

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Самсонова Алина Николаевна¹, Тришин Роман Александрович² (staff@vniief.ru)

¹ НГТУ им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

² ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе решается ряд задач, связанных с получением алгоритма определения температурозависимого коэффициента теплопроводности керамики. Во-первых, проведение серии экспериментов по нагреву цилиндрического тела и фиксации температурного поля с помощью установленных термопар. Во-вторых, это проведение численного моделирования на основании данных проведенного эксперимента. Расчет представлял собой определение стационарного теплового поля с учетом нагрева модели от осевого источника тепла, а также остывание за счет излучения и конвективного охлаждения. В рамках численного расчета, в работе предлагается задание коэффициента теплопроводности кусочно-линейной зависимостью, параметры которой определяются из последовательного описания экспериментальных данных. С помощью предложенного метода определена температурная зависимость коэффициента теплопроводности, с которой удалось описать эксперименты с приемлемой точностью (погрешность не более $\pm 6\%$). Полученные данные можно использовать при численном моделировании поведения керамических материалов в условиях теплового воздействия.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, расчетно-экспериментальный метод, керамические материалы.

COMPUTATION AND EXPERIMENTAL METHOD TO FIND HEAT CONDUCTIVITY OF CERAMIC MATERIALS

Samsonova Alina Nikolaevna¹, Trishin Roman Aleksandrovich² (staff@vniief.ru)

¹ Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alexeyev, Nizhny Novgorod

² FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The report describes a number of problems related to the obtaining the algorithm to find temperature-dependent heat conductivity of ceramics. The first problem is to carry out a series of experiments on heating a cylindrical body and fix a temperature field using the installed thermocouples. The second is numerical simulation basing on the data of the carried out experiment. The computation focused on finding a steady-state thermal field with the account for the heating of the model from the heat source, and cooling down due to the radiation and convective cooling. The works suggests setting heat conductivity within numerical computation with a piecewise linear dependence, the parameters of which are determined from the consistent description of the experimental data. Using the method suggested the temperature dependence of heat conductivity is found, using which we managed to describe experiments with acceptable accuracy (the error is not more than $\pm 6\%$). The produced data can be used in numerical simulation of ceramic materials behavior under thermal effect.

Введение

Проблема утилизации твердых отходов и полезного использования продуктов ее переработки является одним из приоритетных направлений в мире. [1]. При переработке ТКО посредством пиролиза образуется твердый коксовый остаток, который

может быть повторно использован в промышленности. Одним из вариантов использования твердого углеродного остатка является его применение в качестве модифицирующей добавки к глине при производстве огнеупорных материалов. Применение данных материалов в составе огнеупорной конструкции требует определения стационарного теплового

поля. Для этого необходимо знать температурную зависимость коэффициента теплопроводности.

Существуют различные подходы к получению коэффициента теплопроводности (КТ), наибольшую популярность получил экспериментальный метод цилиндрического слоя. В данном методе осуществляется осевой нагрев цилиндрического образца с фиксацией температуры на оси и на внешней поверхности цилиндра. Далее, исходя из равенства теплового потока на внутренней и внешней поверхности цилиндра, определяется коэффициент теплопроводности. Но важным допущением данного метода является независимость функции коэффициента теплопроводности от температуры. Что критично для сложных материалов с нелинейными теплофизическими свойствами.

В данной работе предлагается комбинированный подход определения КТ керамического материала, основывающийся на использовании экспериментальных данных в численном моделировании. Для проведения численных расчетов применяется цифровой продукт «Логос Тепло», который предназначен для инженерного анализа процессов теплопроводности в твердых телах. Коэффициент теплопроводности расчетной модели задавался кусочно-линейным распределением и анализировались результаты расчета и экспериментальных данных

Экспериментальная часть

Для экспериментального определения КТ исследуемого материала был выбран метод цилиндрического слоя. Зная геометрические характеристики образца, тепловой поток, проходящий через цилиндрическую стенку и температуры на внешней и внутренней границе образца, были получены экспериментальные значения коэффициента теплопроводности. Схема представлена на рис. 1.

