

УДК 666.76, 666.974.2

Тип статьи: обзорная статья

ГРНТИ 81.09.00

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN ejrcbi

DOI 10.62980/2076-0655-2024-333-344

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЮМИНАТНЫХ ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ

Кривобородова С.Ю.<sup>1</sup>, Коршунов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**АННОТАЦИЯ.** Рост производства и совершенствованием технологий различных отраслей промышленности обуславливает потребность в материалах, обеспечивающих долговечность футеровок тепловых агрегатов. Это предопределяется необходимостью создания высокоглиноземистых цементов (ВГЦ) несмотря на успехи, достигнутые в области расширения их ассортимента и улучшения качества, т.е. их создание является важной и актуальной задачей. Среди различных направлений исследований по повышению технических свойств ВГЦ внимание исследователей привлекает влияние изменения технологических параметров на процессы формирования цементного клинкера. Среди таких параметров особое внимание уделяется химическому составу сырьевой смеси, ее гомогенности, температуре обжига, скорости охлаждения, введению различных добавок и др. Отдельно стоит вопрос об огнеупорных свойствах высокоглиноземистых цементов. Задачей данного исследования было рассмотрение физико-химических и технических свойств алюминатных цементов и установление основных проблем и перспектив использования алюминатных цементов для получения неформованных огнеупоров. Улучшение жаростойких свойств неформованных огнеупоров на основе алюминатных цементов может быть обеспечено введением в состав сырьевой смеси при обжиге клинкера более огнеупорных добавок. Однако, в этом случае можно ожидать образование в составе цемента гидратационно неактивных соединений, которые могут привести к снижению прочности цемента. Методологической основой является анализ литературных данных по вопросу поиска, синтеза и применения огнеупорных добавок для алюминатных цементов. Результатом исследования стало выявление перечня добавок обеспечивающих более высокие жаропрочные свойства неформованных огнеупоров на основе алюминатных цементов. Наиболее перспективным и наиболее востребованным в настоящее время является использование соединений циркония в сочетании с минерализатором обжига. Также обоснована важность ширококомасштабных научных исследований в этой области.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** неформованные огнеупоры, алюминатные цементы, высокоглиноземистый цемент, прочность, огнеупорность, огнеупорные добавки, соединения циркония

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** 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

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN ejrcbi

DOI 10.62980/2076-0655-2024-333-344

## PROBLEMS AND PROSPECTS OF USING OF ALUMINATE CEMENTS TO PRODUCE UNMOLDED REFRACTORIES

Krivoborodova S.Yu.<sup>1</sup>, Korshunov A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering

**ABSTRACT.** The growth of production and improvement of technologies in various industries stipulates the need for materials that ensure the durability of thermal unit linings. This is predetermined by the need to create high-alumina cements (HAC) despite the successes achieved in the field of expanding their range and improving their quality, i.e. their creation is an important and actual task. Among the various directions of research on improving the technical properties of HAC, the researcher's attention is attracted by the influence of changing the technological parameters on the processes of cement clinker formation. Among such parameters, special attention is paid to the chemical composition of the raw material mixture, its homogeneity, firing temperature, cooling rate, introduction of various additives, etc. The question of refractory properties of high-alumina cement is also discussed. A separate issue is the refractory properties of high-alumina cements. The task of this study was to consider the physicochemical and technical properties of aluminate cements and to establish the main problems and prospects for the use of aluminate cements for the production of non-molded refractories. Improvement of heat-resistant properties of non-formed refractories based on aluminate cements can be provided by the introduction of more refractory additives into the raw material mixture during clinker firing. However, in this case, formation of hydration inactive compounds in the cement composition can be expected, which can lead to a decrease in cement strength. The methodological basis is the analysis of literature data on the search, synthesis and application of refractory additives for aluminate cements. The result of the study was the identification of the list of additives providing higher heat-resistant properties of non-formed refractories based on aluminate cements. The most promising and the most demanded at present is the use of zirconium compounds in combination with a mineralizer for firing. The importance of large-scale scientific research in this area is also substantiated.

