

УДК 504.064.36

doi 10.54708/22259309\_2025\_23387

## К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕЧЕЙ

А. Ю. Мухамадеева<sup>1</sup>, А. Р. Хамидуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>azaliliya13@mail.ru, <sup>2</sup>khamidullinar@uust.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)

**Аннотация:** В работе предложен метод расчета высокотемпературных камерных печей с учетом зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры в виде полинома пятой степени, который содержит шесть неизвестных постоянных, подлежащих определению в специальной установке. В работе даются описание такой установки и значения коэффициентов полинома, коэффициента теплопроводности нового спроектированного волокнистого материала с более лучшими характеристиками по сравнению с подобными материалами, предложенными и исследованными в ЦАГИ [1]. Приведен расчет печи кубической формы с двухслойной футеровкой на 27 литров с учетом долговечности слоев при температурах до 1800 °С. Предложен метод компьютерного управления температурой в печи.

**Ключевые слова:** высоко огнеупорные материалы; коэффициент теплопроводности как полином температуры пятой степени; проектирование печей с учетом долговечности материалов при высоких температурах; непрерывное управление высоко температурными печами и агрегатами.

### ФУНКЦИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

При высоких температурах коэффициент теплопроводности становится функцией температуры и экспериментально невозможно измерить коэффициент теплопроводности при заданной температуре, так как даже внутри тонкого слоя испытуемого материала за счет перепада температур значения коэффициента теплопроводности по слоям разные, и мы измерим некую среднюю величину для температур между максимальной температурой и минимальной температурой на поверхности испытуемого материала. Так что изначально мы должны измерять не числовое значение коэффициента теплопроводности, а функцию температуры. Группой ученых ЦАГИ была предложена такая установка для определения функции теплопроводности в виде полинома второй степени от температуры [1]. Особенностью установки является автоматический подогрев боковых участков плоского квадратного испытуемого материала с тем, чтобы исключить боковой уход тепла от центрального нагревателя и обеспечить плоский однородный поток тепла через испытуемый материал при известной мощности центрального нагревателя, которая целиком превращается в плоско-параллельный поток тепла. Баланс температур контролируют 50 термопар, передающих сигналы в управляющий нагревателями компьютер. При измерениях задаются ряд значений мощности центрального нагревателя, при каждом значении мощности достигается стационарный режим, при котором измеряются температуры на сторонах квадратной пластины испытуемого материала. Каждое измерение дает линейное неоднородное алгебраическое уравнение, а несколько измерений, покрывающих интересующий интервал температур, дают систему неоднородных линейных уравнений относительно неизвестных трех коэффициентов полинома. Однако, как мы убедились на основе собственных измерений, такая система оказалась не совместной. Причина, на наш взгляд, не в

погрешностях измерений, а в том, что коэффициент теплопроводности является не полиномом второй степени температуры, а полиномом пятой степени. Дело в том, что при высоких температурах основным механизмом передачи тепла становится передача излучением (переизлучением), которая, согласно закону Больцмана, пропорциональна четвертой степени температуры. Но поглотительная способность материалов, играющая важную роль в процессах переизлучения, имеет для разных материалов свои спектральные характеристики, а спектр теплового излучения зависит от температуры по закону Планка с коэффициентом серости.

Наша установка для измерения функции коэффициента теплопроводности имеет сферическую форму для минимизации «бокового» ухода тепла и представлена на рис. 1.



Рис. 1. Установка для измерения функции коэффициента теплопроводности волокнистых огнеупоров

Установка состоит из керамического шарового слоя из высоко огнеупорной оксидной керамики с внутренним диаметром 200 мм и внешним диаметром 230 мм. Он установлен на керамических трубках, внутри которых проходят медные провода, подводящие ток к дисилицид молибденовому нагревателю, расположенному внутри сферы. Поверх керамической сферы расположен металлический кожух из тонкой жести, скроенной, как лепестки Гаусса. Кожух прижимает волокнистый материал к корундовой сфере и в прижатом состоянии имеет диаметр 250 мм так, что толщина испытуемого волокнистого материала составляет 10 мм. Трубчатые держатели сферы закреплены в каркасе из металлического профиля. Напряжение на нагреватели подается через автотрансформатор и измерительный комплекс К-50, при помощи которого измеряется электрическая мощность нагревателя и контролируются ток и напряжение. Для исключения конвективного уноса тепла верхнюю трубку затыкаем смесью глинозема с ортофосфорной кислотой. Уход тепла через трубы становится незначительным, и в расчетах электрическую мощность принимаем за мощность теплового потока через сферу, имеющую также сферическую симметрию. При этих условиях для определения коэффициентов функции теплопроводности

$$\lambda = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5, \quad (1)$$

получаем уравнение для каждого измерения с номером  $k$

$$c_0(T_k(r_1) - T_k(r_2)) + c_1 \frac{1}{2}(T_k(r_1)^2 - T_k(r_2)^2) + c_2 \frac{1}{3}(T_k(r_1)^3 - T_k(r_2)^3) + c_3 \frac{1}{4}(T_k(r_1)^4 - T_k(r_2)^4) + c_4 \frac{1}{5}(T_k(r_1)^5 - T_k(r_2)^5) + c_5 \frac{1}{6}(T_k(r_1)^6 - T_k(r_2)^6) = P_k \left( \frac{1}{4\pi r_1} - \frac{1}{4\pi r_2} \right) \quad (2)$$

