

УДК 666.3.017

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 81.09

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN oguney

DOI 10.62980/2076-0655-2025-139-145

## НОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЕЧЕЙ

Шаяхметов У.Ш.<sup>1</sup>, Захаров А.В.<sup>1</sup>, Кутлияров Д.Н.<sup>2</sup>, Анваров А.Р.<sup>3</sup>, Недосеко И.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий,

<sup>2</sup> Башкирский государственный аграрный университет

<sup>3</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет

### АННОТАЦИЯ

Предложен новый материал из оксид циркониевых волокон с порошком из карбида кремния в качестве поглотителя теплового излучения, обеспечивающего снижение коэффициента теплопроводности при высоких температурах. Малый вес и малая толщина теплоизоляционного слоя позволяют проектировать высоко температурные печи уменьшенного веса и внешних размеров, что снижает тепловые потери как при разогреве печи, так и в стационарном режиме. Малый вес футерованного материала значительно снижает его стоимость при гарантии долговечности непрерывной работы при температурах печи 1800 °С 500 суток. Предложен метод расчета печи при проектировании футеровки, с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры в виде полинома пятой степени. 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. Приведено описание высокотемпературной такой установки и значения коэффициентов полинома коэффициента теплопроводности нового спроектированного волокнистого материала с улучшенными характеристиками.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высокоогнеупорные материалы, коэффициент теплопроводности как полином температуры пятой степени, проектирование печей с учетом долговечности материалов при высоких температурах, непрерывное управление высоко температурными печами и агрегатами.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шаяхметов У.Ш., Захаров А.В., Кутлияров Д.Н. Анваров А.Р., Недосеко И.В. Новые керамические материалы для высокотемпературных печей // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 139-145. DOI 10.62980/2076-0655-2025-139-145, EDN oguney

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PK MATERIALS SCIENCE, CERAMICS

EDN oguney

DOI 10.62980/2076-0655-2025-139-145

## NEW CERAMIC MATERIALS FOR HIGH-TEMPERATURE FURNACES

Shayakhmetov U.Sh.<sup>1</sup>, Zakharov A.V.<sup>1</sup>, Kutliyarov D.N.<sup>2</sup>, Anvarov A.R.<sup>3</sup>, Nedoseko I.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology, <sup>2</sup> Bashkir State Agrarian University

<sup>3</sup> Ufa State Petroleum Technical University

### ABSTRACT

A new material made of zirconium oxide fibers with silicon carbide powder as a thermal radiation absorber has been proposed, providing a reduction in the heat transfer coefficient at high temperatures. The low weight and low thickness of the thermal insulation layer allow the design of high temperature furnaces with reduced weight and external dimensions, which reduces heat losses both during furnace warm-up and in steady-state mode. The low weight of the lined material significantly reduces its cost while guaranteeing durability of continuous operation at furnace temperatures of 1800 °C for 500 days. A method of calculating the furnace in the design of lining, taking into account the dependence of the coefficient of thermal conductivity on temperature in the form of a polynomial of the fifth degree. The paper proposes a method of calculation of high-temperature chamber furnaces, taking into account the dependence of heat transfer coefficients on temperature in the form of a fifth-degree polynomial, which contains six unknown constants to be determined in a special installation. The description of high-temperature such installation and the values of the coefficients of the heat transfer coefficient polynomial of a new designed fiber material with improved characteristics are given.

**KEY WORDS:** high-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 units.

**FOR CITATION:** Shayakhmetov U.S., Zakharov A.V., Kutliyarov D.N., Anvarov A.R., Nedoseko I.V. New ceramic materials for high-temperature furnaces // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. 32, No2. – Pp. 139 –145. DOI 10.62980/2076-0655-2025-139-145, EDN oguney

## ВВЕДЕНИЕ

Основным требованием к компонентам огнеупоров является их устойчивость к плавлению и разложению при воздействии высоких температур. Высокая химическая устойчивость; коррозионная и эрозийная стойкость, а также низкая растворимость в расплавленном кремнезёме и жидких металлах циркония и диоксида циркония позволяют использовать их в огнеупорных материалах, работающих при высоких температурах [1].

В настоящее время большое внимание уделяется неформованным огнеупорам. Для получения подобных материалов эффективными являются материалы, обладающие вязкими свойствами [2,3].

