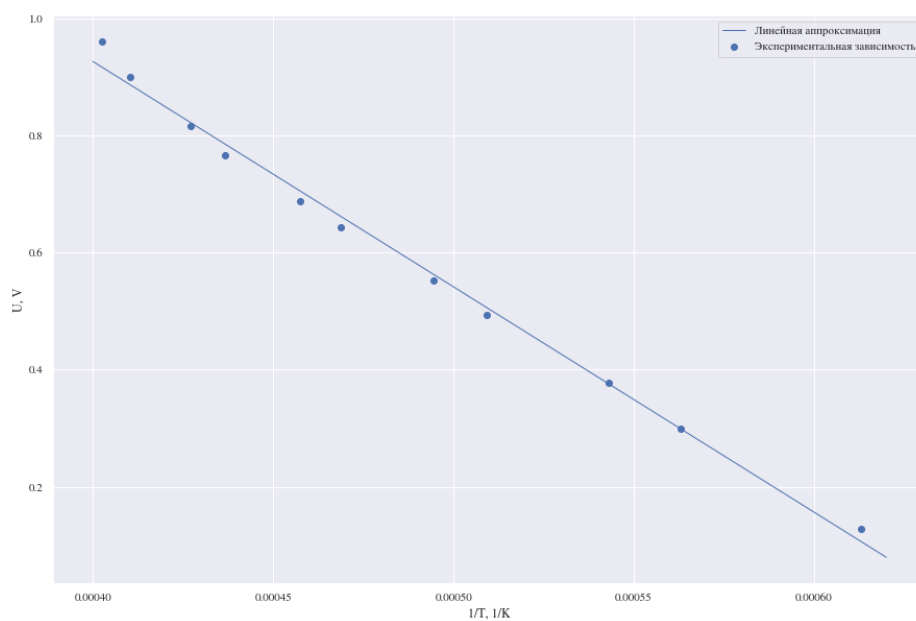


Рисунок 5 – Зависимость напряжения от обратной температуры

По методу наименьших квадратов полученная зависимость была аппроксимирована прямой. Коэффициент детерминации

$$R^2 = 0,97.$$

По формуле 10 была рассчитана эффективная длина волны пирометра

$$\lambda = 608 \pm 15 \text{ нм.}$$

Калибровочная функция пирометра  $T(U)$  представлена на рис. 6.

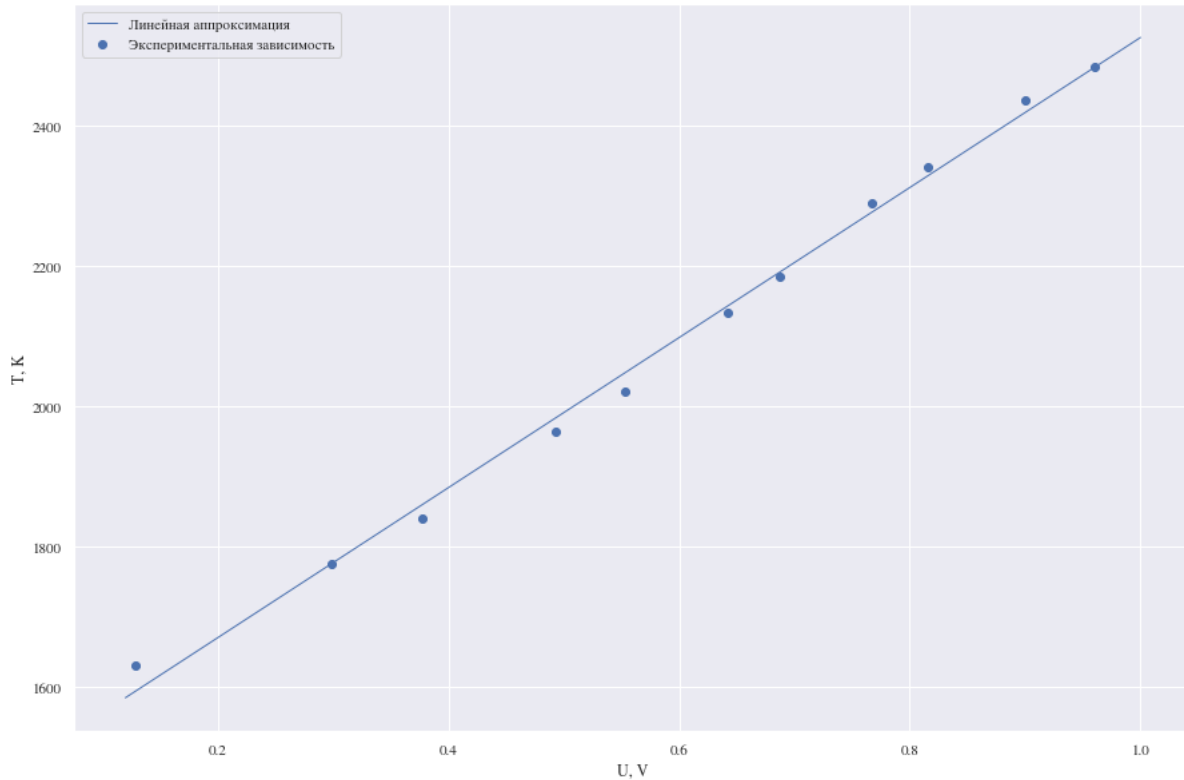


Рисунок 6 – Калибровочная функция пирометра

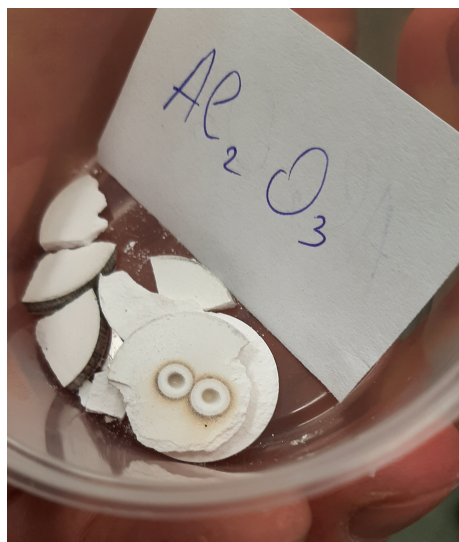
## 4.2 Основные измерения

Далее использовался лазерный нагрев образцов. Пирометр и лазер были отцентрированы, чтобы область нагрева лазера и измерения пирометра совпадали. Для проведения опыта необходимо было запустить измерение через программу и спустя 1-2 секунды включить лазер на 5-6 секунд. Общее время измерения - 10 секунд. Фотографии образцов после опыта представлены на рис. 7. Для каждого измерения проводилось усреднение по 500 точкам. В качестве образцов использовались зеленая глина (рис. 8-11), белая глина (рис. 12-15),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 16-19),  $\text{ZrO}_2$  (рис. 20-23) и  $\text{TiO}_2$  (рис. 24-31).

По усредненным термограммам были определены яркостные температуры плавления для каждого образца, которые по формуле 6 были пересчитаны в истинные. Также была проведена оценка ошибки, вызванной использованием приближения Вина и суммарная ошибка измерения температуры. По формуле

$$\frac{1}{T} + \frac{1}{T_{\text{цвет}}} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (11)$$

была рассчитана цветовая температура  $T_{\text{цвет}}$ . Все результаты представлены в таблице 1.



а)



б)

Рисунок 7 – Образцы после лазерного нагрева: а -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  
б -  $\text{TiO}_2$ .

Материал	$T_{\text{я}}, \text{K}$	$\sigma_{T_{\text{я}}}, \text{K}$	$T_{\text{и}}, \text{K}$	$\sigma_{T_{\text{и}}}, \text{K}$	$\sigma, \text{K}$	$\sigma_{\Sigma}, \text{K}$	$T_{\text{цвет}}, \text{K}$
Зеленая глина	2051	13	2117	56	2.7	56	2143
Белая глина	2033	10	2098	54	2.7	54	2124
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2277	20	2359	64	2.7	64	2391
$\text{ZrO}_2$	2344	67	2431	93	2.7	93	2465
$\text{TiO}_2$	2104	13	2174	57	2.7	57	2201

Таблица 2 – Результаты расчетов

## 5 Вывод

В ходе работы были проведены измерения температуры нескольких образцов методом яркостной пирометрии.

Предварительно пирометр был откалиброван по яркостной температуре вольфрамовой нити. Найденная эффективная длина волны не совпадает с эффективной длиной волны для пирометра. Возможно, это связано с тем, что при изменении тока равновесие в лампе не успевало установиться за 5 минут, так как для трех измерений с интервалом в 5 минут для  $29^\circ\text{C}$  полученные значения напряжения отличались. Также коэффициент детерминации недостаточно близок к 1.

После калибровки методом лазерного нагрева образцов были получены термограммы для нескольких веществ, далее были вычислены их температуры плавления и погрешности измерений (табл. 2). Для оксида алюминия табличная температура плавления - 2345 K, отклонение от найденной составило 0,6%. Данные для оксида циркония - 2988 K, отклонение - 23%. Скорее всего, в ходе эксперимента он не успел расплавиться, так как достаточно тугоплавкий. Это подтверждает вид соответствующих термограмм (рис. 20-23). Для оксида титана табличное значение температуры плавления - 2116 K, отклонение - 0,6%.