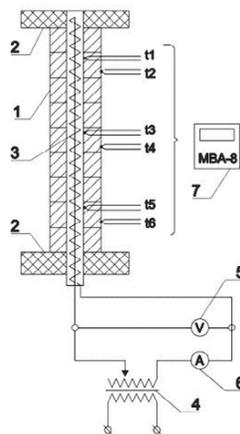


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения КТ: 1 – исследуемый материал, девять колец; 2 – теплоизолирующие втулки; 3 – электронагреватель патронный (ТЭНП); 4 – автотрансформатор; 5 – вольтметра; 6 – амперметр

Согласно методу, исследуемому материалу придали форму цилиндрического слоя, набранного из девяти коротких колец 1, рис. 1, плотно прилегающих друг к другу. Длина рабочего участка образца составила 200 мм. Внутренний диаметр исследуемого образца $d1 = 15$ мм, а наружный диаметр $d2 = 45$ мм. Для уменьшения тепловых потерь на торцах нагревателя установили теплоизолирующие втулки 2. Внутри материала разместили ТЭНП 3, создающий равномерно распределенный по длине образца тепловой поток. При установившемся состоянии системы все количество теплоты, которое выделяется в электронагревателе, проходит через цилиндрический слой материала.

В ходе эксперимента на трансформаторе меняется напряжение, сила тока, соответственно менялась мощность и температура внутренней и внешней поверхности образца. Данные эксперимента сведены в табл. 1

Таблица 1

Экспериментальные данные

Напряжение, В	Мощность, Вт	Внешняя температура, К	Внутренняя температура, К
20	2,40	298,80	306,09
30	6,00	307,02	321,91
40	11,20	318,05	344,50
50	18,00	330,87	365,86
60	26,40	343,53	392,00
70	36,40	360,18	428,21
80	48,00	374,68	453,85
90	61,20	392,20	491,50
100	76,00	409,21	527,14
110	92,40	423,59	562,99
120	110,40	439,92	599,82
130	130,00	465,19	653,68
140	151,20	480,34	690,14
150	174,00	498,23	739,62
160	198,40	513,13	786,95
170	222,70	535,21	858,39
180	248,40	548,52	899,44
190	277,40	567,69	962,74
200	310,64	580,91	996,77

Численное моделирование на основе экспериментальных данных

Далее для определения КТ керамического состава на основе экспериментальных данных, применяется численное моделирование в отечественном пакете программ (ПП) ЛОГОС для инженерного анализа. ПП ЛОГОС обладает широким набором решателей для моделирования различных физических процессов. Для решения задач теплопередачи в твердых телах применяется цифровой продукт ЛОГОС ТЕПЛО. Подготовка задачи включала в себя подготовку геометрической модели, построение сеточной модели, задание свойств веществ, определение начальных и граничных условий.

Поскольку в эксперименте происходит анализ установившихся во времени показаний термомпар, то в качестве расчетной модели проведенного эксперимента предлагается стационарная задача теплопроводности цилиндрического слоя. Расчетная схема представлена на рис. 2.

Рассмотрим цилиндрический слой длиной l . Внутренний диаметр исследуемого образца $d1$, а наружный диаметр $d2$. КТ материала λ зависит от температуры. Эксперимент проводился в закрытом помещении при температуре воздуха приблизительно равной $20\text{ }^\circ\text{C}$, на наружной поверхности стенки заданы смешанные граничные условия: III-го рода и излучение. Параметры которых – температура среды T_Σ и коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$. Внутри цилиндрического слоя установлен патронный электронагреватель, который питается через автотрансформатор. Его тепловое влияние на внутреннюю поверхность цилиндрического слоя моделируется заданием граничного условия II-го рода – удельный тепловой поток q .

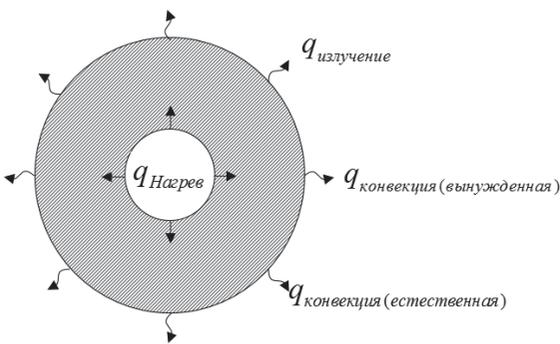


Рис. 2. Расчетная схема

Описание расчетной модели

Длина цилиндрического слоя $l = 200\text{ мм}$. Внутренний диаметр исследуемого образца $d1 = 15\text{ мм}$, а наружный диаметр $d2 = 45\text{ мм}$. Для уменьшения тепловых потерь на торцах задаются теплоизолирующие стенки. Сеточная модель представляет собой блочно-регулярную сетку, содержащая 96000 ячеек. На рис. 3

представлена сеточная модель цилиндрического слоя, а на рис. 4 – фотография проведения эксперимента по нахождению КТ.