Для производства футеровочных материалов печей и агрегатов строительного назначения требуются высоко температурные печи, для которых значение высоко эффективных теплоизоляционных материалов повышается, так как тепловые потери печи растут кратно с температурой внутри печи. На современном уровне наиболее дешёвыми и эффективными материалами являются волокнистые материалы из различных огнеупорных минералов.

**Цель или задачи исследования:** Исследовать пути повышения теплоизоляционных свойств волокнистых минеральных материалов при высоких температурах.

### Материалы и методы исследования

Исследовались волокнистые минеральные материалы из оксида циркония кубической сингонии, стабилизированного иттрием при различной её плотности и с добавлением поглотителя теплового излучения разного состава и процентного содержания. Коэффициент теплопроводности измерялся при высоких температурах как температурная функция на специально изготовленной для исследований установке. Полученные на установке результаты сравнивались с результатами подобных исследований другими авторами.

### Часть 1. 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 испытываемого материала за счет перепада температур значения коэффициента теплопроводности по слоям разные. Поэтому мы измеряем некую среднюю величину для температур между максимальной температурой и минимальной температурой на поверхности испытываемого 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 [4].

Особенностью установки является автоматический подогрев боковых участков плоского квадратного испытываемого материала с тем, чтобы исключить боковой уход тепла от центрального нагревателя и обеспечить плоский однородный поток тепла через испытываемый материал при известной мощности центрального

## INTRODUCTION

The main requirement for refractory components is their resistance to melting and decomposition when exposed to high temperatures. High chemical stability, corrosion and erosion resistance, and low solubility in molten silica and liquid metals of zircon and zirconium dioxide allow their use in refractory materials operating at high temperatures [1].

At present, much attention is paid to unmolded refractories. To obtain such materials, materials with binding properties are effective [2,3].

For the production of lining materials for furnaces and aggregates for construction purposes, high-temperature furnaces are required, for which the value of highly efficient thermal insulation materials increases, since the furnace's heat losses increase multiples with the temperature inside the furnace. At the present level, the cheapest and most effective materials are fibrous materials from various refractory minerals.

**The purpose or objectives of the study:** To investigate ways to increase the thermal insulation properties of fibrous mineral materials at high temperatures.

### Materials and methods of research

The fibrous mineral materials made of zirconium oxide of cubic zirconium syngony stabilized by yttrium at different densities and with the addition of thermal radiation absorber of different composition and percentage were investigated. The coefficient of thermal conductivity was measured at high temperatures as a temperature function on an installation specially made for research. The results obtained at the installation were compared with the results of similar studies by other authors.

### Part 1. The function of thermal conductivity.

At high temperatures, the coefficient of thermal conductivity becomes a function of temperature and it is not experimentally possible to measure the coefficient of thermal conductivity at a given temperature, since even inside a thin layer of the test material, due to the temperature difference, the values of the coefficient of thermal conductivity across the layers are different and we will measure a certain average value for temperatures between the maximum temperature and the minimum temperature on the surface of the test material. So initially we should measure not the numerical value of the coefficient of thermal conductivity, but the function of temperature. A group of TsAGI scientists proposed such an installation for determining the thermal conductivity function in the form of a polynomial of the second degree of temperature [4].

A special feature of the installation is the automatic heating of the side sections of the flat square test material in order to eliminate the lateral escape of heat from the central heater and ensure a flat homogeneous heat flow through the test material at a known power of the central heater, which is completely converted into a plane - parallel heat flow. The temperature balance is controlled by 50 thermocouples that transmit signals to the computer controlling the heaters. During

нагревателя, которая целиком превращается в плоско - параллельный поток тепла. Баланс температур контролируют 50 термодатчиков, передающих сигналы в управляющий нагревателями компьютер. При измерениях задается 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, представлена на рисунке 1.

## **РИСУНОК 1**

### **УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ ОГНЕУПОРОВ**

**Figure 1**

**An installation for measuring the function of the thermal conductivity coefficient of fibrous refractories**

Установка состоит из керамического шарового слоя из высоко огнеупорной оксидной керамики с внутренним диаметром 200мм и внешним диаметром 230мм. 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 250мм так, что толщина испытуемого волокнистого материала составляет 10 мм. Трубчатые держатели сферы закреплены в каркас из металлического профиля. Напряжение на нагреватели подается через автотрансформатор и измерительный комплекс К-50, при