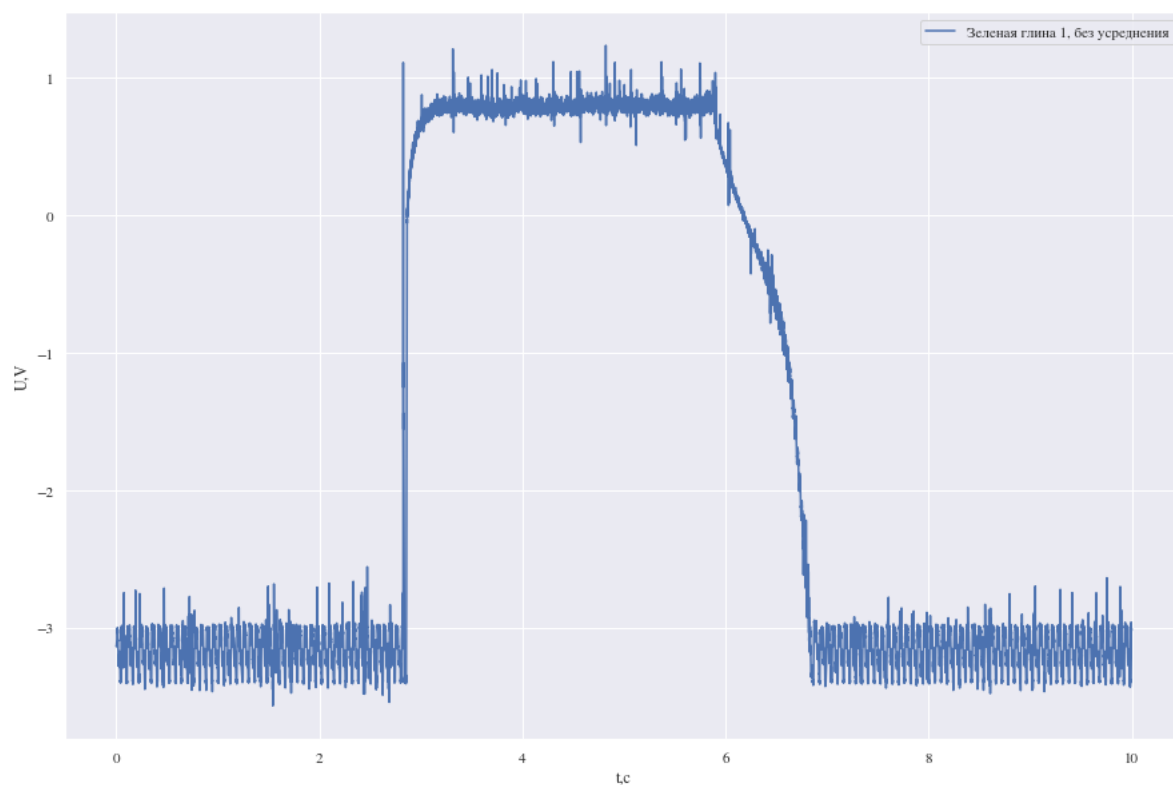


Рисунок 8 – Термограмма для зеленой глины, без усреднения (опыт 1)

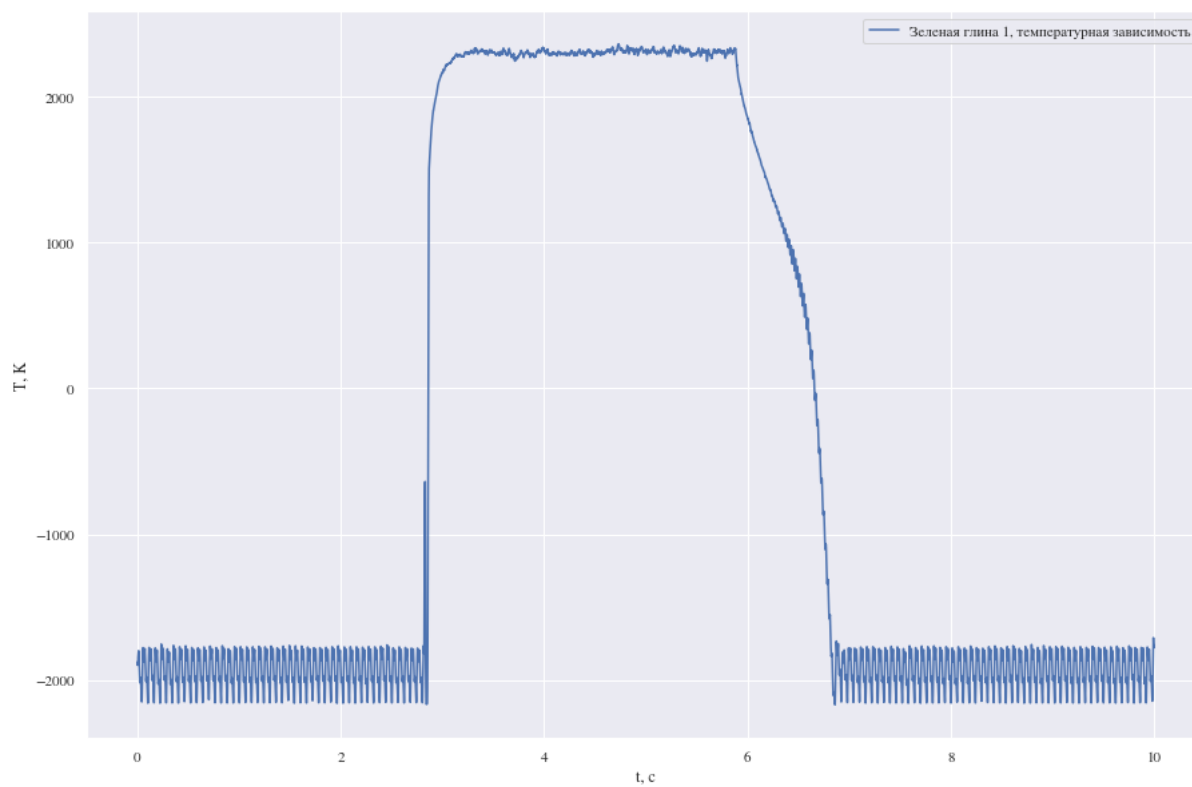


Рисунок 9 – Термограмма для зеленой глины, с усреднением (опыт 1)

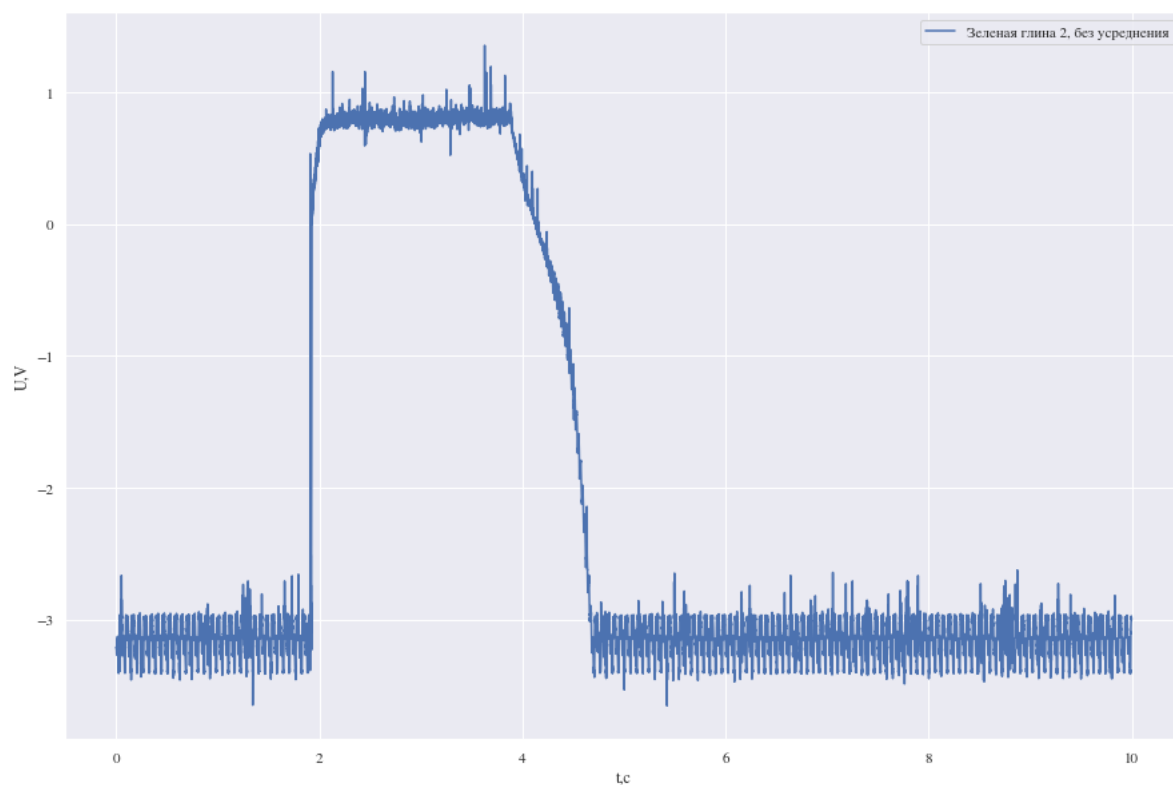


Рисунок 10 – Термограмма для зеленой глины, без усреднения (опыт 2)

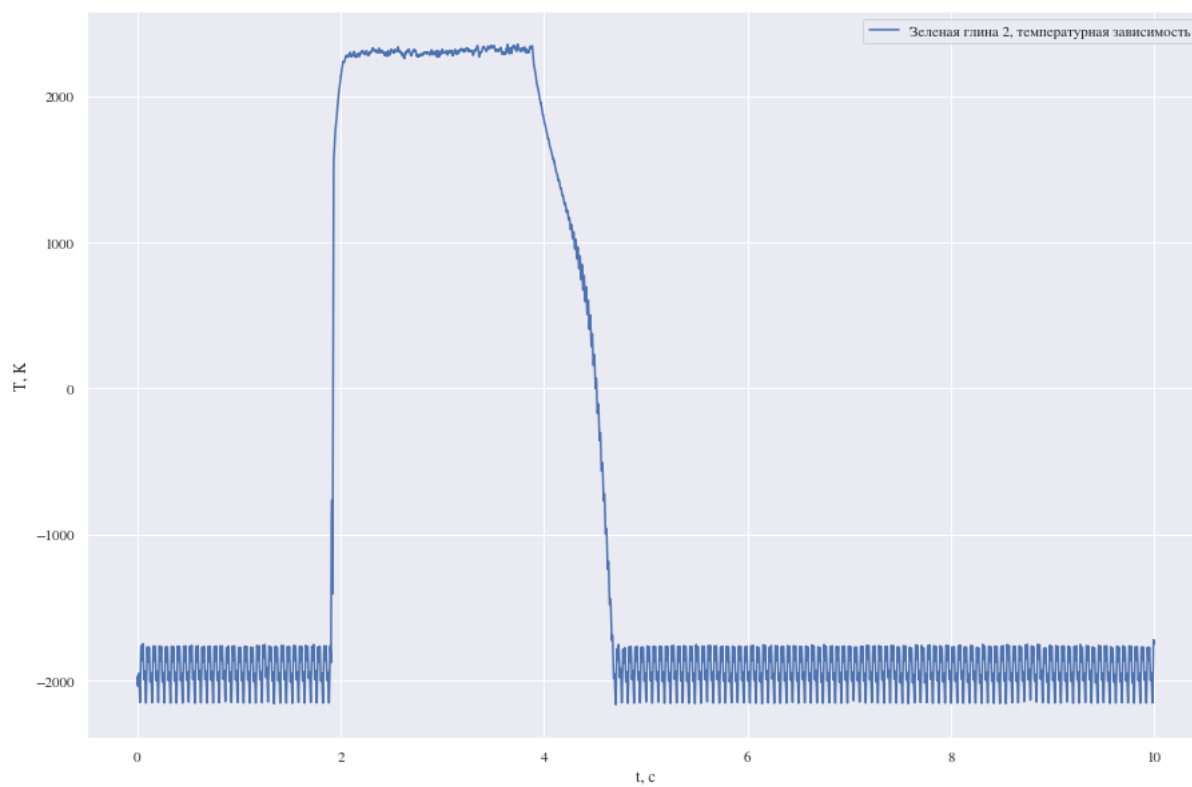


Рисунок 11 – Термограмма для зеленой глины, с усреднением (опыт 2)