**KEY WORDS:** unmolded refractories, aluminate cements, high alumina cement, strength, refractoriness, refractory additives, zirconium compounds

**FOR CITATION:** 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.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная тенденция мирового развития производства и применения огнеупоров обусловлена существенным снижением удельных расходов огнеупоров во всех производствах, связанных с их применением. Огнеупорные материалы применяются в металлургической, стекольной, сахарной, машиностроительной, химической промышленности, а также во всех других отраслях, где проходит работа с применением доменных, шахтных и вращающихся печей.

Под огнеупорами понимают группу материалов (веществ и изделий), которые имеют минеральное происхождение и обладают способностью сохранять определенные физические характеристики, несмотря на воздействие высоких температур и агрессивных химических веществ, выделяемых во время тех или иных тепловых процессов в металлургии и других областях промышленного производства. Область применения таких изделий широка, но все материалы можно классифицировать в зависимости от сферы использования на те, которые имеют общее назначение, а также изготовленные для конкретных тепловых агрегатов [1].

Огнеупоры классифицируют на формованные и неформованные (ГОСТ 28874-2004). В настоящее время большая часть производства сосредоточена на выпуске простых формованных изделий прямоугольной формы или кирпичей. Такие огнеупоры оптимально подходят для футеровки различной геометрии теплового агрегата. В последнее время происходит рост значительного интереса производителей в пользу увеличения доли производства неформованных огнеупоров или бетонов разных сортов и масс с огнеупорными свойствами [1].

Снижение удельных расходов формованных огнеупоров в значительной степени достигнуто за счет разработки и внедрения новых неформованных огнеупоров. Несмотря на общую тенденцию сокращения объема производства и применения огнеупоров, удельная доля неформованных огнеупоров в общем их балансе возрастает. Это сопровождается значительным сокращением производства обожженных огнеупорных изделий.

Тенденции снижения производства различных видов огнеупоров связана также со снижением сырьевой базы, а освоение новых месторождений огнеупорного сырья и реконструкция производств требует как материальных, так и интеллектуальных затрат.

Так, невысокое производство высокоглиноземистых огнеупоров во многом это связано со значительным дефицитом в России залежей бокситов нужного качества. Мы также испытываем дефицит сырья как в качественном, так и количественном отношении производимых в России магнезиальных огнеупоров. Медленно идет освоение перспективных типов огнеупоров (группы  $MgO-CaO-Al_2O_3-ZrO_2-C$ ) при необходимых запасах циркония.

К классу неформованных огнеупоров относятся огнеупорные бетоны (бетонные массы и смеси, а также предварительно отформованные бетонные изделия), торкрет-массы, набивные и пластичные массы, мертели (огнеупорные растворы), сухие смеси, огнеупорные покрытия, керамические волокна и материалы на их основе. К огнеупорным бетонам относятся жаростойкие и огнеупорные сухие смеси. Жаростойкими считаются смеси с пористостью от 25 до 45%, которые используются в тепловых агрегатах для защиты от теплового излучения. [1].

## INTRODUCTION

The current trend in the global development of production and use of refractories is due to a significant reduction in the specific consumption of refractories in all industries associated with their use. Refractory materials are used in the metallurgical, glass, sugar, mechanical engineering, chemical industries, as well as in all other industries where work is carried out using blast, shaft and rotary furnaces.

Refractories are understood to be a group of materials (substances and products) that are of mineral origin and have the ability to retain certain physical characteristics despite exposure to high temperatures and aggressive chemicals released during certain thermal processes in metallurgy and other areas of industrial production. The scope of application of such products is wide, but all materials can be classified depending on the area of use into those that have a general purpose, as well as those manufactured for specific heating units [1].