measurements, a number of power values of the central heater are set, with each power value a stationary mode is achieved, in which temperatures are measured on the sides of the square plate of the test material. Each measurement yields a linear nonuniform algebraic equation, and several measurements covering the temperature range of interest yield a system of nonuniform linear equations with respect to the unknown three coefficients of the polynomial. However, as we have seen on the basis of our own measurements, such a system turned out to be not a joint one. In our opinion, the reason is not measurement errors, but the fact that the coefficient of thermal conductivity is not a polynomial of the second degree of temperature, but a polynomial of the fifth degree. The fact is that at high temperatures, the main mechanism of heat transfer is radiation transmission (re-radiation), which, according to Boltzmann's law, is proportional to the fourth degree of temperature. However, the absorption capacity of materials, which plays an important role in the processes of re-emission, has its own spectral characteristics for different materials, and the spectrum of thermal radiation depends on temperature according to Planck's law with a gray coefficient.

Our installation for measuring the thermal conductivity coefficient function has a spherical shape to minimize the "lateral" escape of heat, shown in Figure 1.



The installation consists of a ceramic spherical layer of highly refractory oxide ceramics with an inner diameter of 200mm and an outer diameter of 230mm. It is mounted on ceramic tubes, inside of which are copper wires that supply current to a molybdenum disilicide heater located inside the sphere. On top of the ceramic sphere is a metal casing made of thin tin, cut like Gauss petals. The casing presses the fibrous material against the corundum sphere and, when pressed, has a diameter of 250 mm so that the thickness of the test fibrous material is 10 mm. The tubular holders of the sphere are fixed in a metal profile frame. The voltage to the heaters is supplied through an autotransformer and a K-50 measuring system, which measures the electric power of the heater and monitors current and voltage. To avoid convective heat loss, we plug the upper tube with a mixture of alumina and orthophosphoric

помощи которого измеряется электрическая мощность нагревателя и контролируется ток и напряжение. Для исключения конвективного уноса тепла верхнюю трубку затыкаем смесью глинозема с ортофосфорной кислотой. Уход тепла через трубки становится незначительным и в расчетах электрическую мощность принимаем за мощность теплового потока через сферу, имеющего так же 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  $k$

$$c_0(T_1 - T_2) + \frac{c_1}{2}(T_1^2 - T_2^2) + \frac{c_2}{3}(T_1^3 - T_2^3) + \frac{c_3}{4}(T_1^4 - T_2^4) + \frac{c_4}{5}(T_1^5 - T_2^5) + \frac{c_5}{6}(T_1^6 - T_2^6) = \frac{P}{4\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

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 термодарами, подключаемыми к микроамперметру, нормированному на градусы Цельсия по эталонной термодаре, 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, которую решаем при помощи математической системы Maple13.

## Часть 2. Проектирование высоко температурной печи.

Наиболее эффективным для футеровки высоко температурных печей с рабочей температурой до 18000C 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 плотного оксид циркониевой керамики. Порошок и волокнистый материал из оксида циркония имеет 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 160 кг/м<sup>3</sup>, а плотный черепок из оксида циркония имеет плотность 2300 кг/м – выше в 15 раз [4].

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 так же повышает КПД печи. Однако, как сказано выше, при высоких температурах важную роль в уменьшении теплового потока имеют поглотители теплового излучения. Так нами подобран

acid. The heat loss through the tubes becomes insignificant, and in calculations, electrical power is taken as the power of the heat flow through the sphere, which also has spherical symmetry. Under these conditions, to determine the coefficients of the thermal conductivity function

we get the equation for each dimension with the number  $k$

At each power value, starting from low, we wait for the establishment of a stationary mode in which the temperatures of the inner and outer layers of the tested fibrous material remain unchanged, and their values are entered in the test data table. We select the power values so that the internal temperatures measured by the thermocouples connected to the microammeter, normalized to degrees Celsius according to the reference thermocouple, cover the entire temperature range of interest with their values. But not less than six dimensions. As a result, equation (2) will give us an inhomogeneous system of linear algebraic equations with unknown coefficients, which we solve using the mathematical system Maple13.