При каждом значении мощности, начиная с малых, дожидаемся установления стационарного режима, при котором температуры внутреннего и внешнего слоя испытуемого волокнистого материала остаются неизменными, и их значения заносим в таблицу данных испытаний. Значения мощности подбираем так, чтобы внутренние температуры, измеряемые термопа-

рами, подключаемыми к микроамперметру, нормированному на градусы Цельсия по эталонной термопаре, покрывали своими значениями весь интересующий нас интервал температур. Но не менее шести измерений. В результате уравнение (2) даст нам неоднородную систему линейных алгебраических уравнений с неизвестными коэффициентами  $c_k, k = 0..5$ , которую решаем при помощи математической системы Maple13.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКО ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕЧИ

Наиболее эффективным для футеровки высокотемпературных печей с рабочей температурой до 1800 °С является волокнистый материал из кубического оксида циркония, стабилизированного 4 % иттрием, производимого в большом объеме в КНР. Для защиты волокнистого материала от высоких температур и механических повреждений, как и для обеспечения механической прочности в отношении закладки, требуется внутренняя оболочка в виде муфеля или камеры из плотной оксид циркониевой керамики. И порошок, и волокнистый материал из оксида циркония имеют соизмеримую стоимость за один килограмм веса, но разную плотность. Оптимальная плотность волокнистого материала, при которой перенос тепла конвекцией в порах минимален, составляет, по данным исследований ЦАГИ [1], 160 кг/м<sup>3</sup>, а плотный черепок из оксида циркония имеет плотность 2300 кг/м – выше в 15 раз. Даже небольшой толщины муфель составляет большую часть стоимости печи. Волокнистый материал, имеющий малое значение функции теплопроводности, даже при высоких температурах позволяет делать футеровку печи малых площадей и с малым весом, по сравнению с другими огнеупорными материалами, а это дает преимущества печи в экономичности, так как меньший тепловой поток будет уходить с кожуха печи, и меньшее время разогрева, что также повышает КПД печи. Однако, как сказано выше, при высоких температурах важную роль в уменьшении теплового потока имеют поглотители теплового излучения. Так, нами подобран порошок в качестве высокотемпературного поглотителя, который в основном состоит из карбида кремния. Как показали измерения, добавление 5% порошка по весу в волокнистый теплоизолятор из оксида циркониевого волокна снижает значения коэффициента теплопроводности при высоких температурах.

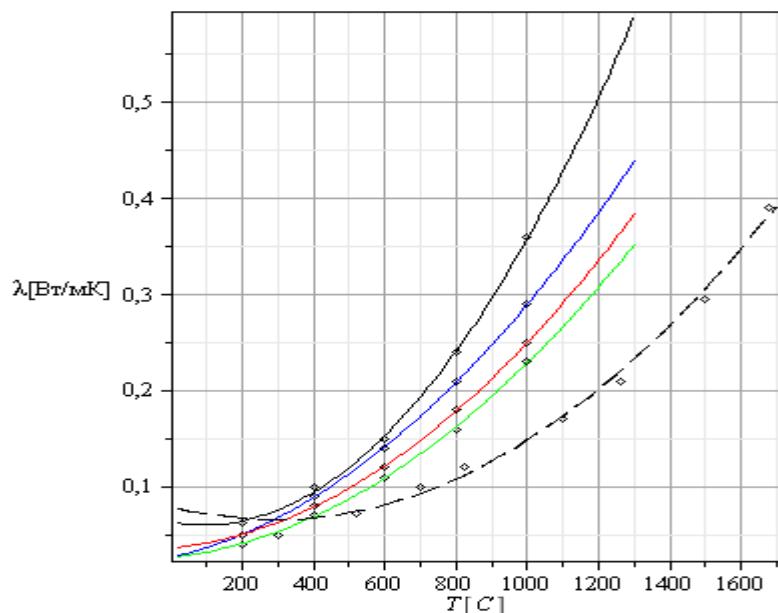
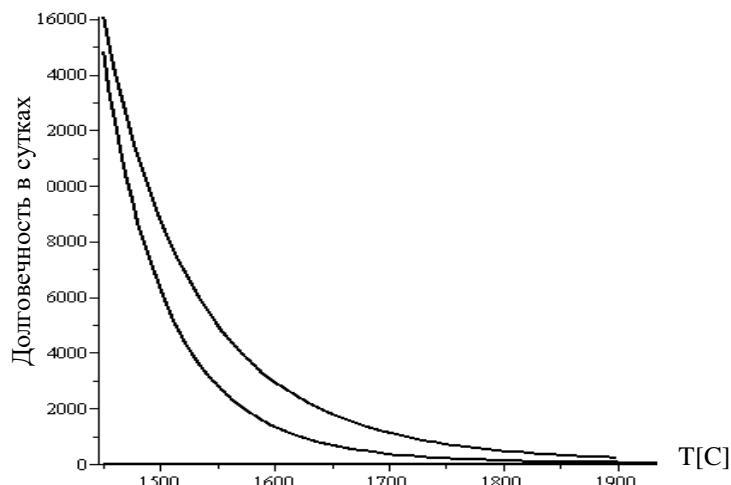