Refractories are classified into molded and unmolded (GOST 28874-2004). Currently, most production is concentrated on the production of simple rectangular molded products or bricks. Such refractories are ideal for lining various geometries of a heating unit. Recently, there has been a significant growth in interest from manufacturers in favor of increasing the share of production of unshaped refractories or concretes of different grades and masses with refractory properties [1].

The reduction in specific consumption of molded refractories has been achieved to a significant extent through the development and introduction of new unmolded refractories. Despite the general trend of reduction in the volume of production and use of refractories, the specific share of unshaped refractories in their overall balance is increasing. This is accompanied by a significant reduction in the production of fired refractory products.

The downward trend in the production of various types of refractories is also associated with a reduction in the raw material base, and the development of new deposits of refractory raw materials and the reconstruction of production facilities requires both material and intellectual costs.

Thus, the low production of high-alumina refractories is largely due to the significant shortage of bauxite deposits of the required quality in Russia. We also experience a shortage of raw materials, both qualitatively and quantitatively, of magnesia refractories produced in Russia. The development of promising types of refractories ( $MgO-CaO-Al_2O_3-ZrO_2-C$  group) with the necessary reserves of zirconium is proceeding slowly.

The class of unformed refractories includes refractory concretes (concrete masses and mixtures, as well as preformed concrete products), shotcrete mass, ramming and plastic masses, mortars (refractory solutions), dry mixes, refractory coatings, ceramic fibers and materials based on them. Refractory concretes include heat-resistant and fire-resistant dry mixes. Heat-resistant mixtures are those with a porosity of 25 to 45%, which are used in heating units to protect against thermal radiation. [1].

Наиболее востребованными в области неформованных огнеупоров являются жаростойкие бетоны и торкрет-массы (торкрет-бетоны) [2].

Эффективность неформованных огнеупоров определяется свойствами вяжущего и заполнителя. Жаростойкий бетон и раствор, используемые для футеровки тепловых агрегатов, должны обладать ускоренным ростом прочности, высокой огнеупорностью. Жаростойкий бетон должен сохранять достаточную прочность при нагревании при переходе гидратов в безводные соединения. Такой бетон обладает стойкостью в агрессивных средах [3]. Последнее требование имеет особо важное значение для агрегатов, используемых в химической промышленности, в частности при производстве минеральных удобрений.

В настоящее время ведутся поиски оптимального состава вяжущего материала и заполнителя, удовлетворяющих наиболее полно указанным требованиям. К наиболее перспективным направлениям производства жаростойких бетонов следует отнести технологию получения огнеупорных футеровок на высокоглиноземистых цементах (ВГЦ). Хотя и имеются определенные успехи в области создания высокоглиноземистых цементов, дальнейшее расширение их ассортимента и улучшение качества является весьма актуальным.

#### **Алюминатные цементы и их свойства**

Алюминатные цементы – это специальная группа цементов, в составе которых преобладают алюминаты кальция. Алюминатный цемент применяют для получения быстротвердеющих строительных и жаростойких растворов и бетонов, используемых при скоростном строительстве, аварийных работах, зимнем бетонировании, при строительстве сооружений, подвергающихся действию минерализованных вод и сернистых газов [4-8].

Технические свойства цементов во многом определяются свойствами минералов, входящих в их состав. Состав высокоглиноземистого цемента может быть установлен при рассмотрении систем  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . В зависимости от соотношения  $\text{CaO} : \text{Al}_2\text{O}_3$  в системе  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  образуются минералы:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_4$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ );  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ,  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ );  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CA}$ );  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_4\text{O}_7$ ,  $\text{CA}_2$ );  $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{CA}_6$ ). [4,5,9-14]

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_4$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ) является характерным минералом портландцементного клинкера и в алюминатных цементах не встречается [15].

Основным направлением совершенствования свойств алюминатных цементов является оптимизация технологических параметров их получения, а именно: минералогический и фазовый состав клинкера температура и длительность обжига, степень измельчения и гомогенность сырьевой смеси, тонкое измельчение цемента для создания оптимального гранулометрического состава.