## Part 2. Designing a high temperature furnace.

The most effective lining for high temperature furnaces with operating temperatures up to 18000C is a fibrous material made of cubic zirconia stabilized with 4% yttrium, produced in large quantities in China. To protect the fibrous material from high temperatures and mechanical damage, as well as to ensure mechanical strength in relation to the bookmark, an inner shell in the form of a muffle or chamber made of dense zirconium oxide ceramics is required. Both the powder and the fibrous zirconium oxide material have a commensurate cost per kilogram of weight, but different densities. The optimal density of the fibrous material, at which heat transfer by convection in the pores is minimal, is 160 kg/m<sup>3</sup> according to TsAGI research, and a dense zirconium oxide shard has a density of 2300 kg/m – 15 times higher [4].

Even a small muffle thickness accounts for most of the cost of the furnace. The fibrous material, which has a low value of the thermal conductivity function even at high temperatures, allows the lining of the furnace to be small and light in weight compared to other refractory materials, and this gives the furnace advantages in economy, since less heat flow will leave the furnace casing and shorter heating time, which also increases the efficiency of the furnace. However, as mentioned above, heat sinks play an important role in reducing heat flow at high temperatures. This is how we selected the powder as a high temperature absorber, which mainly consists of silicon carbide. As measurements have shown, the addition of 5% powder by weight to a zirconium oxide fiber insulator reduces the values of the thermal conductivity coefficient at high temperatures.

порошок в качестве высоко температурного поглотителя, который в основном состоит из карбида кремния. Как показали измерения добавление 5% порошка по весу в волокнистый теплоизолятор из оксид циркониевого волокна снижает значения коэффициента теплопроводности при высоких температурах (рис.2).

Также совершенно новым в проектировании высоко температурных 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, полученные нами и другими исследователями [2 - 11].

По нашим расчетам [3] срок службы муфеля из таких материалов в зависимости от температуры печи определяется при температурах  $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  срок службы оксид циркониевой керамики стабилизированной оксидом иттрия  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 4% состава составляет 1800 суток или 43300 часов непрерывной работы. Долговечность муфеля из корундовой плотной спечённой керамики, при температуре  $T=1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет 500 суток или 12000 часов непрерывной работы.

## РИСУНОК 2

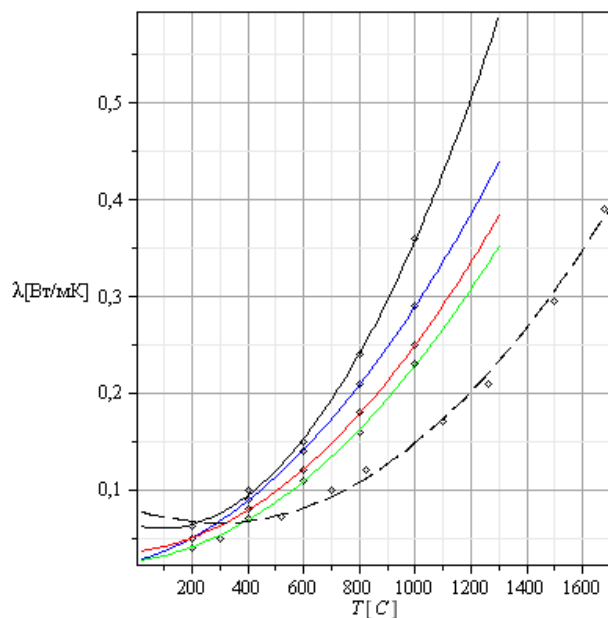
**ГРАФИКИ ФУНКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
**СПЛОШНЫЕ ЛИНИИ БЕЗ ПОГЛОТИТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПУНКТИРНАЯ ЛИНИЯ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ 5% КАРБИД КРЕМНИЕВОГО ПОРОШКА.**

Figure 2

**Graphs of the thermal conductivity coefficient function for fibrous materials.**  
**SOLID LINES WITHOUT A RADIATION ABSORBER, DOTTED LINE WITH THE ADDITION OF 5% SILICON CARBIDE POWDER.**

Also, completely new in the design of high temperature furnaces is the consideration of the durability of materials at temperatures in the lining layers. Durability accounting is based on accurate calculations based on durability formulas, recrystallization rate, and grain sizes in the granular structure of the material, taking into account its porosity, obtained by us and other researchers [2-11].

According to our calculations [3], the service life of a muffle made of such materials, depending on the furnace temperature, is determined at temperatures  $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The service life of zirconium oxide ceramics stabilized with yttrium oxide  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 4% of the composition is 1800 days or 43300 hours of continuous operation. The durability of the muffle made of dense sintered corundum ceramics at a temperature of  $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  is 500 days or 12000 hours of continuous operation.