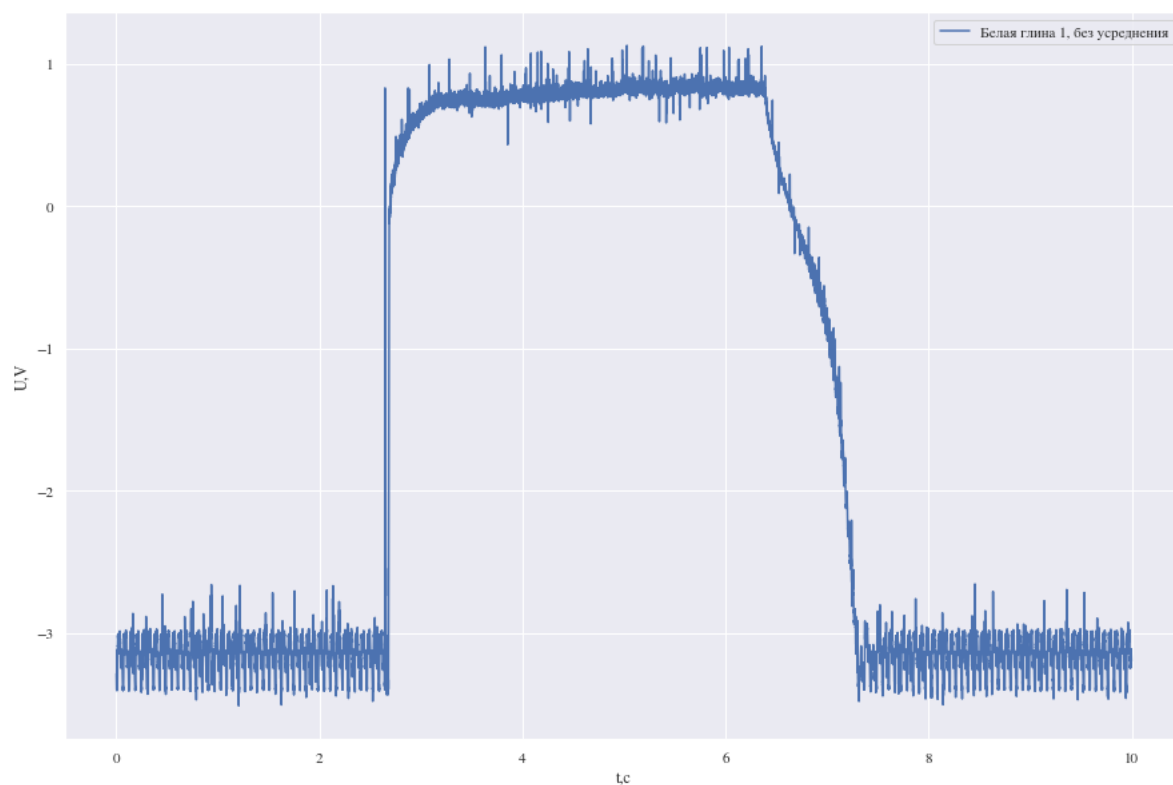


Рисунок 12 – Термограмма для белой глины, без усреднения (опыт 1)

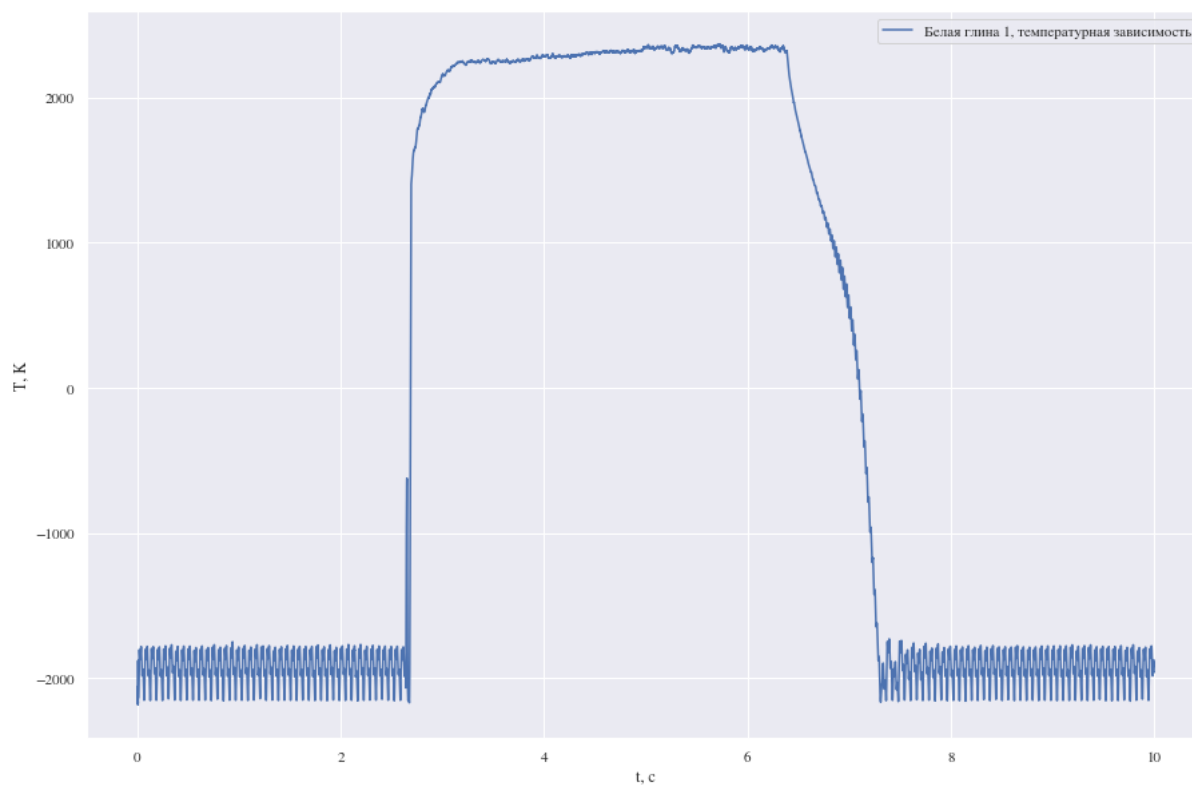


Рисунок 13 – Термограмма для белой глины, с усреднением (опыт 1)

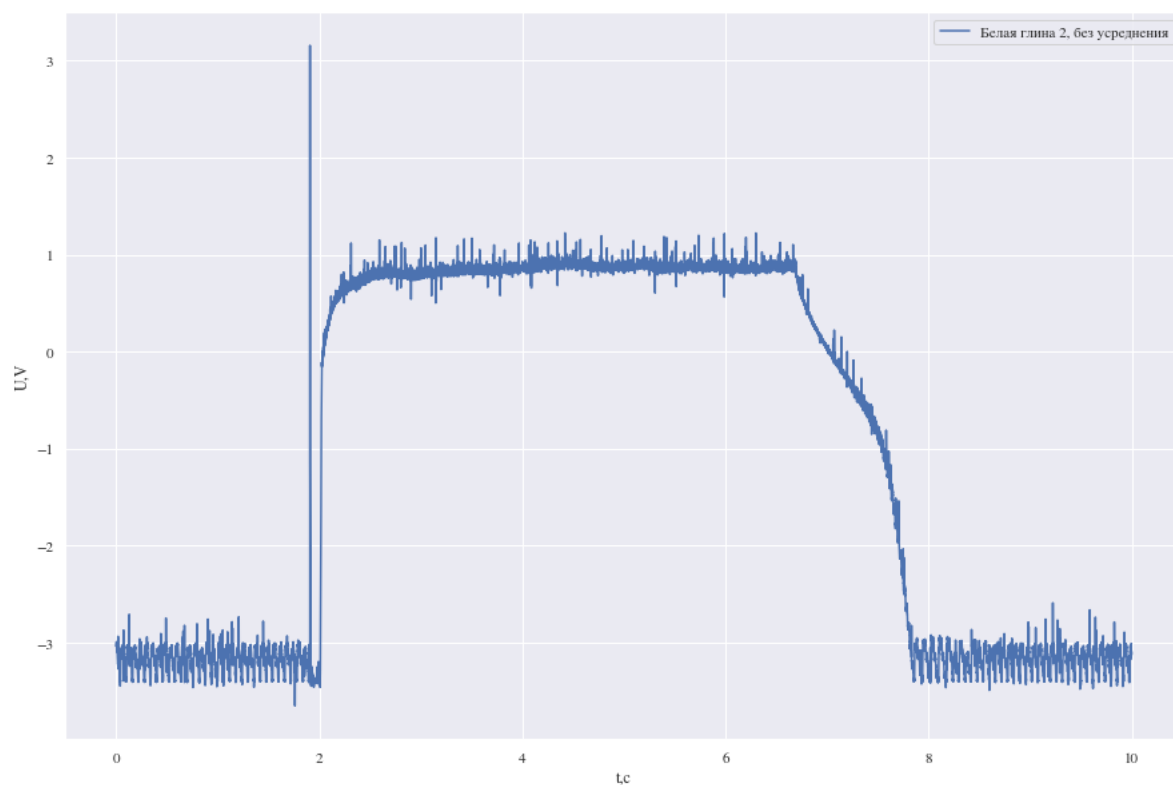


Рисунок 14 – Термограмма для белой глины, без усреднения (опыт 2)