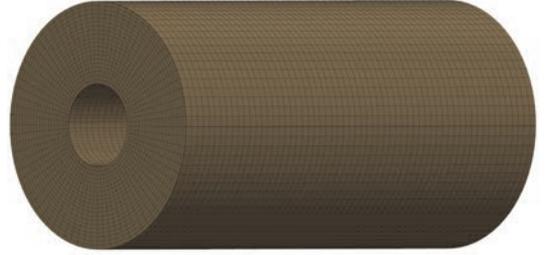


Рис. 3. Сеточная модель цилиндрического слоя



Рис. 4. Фотография экспериментальной установки

Описание граничного условия

Для условий экспериментальной установки сложный теплообмен от наружной поверхности полой трубы в окружающую среду происходит одновременно за счет излучения, а также естественной и вынужденной конвекции. Как правило в такой ситуации необходимо проводить сопряженный расчет теплопроводности и аэродинамики. В данном случае используется инженерный подход учета внешней газодинамики, основывающийся на критериальных уравнениях через коэффициенты подобия.

Тепловой поток, соответствующий конвективному теплообмену:

$$q_{\text{конвекция}}(T_f) = \alpha_k(T_f)(T_\Sigma - T_f), \quad (1)$$

где T_Σ – температура окружающей среды, T_f – температура поверхности цилиндра.

Коэффициент конвективной теплоотдачи находится по формуле:

$$\alpha_k(T_f) = \frac{\lambda}{R_0} \text{Nu}(T_f), \quad (2)$$

где R_0 – определяющий (характерный) размер, м; λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К).

Число Нуссельта представляет собой комбинацию Чисел Нуссельта соответствующих разным ре-

жимам теплообмена тела с окружающей средой (вынужденная и естественная конвекция):

$$Nu(T_f) = Nu_{\text{естественная}}(T_f) + Nu_{\text{вынужденная}}. \quad (3)$$

Для естественной конвекции около цилиндрического тела число Нуссельта определяется с помощью следующего выражения [5]:

$$Nu(T_f) = \left(0,6 + \frac{0,387(Ra(T_f))^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2, \quad (4)$$

где Ra – число Рэлея, которое по определению равняется:

$$Ra(T_f) = Gr(T_f) Pr, \quad (5)$$

где Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля.

Число Грасгофа определяется по формуле:

$$Gr(T_f) = \frac{gR_0^3}{\nu^2} \beta |T_f - T_\Sigma|, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; ν – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, $\text{м}^2/\text{с}$; β – коэффициент объемного расширения флюида, $1/\text{К}$.

Теплофизические свойства текучей среды и критерий Прандтля находят при определяющей температуре T_0 в справочных таблицах. Коэффициент объемного расширения капельных жидкостей приведен в справочных таблицах в зависимости от температуры текучей среды, а для газов его рассчитывают по формуле:

$$\beta = \frac{1}{T_0}. \quad (7)$$

При устранении неопределенностей в расчете, связанных с граничными условиями, было обнаружено, что коэффициент теплообмена помимо слагаемых, отвечающих естественной конвекции, содержит константу. Предполагается, что данная константа соответствует наличию вынужденной конвекции, вызываемой внешним обдувом в экспериментальном помещении. Поскольку все эксперименты проводились при одинаковых условиях, то данная константа, подобранная для первого эксперимента, применялась такой же для расчета последующих экспериментов.

Подобранное значение константы соответствующей Числу Нуссельта отвечающей вынужденной конвекции, равняется:

$$Nu = 14,74. \quad (8)$$

Что соответствует скорости воздуха в помещении:

$$V = 0,28 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (9)$$

Величина числа Нуссельта рассчитывается через критериальное соотношение для вынужденной конвекции около цилиндрического тела [5]:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right)^{\frac{4}{5}}. \quad (10)$$

Учет на поверхности тела теплообмена излучением в цифровом продукте Логос Тепло выполняется с помощью модели излучения серого тела:

$$q_{\text{излуч}}(T_f) = \varepsilon \sigma (T_\Sigma^4 - T_f^4), \quad (11)$$

где ε – степень черноты керамического образца; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$.