Много исследований проводятся с целью установления влияния различных добавок к исходной сырьевой смеси на образование твердых растворов различных элементов с основными фазами клинкеров алюминатных цементов, формирование микроструктуры клинкеров и характера кристаллизации минералов, возможности использования различных отходов в качестве сырьевого компонента.

Разрабатываются новые способы получения глиноземистого клинкера, в частности установлена возможность

The most popular in the field of unshaped refractories are heat-resistant concretes and shotcrete mass (shotcrete) [2].

The performance of unshaped refractories is determined by the properties of the binder and filler. Heat-resistant concrete and mortar used for lining thermal units must have accelerated strength growth and high fire resistance. Heat-resistant concrete must retain sufficient strength when heated during the transition of hydrates into anhydrous compounds. This type of concrete is resistant to aggressive environments [3]. The latter requirement is of particular importance for units used in the chemical industry, in particular in the production of mineral fertilizers.

Currently, a search is underway for the optimal composition of the binder and filler that will most fully satisfy the specified requirements. The most promising areas of production of heat-resistant concrete include the technology of obtaining refractory linings on high-alumina cements (HAC). Although there have been some successes in the field of creating high-alumina cements, further expansion of their range and improvement of quality is highly relevant.

#### **Aluminate cements and their properties**

Aluminate cements are a special group of cements, the composition of which is dominated by calcium aluminates. Aluminate cement is used to obtain fast-hardening construction and heat-resistant mortars and concretes used in high-speed construction, emergency work, winter concreting, and in the construction of structures exposed to mineralized waters and sulfur gases [4-8].

Technical properties of cements are largely determined by the properties of minerals included in their composition. The composition of high alumina cement can be established by considering the systems  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . Depending on the ratio of  $\text{CaO} : \text{Al}_2\text{O}_3$  in the  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  system the following minerals are formed:  $3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_4$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ );  $12\text{CaO} - 7\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ,  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ );  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CA}$ );  $\text{CaO} - 2\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_4\text{O}_7$ ,  $\text{CA}_2$ );  $\text{CaO} - 6\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{CA}_6$ ). [4,5,9-14]

$3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_4$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ) is a characteristic mi-mineral of Portland cement clinker and is not found in aluminate cements [15].

The main direction of improving the properties of aluminate cements is the optimisation of the technological parameters of their production, namely: mineralogical and phase composition of clinker, temperature and duration of firing, the degree of grinding and homogeneity of the raw material mixture, fine grinding of cement to create the optimal particle size distribution.

Many studies are conducted to establish the influence of various additives to the initial raw material mixture on the formation of solid solutions of various elements with the main phases of aluminate cement clinkers, the formation of the microstructure of clinkers and the nature of mineral crystallization, and the possibility of using various wastes as a raw material component.

New methods for producing alumina clinker are being developed; in particular, the possibility of producing high-

получения высококачественного цемента в печах плазменного типа [16].

Известно, что присутствие в сырьевой смеси  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  оказывает влияние на фазовый состав клинкера: первоначально наблюдается внедрение иона  $\text{Fe}^{3+}$  в решетку  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ , СА). При введении оксида железа более 4% в клинкере появляется ферритная фаза, количество СА при этом уменьшается.

В зависимости от химического состава сырья и принятого способа производства в алюминатном цементе могут присутствовать следующие железосодержащие соединения: вюстит  $\text{FeO}$ , магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , двухкальциевый феррит  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ,  $\text{C}_2\text{F}$ ) [17].

Содержание оксидов железа в алюминатном цементе нежелательно. В их присутствии снижается огнеупорность цемента, а также ухудшаются технические свойства цементного камня в процессе его службы в составе жаростойкого бетона.

Изучение влияния добавки  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  в сырьевую смесь, рассчитанную на получение СА, показало, что содержание их в смеси до 2% не изменяет фазовый состав клинкера, а увеличение их более 2% сопровождается появлением геленита, магнезиальной шпинели и периклаза [18,19].