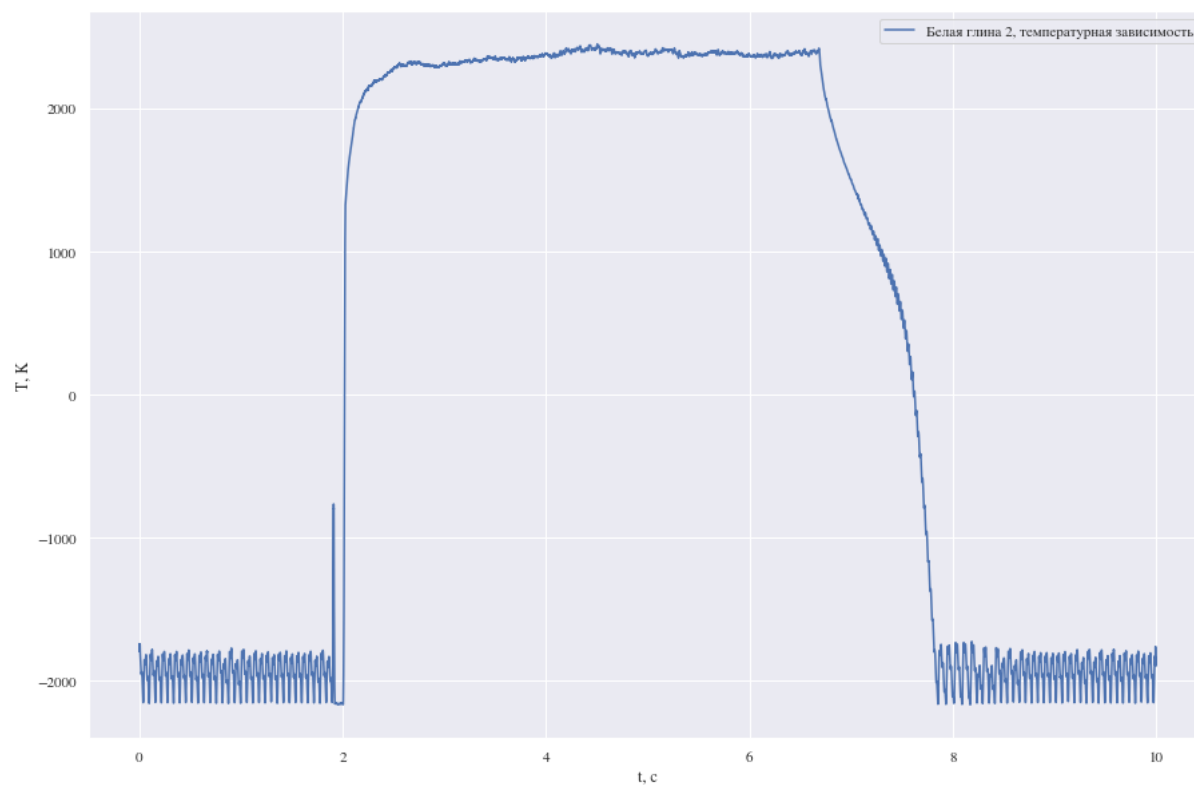


Рисунок 15 – Термограмма для белой глины, с усреднением (опыт 2)

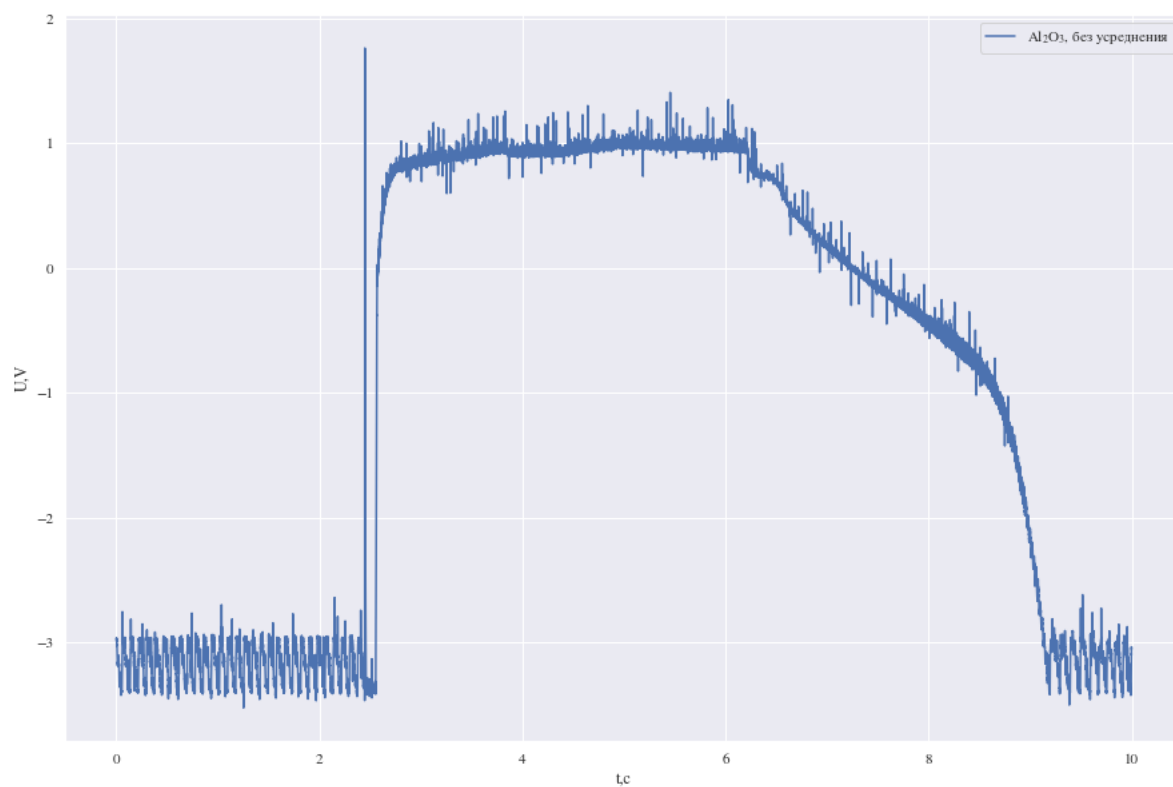


Рисунок 16 – Термограмма  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , без усреднения (опыт 1)



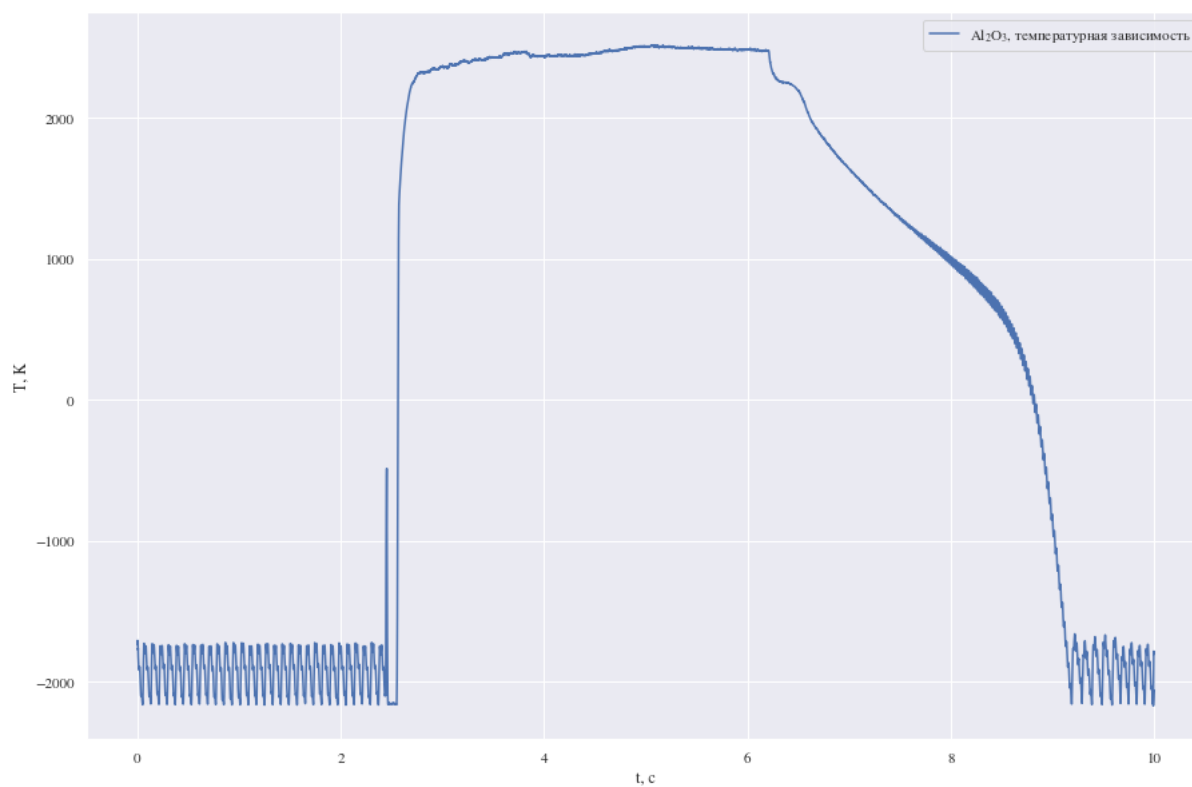


Рисунок 17 – Термограмма  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , с усреднением (опыт 1)

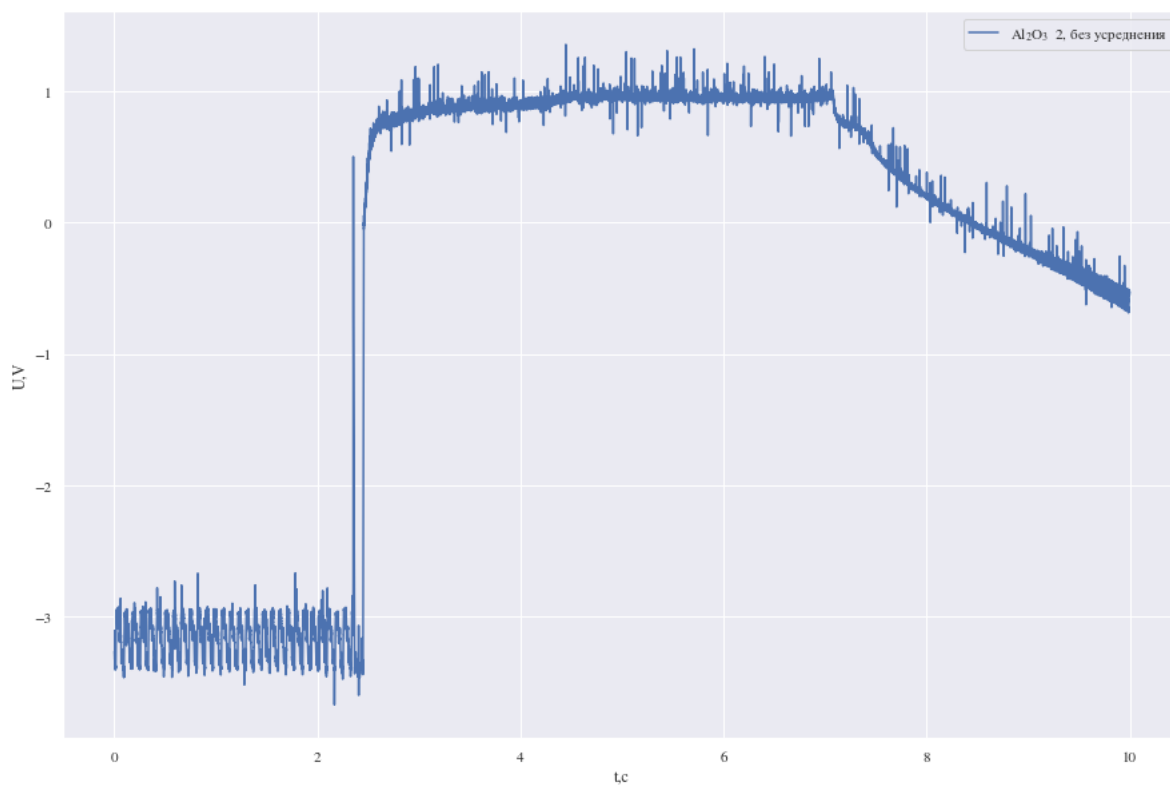


Рисунок 18 – Термограмма  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , без усреднения (опыт 2)