Для того чтобы учесть энергию нагревателя в численном решении, необходимо перевести мощность нагревателя в тепловой поток, разделив ее на площадь внутренней поверхности цилиндра, формула (12):

$$q_{\text{нагрев}} = \frac{P_{\text{н}}}{S} = \frac{P_{\text{н}}}{2\pi R_0 L}. \quad (12)$$

Технология определения КТ с помощью численного моделирования

Для определения КТ численным методом, будем варьировать параметры табличной зависимости КТ в расчете. В ЛОГОС ТЕПЛО при задании параметра табличной зависимостью указывается значение независимой величины (в данном случае это температура) и соответствующее значение зависимой величины (в данном случае это КТ), как это показано на рис. 5. КТ для промежуточных значений температур определяются линейной интерполяцией.

T	λ
299	0,5
307,02	0,6
321,91	0,6
344,5	0,7
365,86	1
392	1
428,21	1
453,85	1
491,5	1
527,14	1,4
562,99	1,4
599,82	1,4
620	1
690,14	1,1
739,62	1,3
786,95	1,4
858,39	1,4
899,44	1,4
952,74	1,4
996,77	1,4

Рис. 5. Табличная зависимость КТ в ЛОГОС ТЕПЛО

Для определения КТ керамического образца с пиролизным наполнителем использовался следующий алгоритм:

1) Проводится расчет для минимальной мощности нагревателя, в котором реализуется минимальный градиент температуры по толщине цилиндрического слоя и делается предположение, что на данном перепаде температур КТ постоянен (рис. 6).

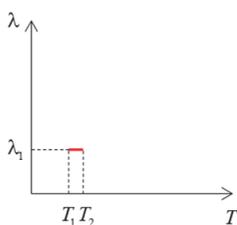


Рис. 6. Распределение КТ для первого эксперимента

2) Подбирается КТ таким образом, чтобы минимизировать отклонения температур соответствующих приграничных ячеек от температур термпар на внутренней и внешней поверхности цилиндрического слоя.

3) В таблице КТ формируются диапазон температур, реализовавшийся в первом расчете, и записывается константный КТ.

4) Далее проводится расчет с увеличенной мощностью нагревателя и в таблице КТ создается новая строка с максимальной температурой, реализовавшаяся в данном расчете, и подбирается новый КТ соответствующий данной температуре (рис. 7).

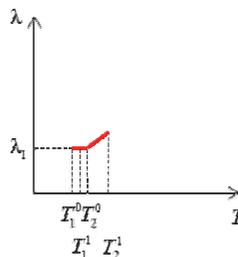


Рис. 7. Распределение КТ для второго эксперимента

5) Таким образом просчитываются все эксперименты, с постепенным добавлением новых более высоких температур в таблицу КТ и соответствующие им КТ (рис. 8).

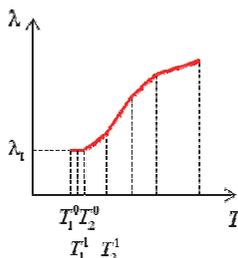


Рис. 8. Результирующее распределение КТ

Используя значение теплового потока, и ориентируясь на совпадение температуры на внутренней поверхности исследуемого материала, был подобран КТ для каждого эксперимента. Результаты численного решения для всех экспериментов занесены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты численного решения

Напряжение, В	$q, \text{Вт/м}^2$	$T, \text{К}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
20	254,648	306,09	0,5
30	636,62	307,02	0,6
40	1188,357	321,91	0,6
50	1909,859	344,5	0,7
60	2801,127	365,86	1
70	3862,16	392	1
80	5092,958	428,21	1
90	6493,522	453,85	1
100	8063,85	491,5	1
110	9803,944	527,14	1,4
120	11713,804	562,99	1,4
130	13793,428	599,82	1,4
140	16042,818	620	1
150	18461,973	690,14	1,1
160	21050,894	739,62	1,3
170	23629,204	786,95	1,4
180	26356,059	858,39	1,4
190	29433,054	899,44	1,4
200	32959,928	952,74	1,4

На рис. 9 изображено поле температуры для цилиндрического слоя при напряжении 30В.