Диоксид кремния отрицательно влияет на качество цемента, вследствие образования негидратирующегося минерала геленита  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ . Более высокой прочностью обладает глиноземистый цемент, в котором содержание  $\text{SiO}_2$  менее 10% [20-22].

Оксид магнезии понижает температуру плавления и вязкость алюминатного расплава. По современным представлениям оксид магнезии в алюминатных цементах может присутствовать в виде периклаза  $\text{MgO}$ , акерманита -  $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{Ca}_2\text{MgSiO}_5$ ) или шпинели  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . При небольшом содержании  $\text{MgO}$  (до 2-3%) она может войти в твердые растворы с другими минералами [23]. С увеличением содержания оксида магнезии в цементе сверх 2% образуется магнезиальная шпинель  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , что отрицательно сказывается на активности цемента. Однако, в виду высокой температуры плавления шпинели, равной  $2135^\circ\text{C}$ , это соединение повышает огнеупорность цемента. Это свойство  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  используется для получения жаростойких алюминатно-магнезиальных цементов с огнеупорностью до  $1750^\circ\text{C}$  [19,24].

Алюминатный цемент нашел широкое применение для приготовления жаростойких бетонов и растворов. Однако даже при применении высокоогнеупорных заполнителей температура службы таких бетонов не превышает  $1450-1550^\circ\text{C}$ .

В ряде областей применения жаростойких бетонов и растворов такая температура является недостаточной. Повышение жаростойкости алюминатного цемента может быть достигнуто путем увеличения в его составе количества  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В результате исследований [25-28] была разработана технология получения высокоглиноземистого цемента (ВГЦ) обжигом смеси, рассчитанной на получение клинкера, содержащего СА и  $\text{CA}_2$ .

Также была разработана технология получения технически чистых алюминатов кальция методом спекания [5]. Такой цемент был назван «Талюм» (сокращенно от технические алюминаты).

quality cement in plasma-type furnaces has been established [16].

It is known that the presence of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in the raw mix affects the phase composition of clinker: initially, the introduction of the ion  $\text{Fe}^{3+}$  into the lattice  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ , CA) is observed. When introducing more than 4% iron oxide into the clinker, a ferrite phase appears, and the amount of CA decreases.

Depending on the chemical composition of the raw materials and the adopted production method, the following iron-containing compounds may be present in aluminate cement: wustite  $\text{FeO}$ , magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , dicalcium ferrite  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ,  $\text{C}_2\text{F}$ ) [17].

The content of iron oxides in aluminate cement is undesirable. In their presence, the fire resistance of cement decreases, and the technical properties of cement stone deteriorate during its service in heat-resistant concrete.

A study of the effect of adding  $\text{SiO}_2$  and  $\text{MgO}$  to the raw mix designed to obtain CA showed that their content in the mix up to 2% does not change the phase composition of the clinker. And their increase by more than 2% is accompanied by the appearance of helenite, magnesian spinel and periclase [18,19].

Silicon dioxide has a negative effect on the quality of cement due to the formation of the non-hydrating mineral gehlenite  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ . Aluminous cement with a  $\text{SiO}_2$  content of less than 10% has higher strength [20-22].

Magnesium oxide lowers the melting point and viscosity of the aluminate melt. According to modern concepts, magnesium oxide in aluminate cements can be present in the form of periclase  $\text{MgO}$ , akermanite -  $2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{Ca}_2\text{MgSiO}_5$ ) or spinel  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . With a small  $\text{MgO}$  content (up to 2-3%), it can enter into solid solutions with other minerals [23]. With an increase in the magnesium oxide content in cement above 2%, magnesian spinel  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  is formed, which negatively affects the activity of the cement. However, due to the high melting point of spinel, equal to  $2135^\circ\text{C}$ , this compound increases the refractoriness of cement. This property of  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  is used to obtain heat-resistant aluminate-magnesia cements with refractoriness up to  $1750^\circ\text{C}$  [19,24].