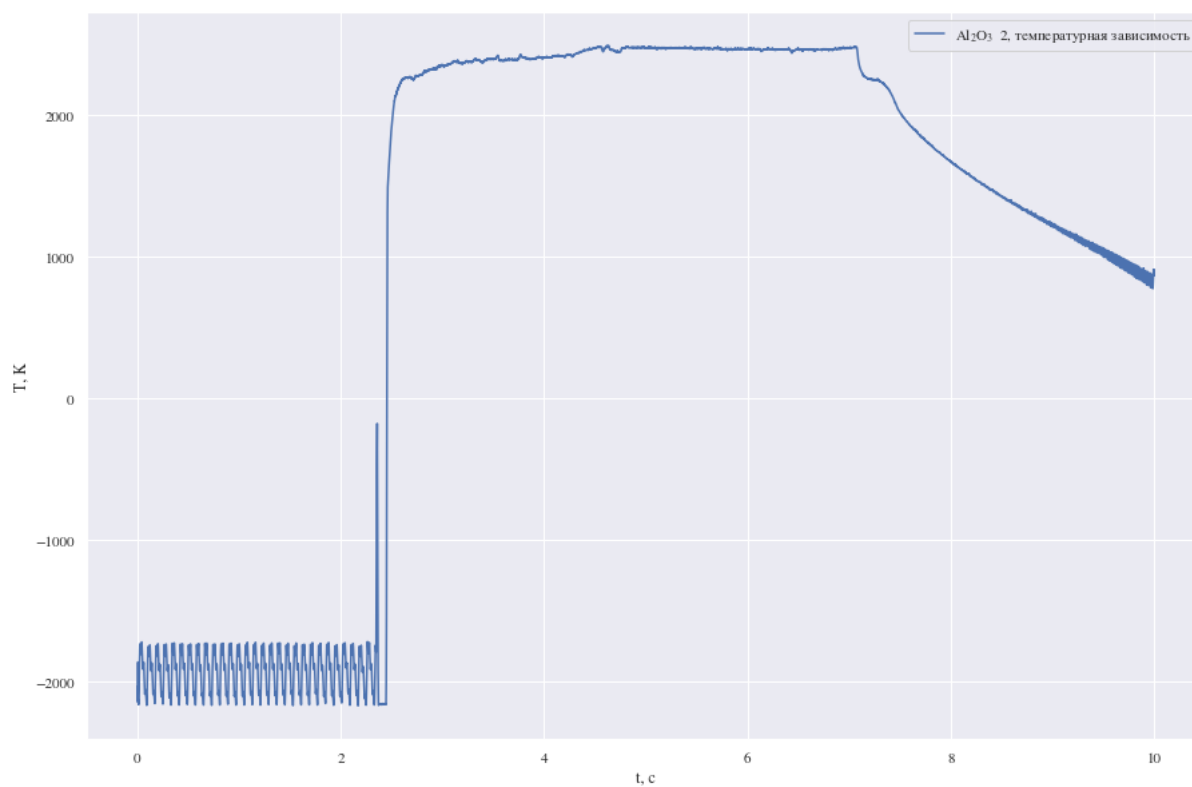


Рисунок 19 – Термограмма  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , с усреднением (опыт 2)

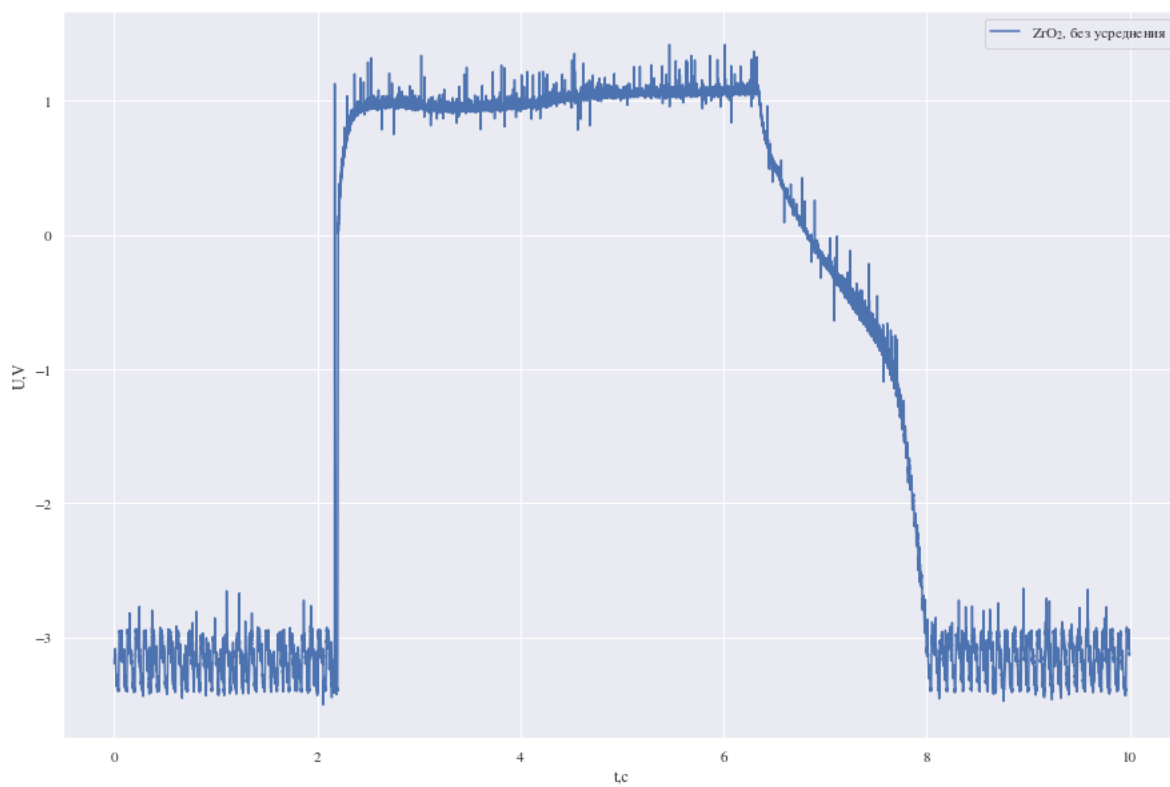


Рисунок 20 – Термограмма  $\text{ZrO}_2$ , без усреднения (опыт 1)

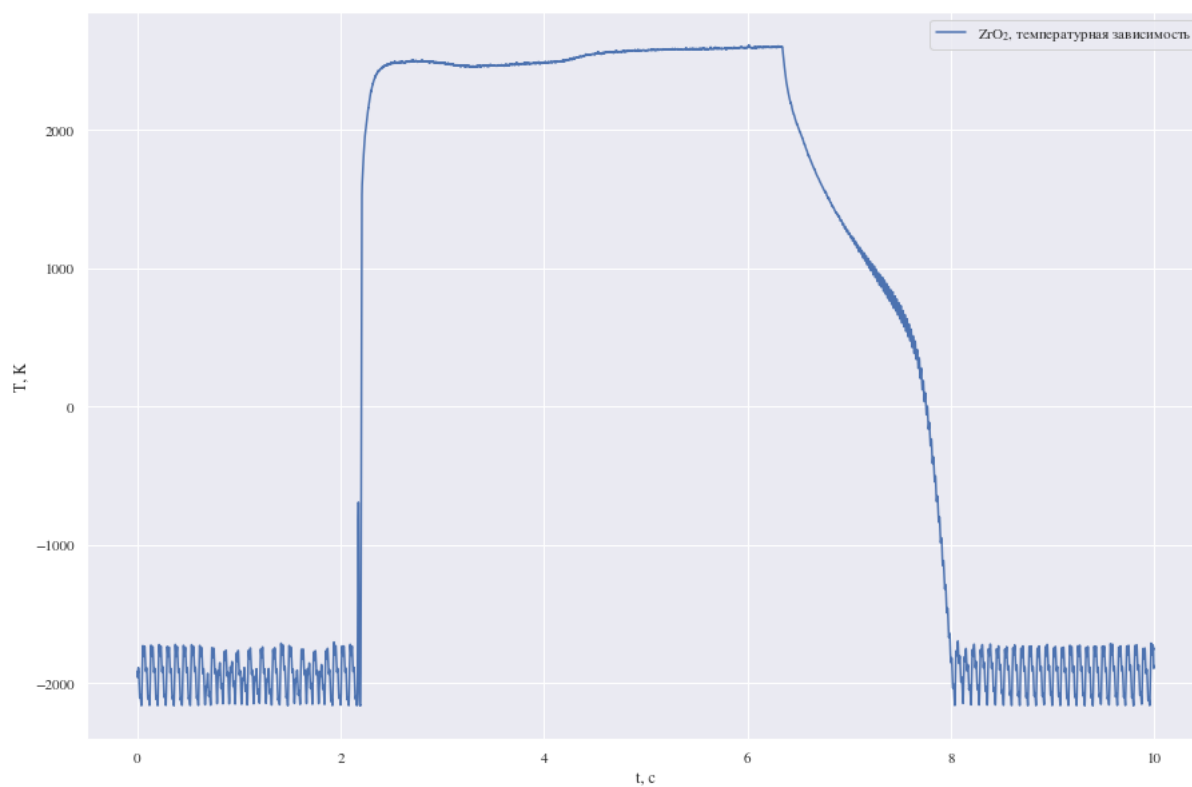


Рисунок 21 – Термограмма  $\text{ZrO}_2$ , с усреднением (опыт 1)