## Заключение

1. Предложен новый материал из оксид циркониевых волокон с порошком из карбида кремния в качестве поглотителя теплового излучения, обеспечивающего снижение коэффициента теплопроводности при высоких температурах. Малый вес и малая толщина теплоизоляционного слоя позволяют проектировать высоко температурные печи уменьшенного веса и внешних размеров, что снижает тепловые потери как при разогреве печи, так и в стационарном режиме. Малый вес футерованного материала значительно снижает его стоимость при гарантии долговечности непрерывной работы при температурах печи  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  500 суток.

2. Для компьютерного управления технологическим процессом необходимо построить математическую модель управляемого процесса, которая с достаточно высокой степенью точности отвечала бы реальным параметрам. Применяемые методы расчета печей, как правило основываются на температурных сопротивлениях с независимыми от температуры

## Conclusions

1. A new material made of zirconium oxide fibers with silicon carbide powder as a thermal radiation absorber is proposed, providing a reduction in the heat transfer coefficient at high temperatures. The low weight and low thickness of the thermal insulation layer allow the design of high temperature furnaces with reduced weight and external dimensions, which reduces heat losses both during furnace warm-up and in steady-state mode. The low weight of the lined material significantly reduces its cost while guaranteeing durability of continuous operation at furnace temperatures of  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 500 days.

2. For computer control of the technological process it is necessary to build a mathematical model of the controlled process, which would meet the real parameters with a high enough degree of accuracy. The applied methods of furnace calculation are usually based on temperature resistances with temperature-independent coefficients. Such methods give large errors for high-temperature regimes, because they do not take into account the dependence of the heat transfer

коэффициентами. Такие методы дают большие погрешности для высоко температурных режимов, так как не учитывают зависимость коэффициента теплопроводности материалов футеровки печи от температуры, значение которого возрастает при высоких температурах более чем в 50 раз.

3. 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.

4. Описана высокотемпературная 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.

5. Рассчитана печь кубической формы с двухслойной футеровкой на 27 литров с учетом долговечности слоев при температурах до 1800 °С. На основе полученной математической модели предложен метод компьютерного управления температурой в активной зоне печи в непрерывном режиме на основе непрерывного и плавного управления мощностью нагревательных спиралей при помощи регулирования зазора в магнитной цепи дросселя, ограничивающего величину тока в дисилицид молибденовом нагревателе. При таком методе управления температурой в активной зоне печи исключается импульсный нагрев, который возникает при применении тиристорных (семисторонних) регуляторов, а за счет частых переключений, приводящих к термическим циклам, значительно сокращается срок службы нагревателей.

#### Литература:

1. Кривобородова С.Ю., Коршунов А.В. Термическая стабильность фаз в составе огнеупоров на основе алюминатов кальция и оксида циркония // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2024: Сборник докладов V Национальной научной конференции, Москва, 16 декабря 2024 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2025. – С. 177-180. – EDN OCKXDN.
2. Кривобородова С.Ю., Коршунов А.В. Проблемы и перспективы использования алюминатных цементов для получения неформованных огнеупоров // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 4. – С. 333-344, DOI 10.62980/2076-0655-2024-333-344, EDN ejrcbi
3. Krivoborodov, Y. R. Refractory Concrete Based on High-Alumina Cement and Clinker Filler / Y. R. Krivoborodov, T. V. Kuznetsova, S. V. Samchenko // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2021. – Vol. 62, No. 2. – P. 153-156. – DOI 10.1007/s11148-021-00575-8. – EDN HCXKHL.
4. Падерин Л.Я., Прусов Б.В., Токарев О. Д. Исследование теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов при высоких температурах// Ученые записки ЦАГИ. том XLII №4. – С. 77-83
5. Шаяхметов У.Ш., Фахретдинов И.А., Чудинов В.В., Халиков Р.М. Высокопористая наноструктурированная пенокерамика. Свойства. Методы исследования // Учебное пособие. Уфа. РИЦ БашГУ. - 2015г. – 164 с.
6. Шаяхметов У.Ш., Хамидуллин А.Р., Захаров А.В., Чудинов В.В.

coefficient of the furnace lining materials on temperature, the value of which increases at high temperatures by more than 50 times.

3. The method of calculation of high-temperature chamber furnaces taking into account the dependence of thermal conductivity coefficients on temperature in the form of a fifth degree polynomial is proposed, which contains six unknown constants to be determined in a special installation.