Aluminate cement has found wide application in the preparation of heat-resistant concretes and mortars. However, even when using highly refractory fillers, the service temperature of such concrete does not exceed  $1450-1550^\circ\text{C}$ .

In a number of areas of application of heat-resistant concretes and mortars, this temperature is insufficient. The heat resistance of aluminate cement can be increased by increasing the amount of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . As a result of research [25-28], a technology was developed for producing high-alumina cement (HAC) by firing a mixture designed to produce clinker containing CA and  $\text{CA}_2$ .

A technology for obtaining technically pure calcium aluminates by sintering was also developed [5]. This cement was called "Talum" (short for technical aluminates).

### **Высокоглиноземистые цементы**

Высокоглиноземистый цемент - одна из разновидностей алюминатного цемента - сравнительно новый вид вяжущего, но благодаря сочетанию в нем ряда ценнейших свойств, он уже сейчас во многих развитых в промышленном отношении зарубежных странах занял ведущее место как вяжущее для жаростойких бетонов [4].

Дефицитность технического глинозема тормозит широкое промышленное производство ВГЦ, и увеличивающаяся потребность в жаростойких бетонах на этом цементе вызывает необходимость проведения исследований по расширению базы ВГЦ и снижению его стоимости. Поэтому разработка технологии получения ВГЦ с использованием недефицитного сырья и внедрение их в практику жаростойких бетонов стало важнейшей научной и практической задачей.

Наиболее перспективным направлением является получение высокоглиноземистых цементов с использованием отходов различных производств. Поисками многочисленных исследователей [29-35] установлена возможность использования для производства ВГЦ различных алюмосодержащих отходов промышленности, что позволяет не только расширить объем производства, снизить стоимость цемента, но и решить важнейшую народнохозяйственную задачу - утилизацию отходов.

Все алюмосодержащие отходы промышленности, как правило, содержат различные примеси (оксиды титана, хрома, брома, калия и натрия, бария), наличие которых не может не учитываться при производстве высокоглиноземистых цементов. Эти примеси могут как модифицировать алюминаты кальция, так и образовывать самостоятельные соединения ухудшающие гидратационные свойства ВГЦ. Однако при их содержании может замедляться перекристаллизация гидратных фаз, что положительно сказывается на прочности образцов цементов, подвергнутых воздействию высокой температуры.

Знание химического состава алюминатного цемента само по себе важно, но недостаточно, чтобы судить о его свойствах. Важно знать, какие соединения (минералы) образуются из сырьевой смеси, имеющей определенный химический состав, под воздействием термического фактора, т.е. применяемой технологии производства.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых видов и составов огнеупорных цементов, обладающих высокой прочностью, огнеупорностью, возможностью эксплуатации в высокотемпературных условиях. Особое значение приобретают, цементы высшей огнеупорности (более 2000°C), предназначенные для изготовления особо ответственных огнеупорных бетонных изделий. В России Н.Г. Илюха [36] разработал алюмоцирконобариевый, алюмоцирконостронциевый цементы, обладающие огнеупорностью 2500°C и выше, применяемые для изготовления бетона, работающего в сильно агрессивных условиях.

Для ВГЦ, используемого для получения жаростойкого бетона, весьма важным являются и их свойства при термической обработке цементного камня (бетона).

Улучшение свойств ВГЦ должно быть направлено на введение в его состав соединений, повышающих их огнеупорность и другие жаростойкие свойства.

### **High alumina cements**

High alumina cement is one of the varieties of aluminate cement - a relatively new type of binder. But thanks to the combination of a number of valuable properties in it, it has already taken a leading place in many industrially developed foreign countries as a binder for heat-resistant concrete [4].