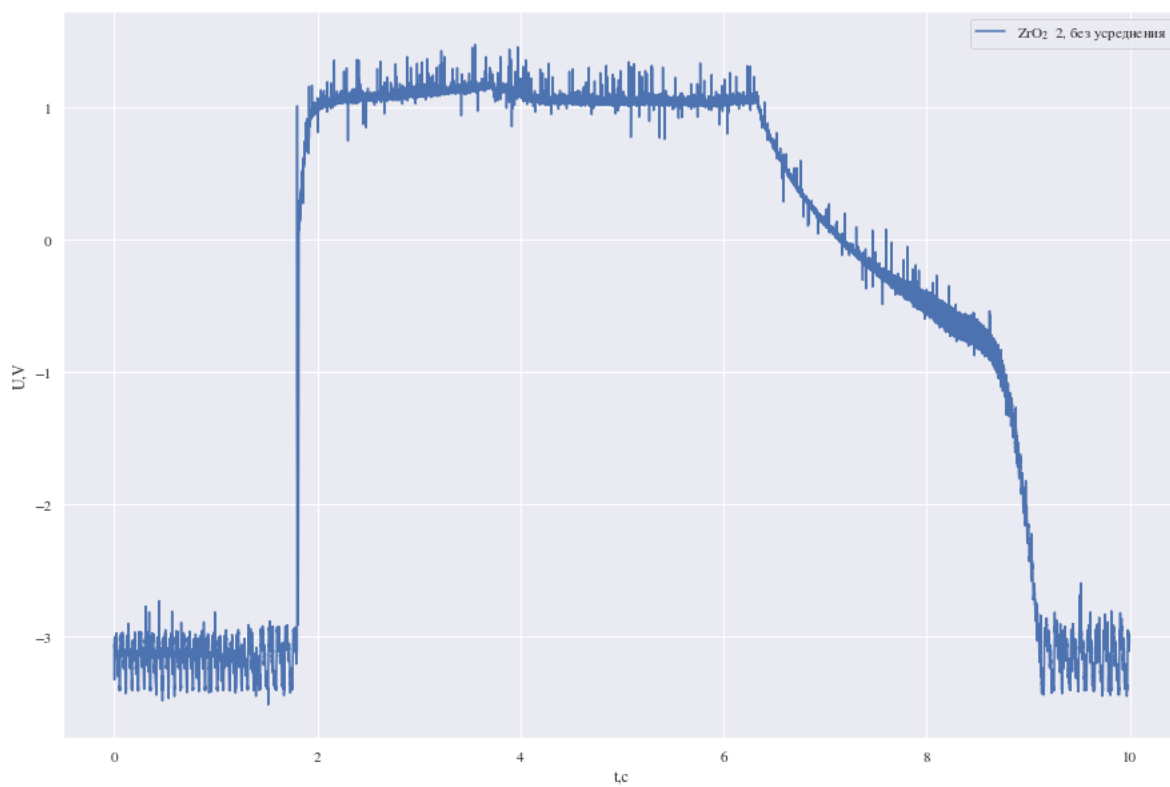


Рисунок 22 – Термограмма  $\text{ZrO}_2$ , без усреднения (опыт 2)

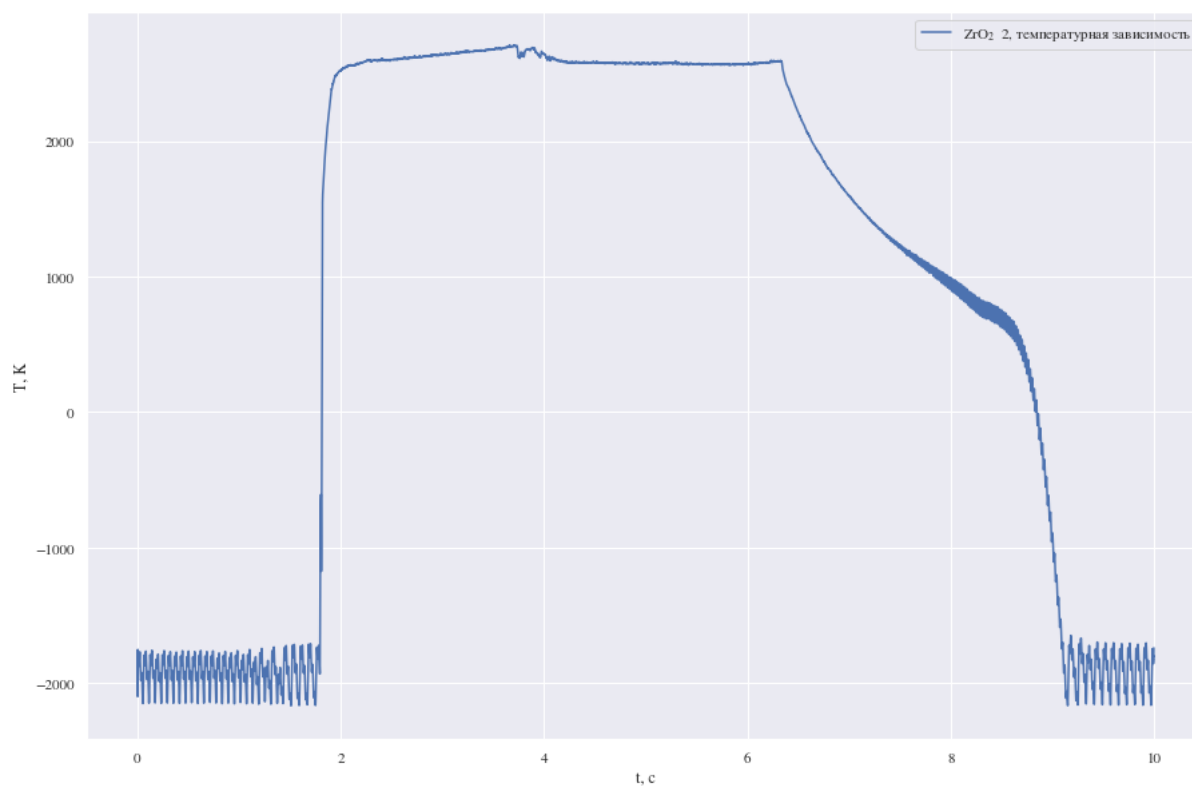


Рисунок 23 – Термограмма ZrO<sub>2</sub>, с усреднением (опыт 2)

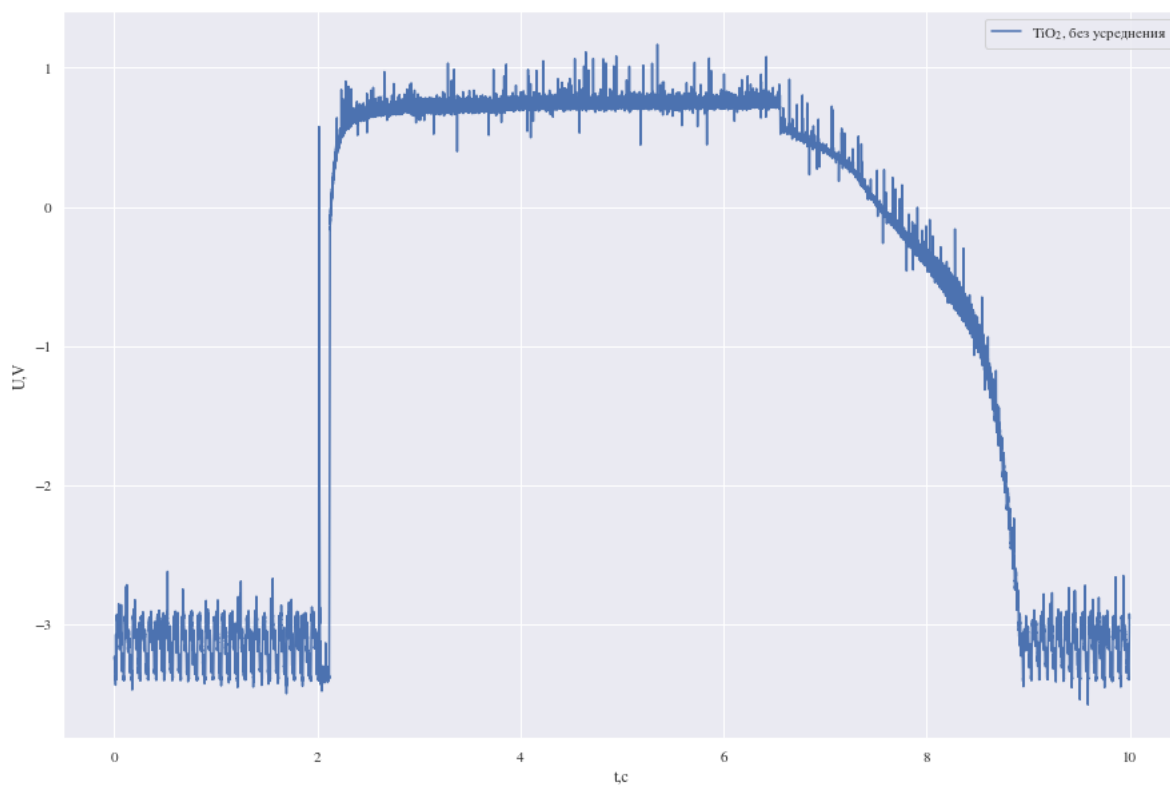


Рисунок 24 – Термограмма TiO<sub>2</sub>, без усреднения (опыт 1)