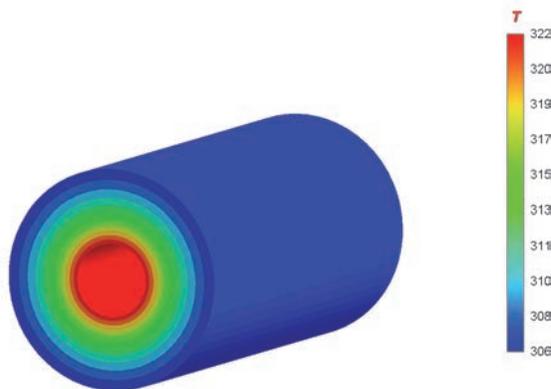


Рис. 9. Поле температуры [K] для цилиндрического слоя (напряжение 30В)

Аналогично были получены температуры для напряжений 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 В.

Используя результаты численного моделирования, был построен график температурной зависимости численного КТ от температуры (рис. 10).

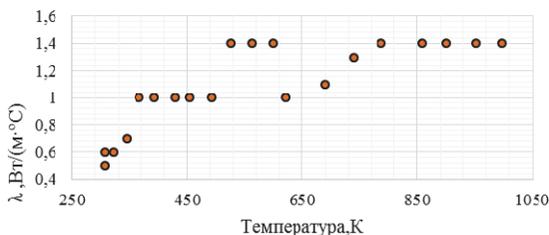


Рис. 10. Результирующая температурная зависимость КТ

На рис. 11 и рис. 12 представлены графики сравнения температур внутренней поверхности цилиндрического слоя с температурами, полученными в ходе расчета итогового КТ в ЛОГОС ТЕПЛО.

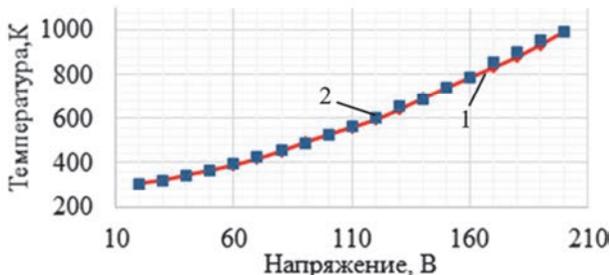


Рис. 11. График сравнения температур внутренней поверхности цилиндрического слоя: 1 – ЛОГОС (КТ – внутренняя температура), 2 – эксперимент

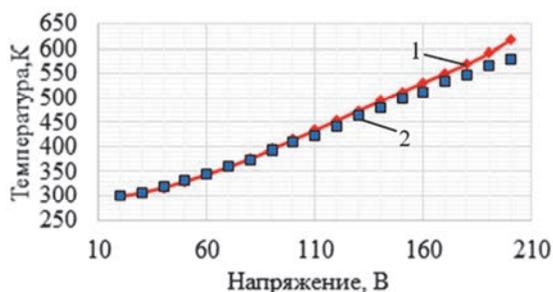


Рис. 12. График сравнения температур внешней поверхности цилиндрического слоя: 1 – ЛОГОС (КТ – внутренняя температура), 2 – эксперимент

Из рис. 11 и рис. 12 видно, что на внутренней поверхности цилиндрического слоя имеется хорошее согласие результата расчета и эксперимента. Максимальная относительная погрешность составляет менее 5 %. На внешней поверхности согласие результатов расчета и экспериментальных данных падает с увеличением реализовавшихся температур. Максимальная относительная погрешность составляет не более 6,5 %.

Аппроксимируем график кривой коэффициента теплопроводности полиномиальной зависимостью и сравним результаты расчета и показания экспериментов (рис. 13–15).

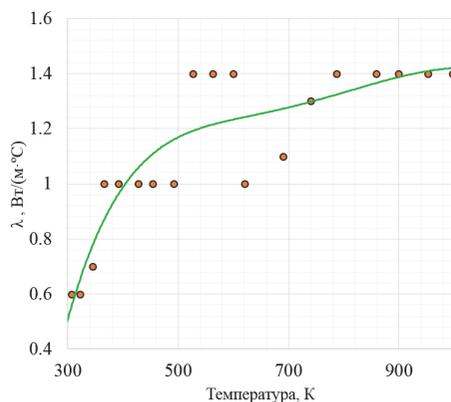


Рис. 13. Аппроксимация полиномиальной функцией

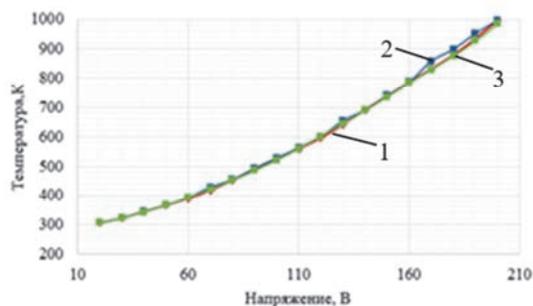


Рис. 14. График сравнения температур внутренней поверхности цилиндрического слоя: 1 – ЛОГОС, 2 – эксперимент, 3 – Тренд