Рис. 2. Графики функции коэффициента теплопроводности для волокнистых материалов. Сплошные линии без поглотителя излучения, пунктирная линия при добавлении 5 % карбид кремниевого порошка

Также совершенно новым в проектировании высокотемпературных печей является учет долговечности материалов при температурах в слоях футеровки. Учет долговечности основан

на точных расчетах по формулам долговечности, скорости рекристаллизации и размеров зерен в зернистой структуре материала с учетом его пористости, полученных нами [2–3].

По нашим расчетам [3], срок службы муфеля из таких материалов в зависимости от температуры печи определяется графиками:



**Рис. 3.** Долговечность в сутках оксид циркониевой керамики, стабилизированной иттрием (верхний график), и корундовой керамики (нижний график) в зависимости от температуры эксплуатации в градусах Цельсия

При температурах  $T=1800$   $^{\circ}\text{C}$  срок службы оксид циркониевой керамики, стабилизированной оксидом иттрия  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . 4 % состава составляет 1800 суток, или 43 300 часов непрерывной работы. Долговечность муфеля из корундовой плотной спечённой керамики при температуре  $T=1800$   $^{\circ}\text{C}$  составляет 500 суток, или 12 000 часов непрерывной работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.: ил.; 21 см. Библиогр.: с. 512–516 (220 назв.). Предм. указ.: с. 517–518. 02.50.
2. Марченко В. Л. Справочник конструктора штампов: листовая штамповка / В. Л. Марченко [и др.]; под ред. Л. И. Рудмана. М.: Машиностроение, 1988. 495 с.: ил.; 21 см. (Библиотека конструктора). Библиогр.: с. 487–489. ISBN 5-217-00249-2.
3. Стеблюк В. И. Технология листовой штамповки: Учебное пособие для вузов / В.И. Стеблюк, В.Л. Марченко, В.В. Белов, А.Г. Марченко, А.Г. Грибачевский. Киев: Вища школа, 1983. 280 с.: ил.; 21 см.
4. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением» / под ред. А. Н. Банкетова, Е. Н. Ланского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1982 . 576 с.: ил.; 21 см. Библиогр.: с. 563–564 (47 назв.). Предм. указ.: с. 565–568.

#### ОБ АВТОРАХ

МУХАМАДЕЕВА Азалия Юлаевны, студ. каф. МифМ.

ХАМИДУЛЛИН Айдар Раифович, к/н, доцент МифМ.

#### METADATA

**Title:** TO THE DESIGN OF HIGH-TEMPERATURE FURNACES

**Author:** A.Yu. Mukhamadeeva<sup>1</sup>, A.R. Khamidullin<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>azaliliya13@mail.ru, <sup>2</sup>khamidullinar@uust.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (33), pp. 87-91, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The paper proposes a method for calculating high-temperature chamber furnaces, taking into account the dependence of thermal conductivity coefficients on temperature in the form of a polynomial of the fifth degree, which contains six unknown constants to be determined in a special installation. The paper describes such an installation and the values of the coefficients of

the polynomial, the coefficient of thermal conductivity of a new designed fibrous material with better characteristics compared to similar materials proposed and studied in the CAGO [1]. A calculation of a cubic furnace with a two-layer lining for 27 liters is given, taking into account the durability of the layers at temperatures up to 1800 °C. A method of computer temperature control in the furnace is proposed.

**Keywords:** highly refractory materials, thermal conductivity coefficient as a temperature polynomial of the fifth degree, furnace design taking into account the durability of materials at high temperatures, continuous control of high temperature furnaces and aggregates.

**About authors:**

**MUKHAMADEEVA Azaliya Yulaevna**, student, Dept. of MATERIALS SCIENCE AND PHYSICS OF METALS (UUST).

**KHAMIDULLIN Aidar Raifovich**, associate professor, Dept. of MATERIALS SCIENCE AND PHYSICS OF METALS (UUST).