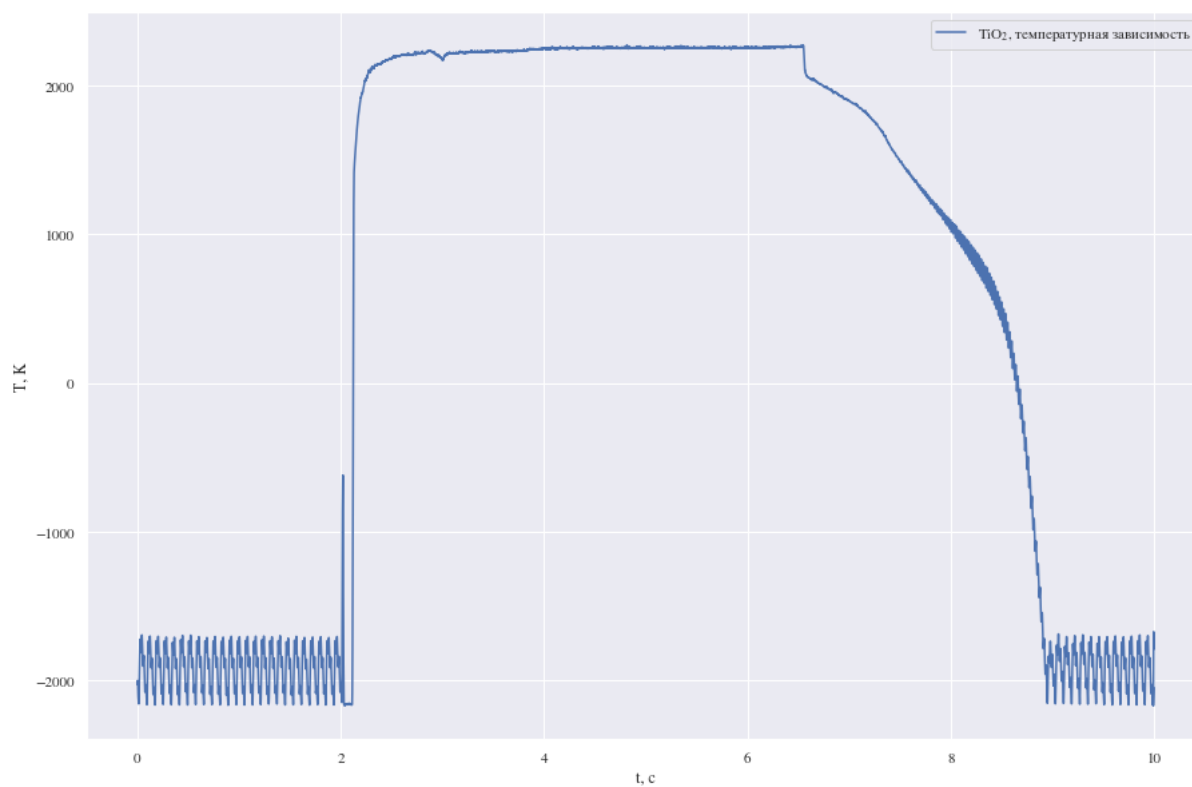


Рисунок 25 – Термограмма  $\text{TiO}_2$ , с усреднением (опыт 1)

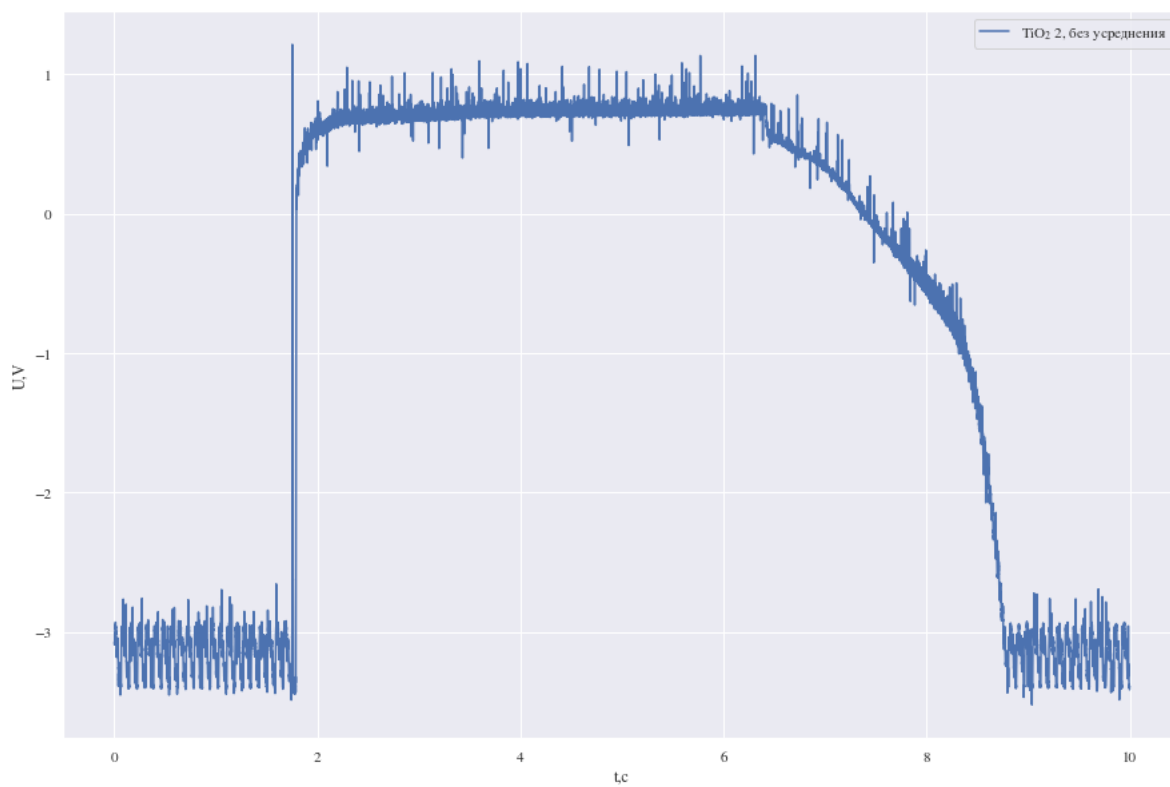


Рисунок 26 – Термограмма  $\text{TiO}_2$ , без усреднения (опыт 2)

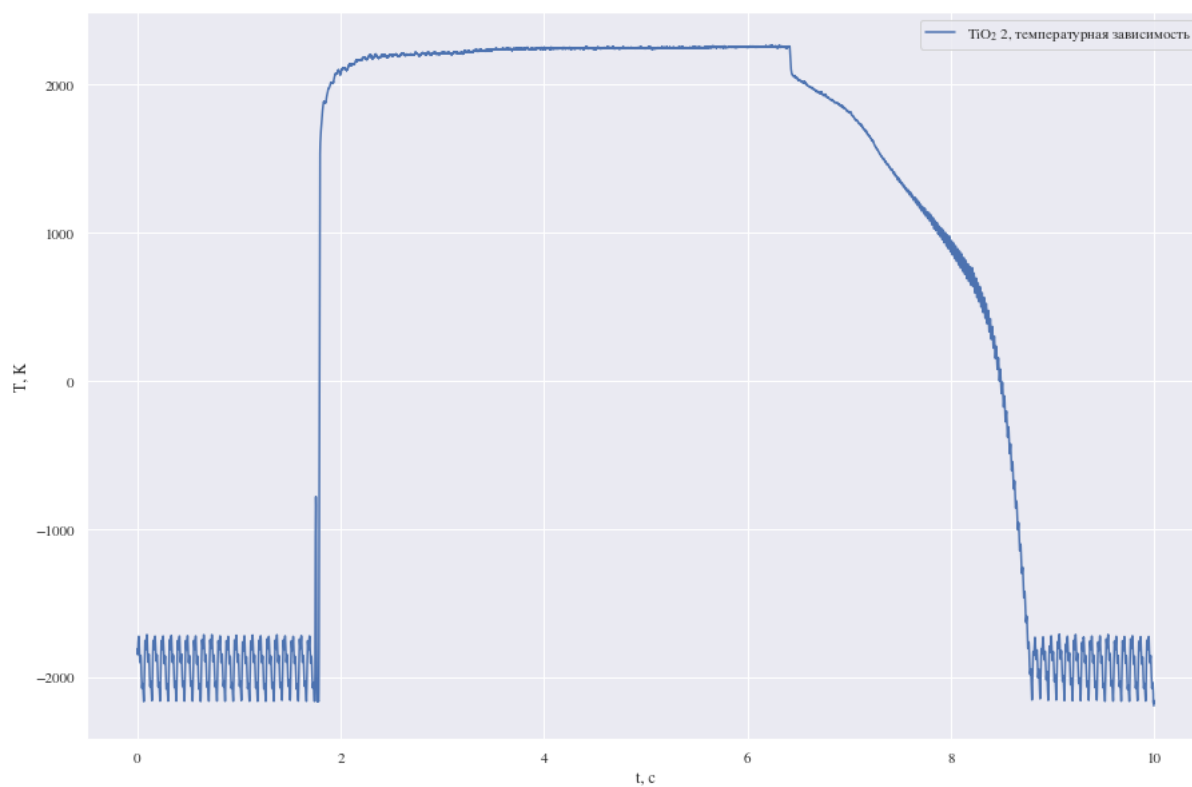


Рисунок 27 – Термограмма TiO<sub>2</sub>, с усреднением (опыт 2)

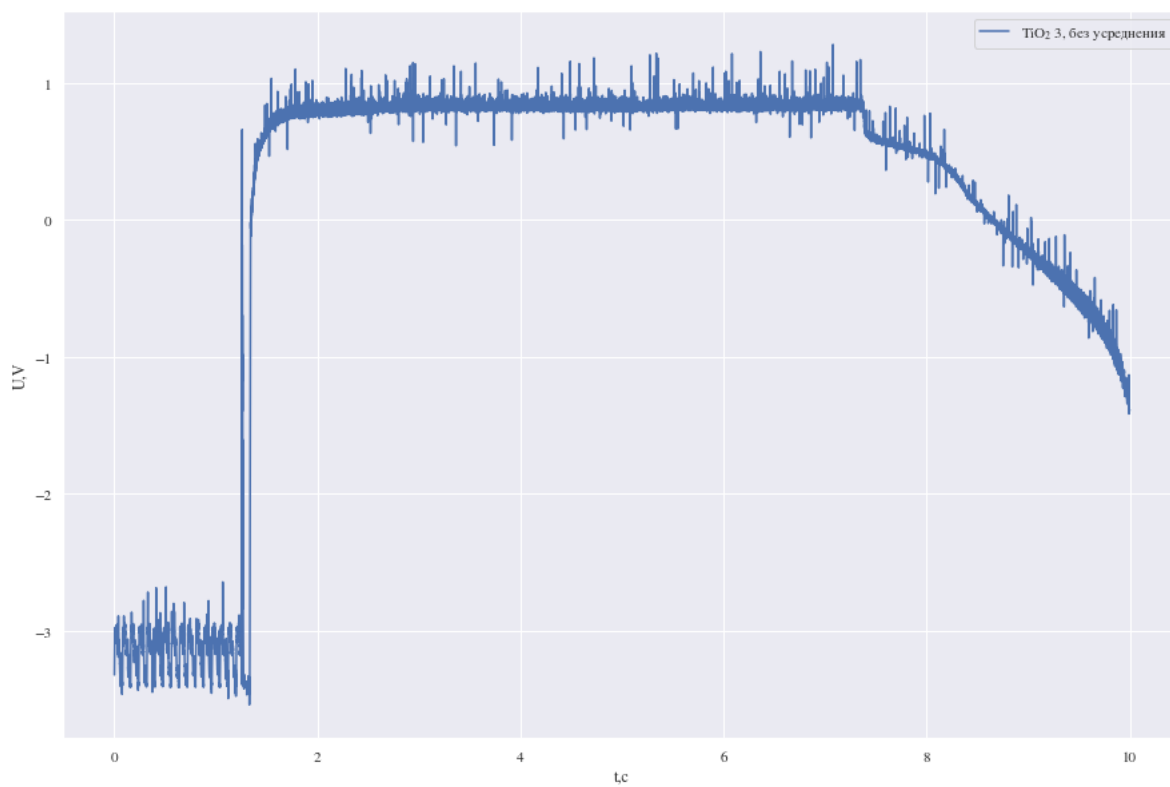


Рисунок 28 – Термограмма TiO<sub>2</sub>, без усреднения (опыт 3)