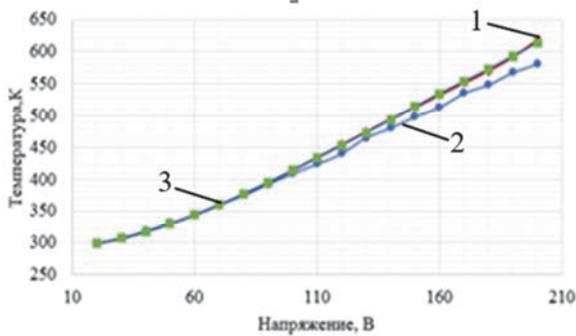


Рис. 15. График сравнения температур внешней поверхности цилиндрического слоя: 1 – ЛОГОС, 2 – эксперимент, 3 – Тренд

Результаты расчета, полученные с результирующим коэффициентом теплопроводности и с полиномиальным распределением имеют хорошее согласие. Объяснением этого, является тот факт, что моделирование первого эксперимента проводилось с постоянным КТ. Для компенсации задержанной энергии при постоянном КТ в последующих экспериментах задается завышенный КТ, что вызывает снижение проводимой энергии при более высоких температурах, возникают «осцилляции» КТ (рис. 16).

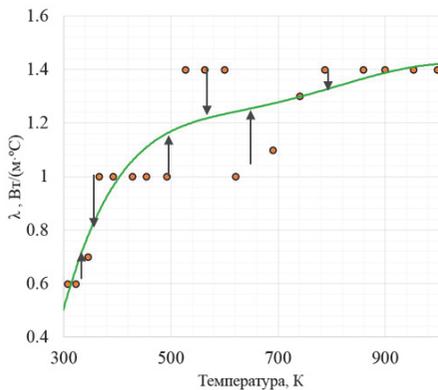


Рис. 16. Осцилляции результирующего КТ

В качестве перспективы развития данной работы планируется автоматизация определения функции КТ с помощью параметрической оптимизации. Данный функционал развивается в модуле ЛОГОС ПЛАТФОРМА, и проведение совместного расчета ЛОГОС ТЕПЛО и ЛОГОС ПЛАТФОРМА позволило бы избежать указанных осцилляций. Тем не менее, полученный коэффициент теплопроводности и его полиномиальная аппроксимация позволяют с прием-

лемой точностью описать экспериментальные данные, что говорит о работоспособности предлагаемого алгоритма.

Заключение

В заключении хочется отметить, что в рамках проделанной работы предложен алгоритм экспериментально-расчетного определения нелинейного коэффициента теплопроводности керамического материала. На основании показаний температур внутренней и внешней поверхности цилиндрического слоя проведена серия расчетов в цифровом продукте ЛОГОС ТЕПЛО с кусочно-линейным коэффициентом теплопроводности. В расчете учитывался, нагрев образца за счет патронного электронагревателя, а также остывание керамики за счет излучения, естественной и вынужденной конвекции. Применение данного распределения коэффициента теплопроводности позволило с приемлемой точностью (погрешность не более 6,5 %) описать экспериментальные данные, что говорит о применимости данного алгоритма при проведении производственных расчетов.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по направлению «Математическое моделирование на супер-ЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности».

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mnr.gov.ru/gosdoklad-eco-2015>.
2. Бухмиров В. В. Исследование теплоотдачи в условиях свободной конвекции на горизонтальном цилиндре, учеб. пособие. Иваново: ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2014. С. 360.
3. Цифровой продукт ЛОГОС-ТЕПЛО [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://logos.vniief.ru/products/heat>.
4. Цифровой продукт ЛОГОС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://logos.vniief.ru/products/logos>.
5. Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar. Heat and mass transfer: Fundamentals & Applications. McGraw-Hill Education, 2015.