4. The high-temperature setup and values of the coefficients of the heat transfer coefficient polynomial of the newly designed fiber material with better performance compared to similar materials proposed and investigated in TsAGI are described.

5. A cube-shaped furnace with a two-layer lining for 27 liters has been calculated, taking into account the durability of the layers at temperatures up to 1800 °C. On the basis of the obtained mathematical model, a method of computer control of the temperature in the furnace core in continuous mode is proposed on the basis of continuous and smooth control of the power of heating spirals by adjusting the gap in the magnetic circuit of the choke, limiting the current in the disilicide molybdenum heater. This method of controlling the temperature in the active zone of the furnace eliminates impulse heating, which occurs when thyristor (seven-sided) regulators are used, and due to frequent switching, leading to thermal cycles, the service life of heaters is significantly reduced.

#### References:

1. Krivoborodova S.Yu., Korshunov A.V. Thermal stability of phases in the composition of refractories based on calcium aluminates and zirconium oxide // *Actual problems of the construction industry and education - 2024: Collection of reports of the V National Scientific Conference, Moscow, December 16, 2024.* - Moscow: National Research Moscow State Construction University, 2025. - C. 177-180. - EDN OCKXDN.
2. Krivoborodova S.Yu., Korshunov A.V. Problems and prospects of using of aluminate cements to produce unmolded refractories. // *Technique and technology of silicates*. – 2024. Vol. – 31, No4. – Pp. 333– 344, DOI 10.62980/2076-0655-2024-333-344, EDN ejrcbi.
3. Krivoborodov, Y. R. Refractory Concrete Based on High-Alumina Cement and Clinker Filler / Y. R. Krivoborodov, T. V. Kuznetsova, S. V. Samchenko // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2021. – Vol. 62, No. 2. – P. 153-156. – DOI 10.1007/s11148-021-00575-8. – EDN HCXKHL.
4. Paderin L.Ya., Prusov B.V., Tokarev O. D. Investigation of thermal conductivity of porous thermal insulation materials at high temperatures// *Ucheny'e zapiski CzAGI*. Vol. XLII №. 4. - pp. 77-83 (in Russian).
5. Shayakhmetov U.Sh., Fahretdinov I.A., Chudinov B.B., Khalikov R.M. Highly porous nano structured foam ceramics. Features. Research methods // *Uchebnoe posobie. Ufa. RICz BashGU* - 2015. - p.164 (in Russian).
6. Shayakhmetov U.Sh., Khamidullin A.R., Zakharov A.V., Chudinov V.V. Technology and production of foam ceramics for

Технология и производство пенокерамики строительного назначения // В сборнике: Актуальные вопросы современного материаловедения. материалы VI Международной молодежной научно-практической конференции. Отв. ред. Куковинец О.С., - 2020. - С. 347-351.

7. Захаров А.В., Шаяхметов У.Ш., Чудинов В.В., Lai Wen (KNR) Квантовая теория зернистой структуры и предел прочности // Сборник трудов международной конференции Кайбышевские чтения. УУНиТ. Уфа. - 2023г.

8. Шаяхметов У.Ш., Шаяхметов А.У., Захаров А.В., Хамидуллин А.Р., Газизова А.Т. Огнеупорные композиции на основе пиррофиллитового сырья // Новые огнеупоры. - 2018. №6. - С. 8–13.

9. Аюбов Н.А., Ключев А.В., Ключев С.В. Разработка составов теплоизоляционных сухих строительных смесей с использованием композиционных вяжущих // Приволжский научный журнал. – 2024. № 4. - С. 122-130.

10. Gurieva, V., Ilyina, A., Klyuev, S., Saidumov, M., Khezhev, T., Nedoseko, I., Fediuk, R., Shamanov, V., Yazyev, B. Production of ceramic bricks using nickel slags as contribution to decarbonization // International Journal of Building Pathology and Adaptation. – 2024

11. Селезнев В.А., Самченко С.В., Какуша В.А. Влияние температуры и коррозионноактивных сред на физико-механические характеристики стеклокомпозитов // Техника и технология силикатов. – 2020. – Т. 27, № 2. – С. 41-45.

12. Козлова, И.В., Самченко С.В. Нанотехнологии в производстве строительных материалов: теоретическое исследование // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 284-297. – DOI 10.62980/2076-0655-2024-284-297.

13. Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф., Кашапов Л.Н. Исследование плазменно-электролитного процесса получения наночастиц оксида титана // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 5. – С. 70-79. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-5-70-79.

14. Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф., Кашапов Л.Н., Ключев С.В. Плазменно-электролитное получение порошка оксида титана // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 6. – С. 75-84. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-6-75-84.

construction purposes // V sbornike: Aktual'ny'e voprosy` sovremennogo materialovedeniya. materialy` VI Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Otv. red. Kukovinec O.S. - 2020. - pp. 347-351 (in Russian).

7. Zakharov A.B., Shayakhmetov U.Sh., Chudinov B.B., Lai Wen (KNR) Quantum theory of granular structure and ultimate strength” // Sbornik trudov mezhdunarodnoj konferencii Kajby`shevskie chteniya. UUNiT. Ufa. - 2023 (in Russian).

8. Shayakhmetov U.Sh., Shayakhmetov A.U., Zakharov A.V., Khamidullin A.R., Gazizova A.T. Refractory compositions based on pyrophyllite raw materials // Novy'e огнеупоры`. - 2018. № 6. -Pp. 8-13 (in Russian).

9. Ayubov N.A., Klyuev A.V., Klyuev S.V. Development of compositions of thermal insulation dry building mixes using composite binders // Privolzhskij nauchny`j zhurnal – 2024. № 4. - Pp. 122-130 (in Russian).

10. Gurieva, V., Ilyina, A., Klyuev, S., Saidumov, M., Khezhev, T., Nedoseko, I., Fediuk, R., Shamanov, V., Yazyev, B. Production of ceramic bricks using nickel slags as contribution to decarbonization // International Journal of Building Pathology and Adaptation. - 2024

11. Seleznev V.A., Samchenko S.V., Kakusha V.A. Influence of temperature and corrosive media on the physical and mechanical characteristics of glass composites // Technique and technology of silicates – 2020. – Vol. 27, No. 2. – pp. 41-45.

12. Kozlova, I.V., Samchenko S.V. Nanotechnologies in the production of building materials: a theoretical study // Technique and technology of silicates – 2024. – Vol. 31, No. 3. – pp. 284-297. – DOI 10.62980/2076-0655-2024-284-297.

13. Kashapov R.N., Kashapov N. F., Kashapov L. N. Investigation of the plasma-electrolyte process of obtaining titanium oxide nanoparticles // Stroitel'ny'e materialy` i izdeliya. – 2022. – Vol. 5, No. 5. – pp. 70-79. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-5-70-79.

14. Kashapov R.N., Kashapov N. F., Kashapov L. N., Klyuev S. V. Plasma-electrolyte preparation of titanium oxide powder // Stroitel'ny'e materialy` i izdeliya. – 2022. – Vol. 5, No. 6. – pp. 75-84. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-6-75-84.

**Шаяхметов У.Ш.** – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, E-mail: [rusairu@ufanet.ru](mailto:rusairu@ufanet.ru)

**Захаров А.В.** – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, E-mail: [ralzax@yandex.ru](mailto:ralzax@yandex.ru)

**Кутлиаров Д.Н.** – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет E-mail: [Kutliarov-d@mail.ru](mailto:Kutliarov-d@mail.ru)

**Анваров А.Р.** – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», E-mail: [anvarov@yandex.ru](mailto:anvarov@yandex.ru)

**Недосеко И.В.** - доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», E-mail: [nedoseko1964@mail.ru](mailto:nedoseko1964@mail.ru)

Вклад авторов написание статьи равнозначный.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Shayakhmetov U.Sh.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ufa University of Science and Technology, E-mail: [rusairu@ufanet.ru](mailto:rusairu@ufanet.ru)

**Zakharov A.V.** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Ufa University of Science and Technology, E-mail: [ralzax@yandex.ru](mailto:ralzax@yandex.ru)

**Kutliyarov D.N.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Bashkir State Agrarian University E-mail: [Kutliarov-d@mail.ru](mailto:Kutliarov-d@mail.ru)

**Anvarov A.R.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ufa State Petroleum Technical University, E-mail: [anvarov@yandex.ru](mailto:anvarov@yandex.ru)

**Nedoseko I.V.** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Ufa State Petroleum Technical University, E-mail: [nedoseko1964@mail.ru](mailto:nedoseko1964@mail.ru)

The authors contribution to the writing of the article is equal.

The authors declare that there is no conflict of interest.