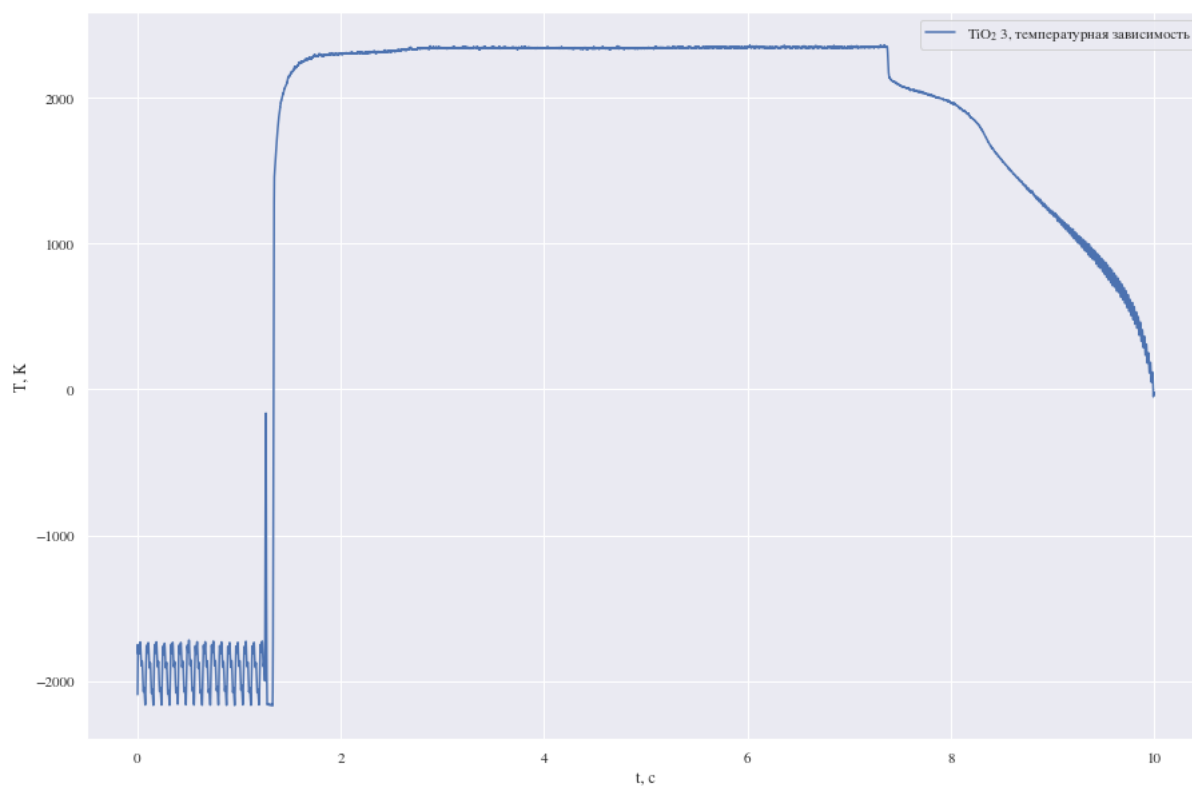


Рисунок 29 – Термограмма  $\text{TiO}_2$ , с усреднением (опыт 3)

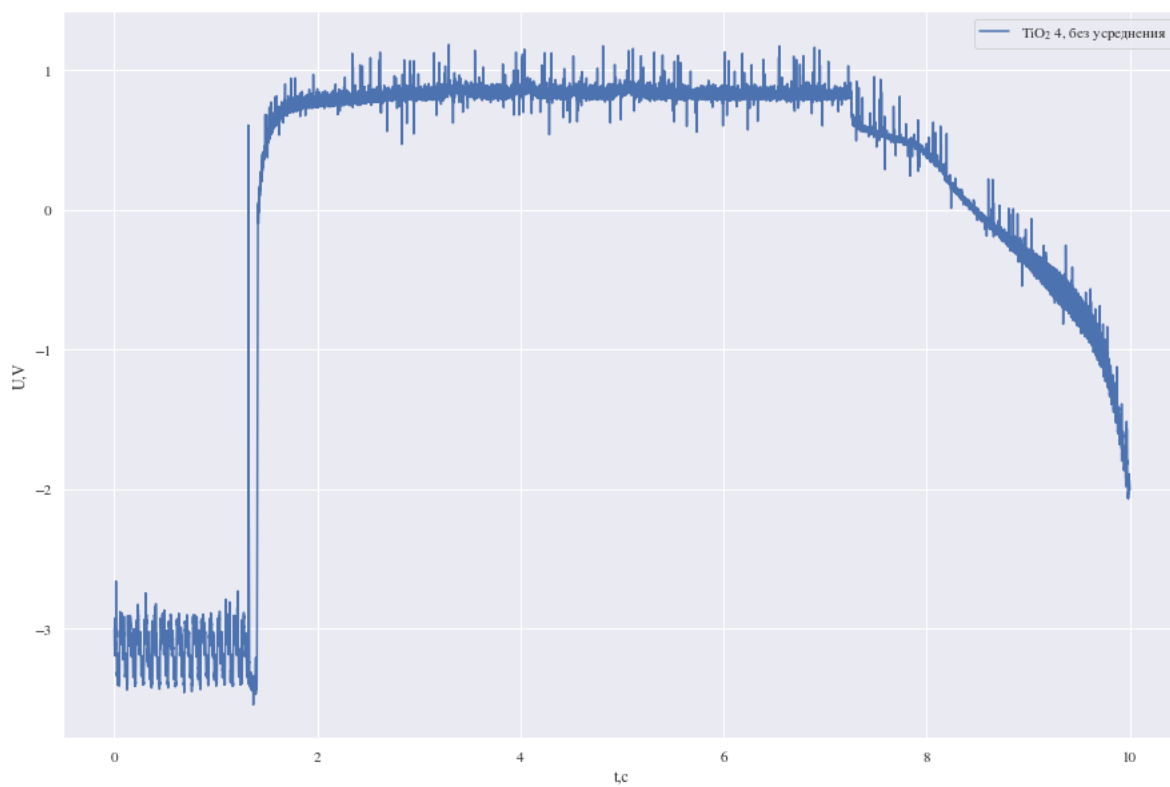


Рисунок 30 – Термограмма  $\text{TiO}_2$ , без усреднения (опыт 4)

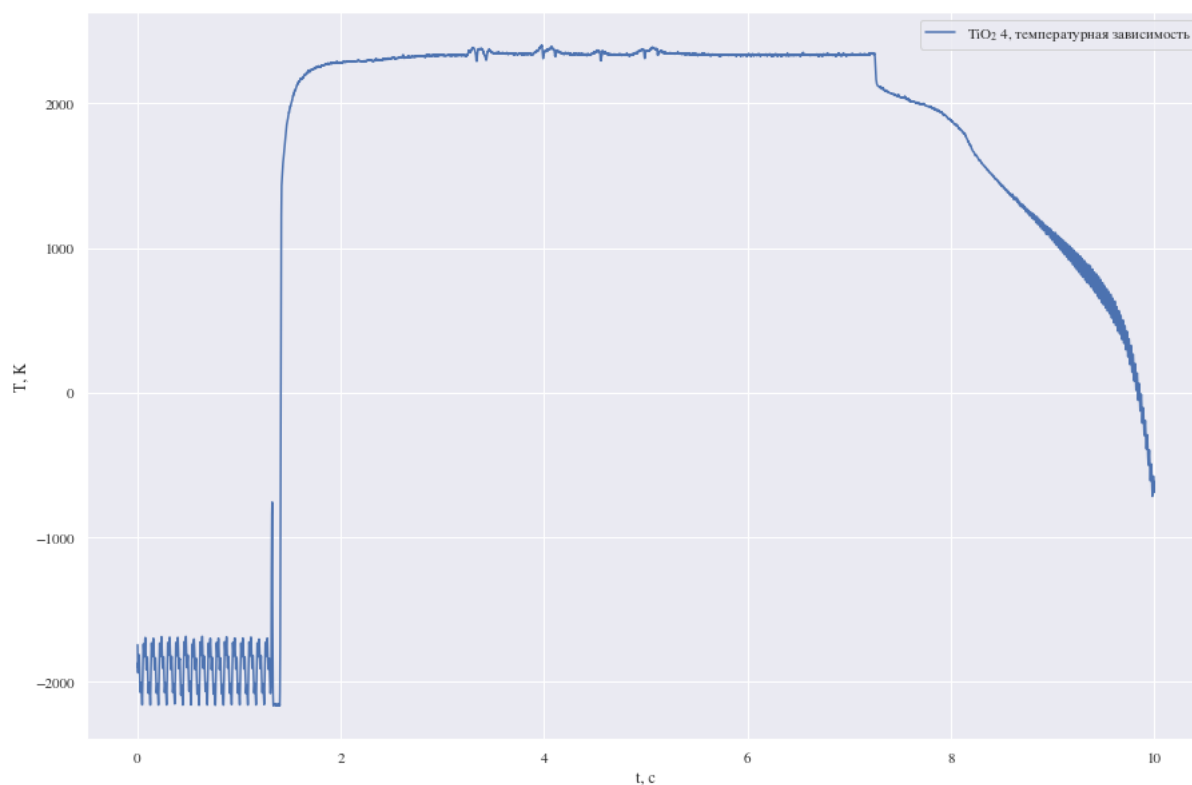


Рисунок 31 – Термограмма  $\text{TiO}_2$ , с усреднением (опыт 4)

## 6 Список литературы

1. Измерение высоких температур методом яркостной пирометрии: лабораторная работа / сост. П.С. Вервикишко. - М.: МФТИ, 2016. - 20 с.