The shortage of technical alumina is slowing down the large-scale industrial production of high-alumina cements, and the increasing demand for heat-resistant concretes based on this cement necessitates research to expand the base of HAC and reduce its cost. Therefore, the development of technology for obtaining HAC using abundant raw materials and their introduction into the practice of heat-resistant concrete has become a major scientific and practical task.

The most promising direction is the production of high-alumina cements using waste from various industries. The research of numerous researchers [29-35] has established the possibility of using various aluminum-containing industrial wastes for the production of HAC. This allows not only to expand the volume of production, reduce the cost of cement, but also to solve the most important national economic problem - waste disposal.

All aluminum-containing industrial waste, as a rule, contains various impurities (oxides of titanium, chromium, bromine, potassium and sodium, barium), the presence of which cannot be ignored in the production of high-alumina cements. These impurities can both modify calcium aluminates and form independent compounds that worsen the hydration properties of HAC. However, their presence can slow down the recrystallization of hydrate phases, which has a positive effect on the strength of cement samples exposed to high temperatures.

Knowing the chemical composition of aluminate cement is important in itself, but not sufficient to judge its properties. It is important to know what compounds (minerals) are formed from a raw material mixture with a certain chemical composition under the influence of a thermal factor, i.e. the applied production technology.

At present, much attention is paid to the development of new types and compositions of refractory cements that have high strength, fire resistance, and the ability to operate in high-temperature conditions. Of particular importance are cements with the highest fire resistance (more than 2000°C), intended for the production of especially critical refractory concrete products. In Russia, N.G. Ilyukha [36] developed aluminum-zirconium-barium and aluminum-zirconium-strontium cements with a fire resistance of 2500°C and higher, used for the production of concrete operating in highly aggressive conditions.

For HAC used to obtain heat-resistant concrete, their properties during heat treatment of cement stone (concrete) are also very important.

Improving the properties of HAC should be aimed at introducing into its composition compounds that increase their fire resistance and other heat-resistant properties.

### Гидратация и твердение высокоглиноземистого цемента

Характер твердения цементного камня, его прочностные свойства обусловлены процессом гидратации, его скоростью, составом гидратных соединений, морфологическими особенностями кристаллогидратов [37].

В системе  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  в зависимости от температуры, влажности и других условий образуется ряд гидроалюминатов кальция:  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{CAH}_{10}$ ),  $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_2\text{AH}_8$ ),  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ),  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 13-19\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$ ) [4,5,9].

Установлено, что в этой системе отклонения от состояния равновесия носят устойчивый характер и зависят от температуры. При  $1-5^\circ\text{C}$  существуют  $\text{CAH}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{AH}_8$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{10}$  и гиббсит. Однако  $\text{C}_2\text{AH}_8$  по [9] при  $1^\circ\text{C}$  нестабилен, но и повышение температуры свыше  $25^\circ\text{C}$  также сопровождается переходом  $\text{C}_2\text{AH}_8$  и  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  в  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . В пределах  $25-90^\circ\text{C}$  устойчивыми фазами являются  $\text{C}_3\text{AH}_6$  и гиббсит. Исследования подтверждают, что первопричиной падения прочности является изменение объема твердой фазы (изменение пористости), сопровождающее процессы превращений алюминатов кальция, имеющих в алюминатных цементах. По стехиометрическим расчетам гидратация вызывает очень большое увеличение объема твердой фазы, следовательно, снижение пористости и увеличение прочности. Она является первопричиной чрезвычайно высокой прочности алюминатных цементов [4,5].

Переход возникающих в процессе превращения (трансформации) или гидратации нестабильных гексагональных гидроалюминатов кальция (главным образом  $\text{CAH}_{10}$  и  $\text{C}_2\text{AH}_8$ ) в кристаллизующиеся в стабильной системе  $\text{C}_3\text{AH}_6$  и  $\text{AH}_3$  вызывает уменьшение объема, вследствие чего увеличивается пористость и снижается прочность [38].

Изотермы кристаллизации и равновесие в системе изучены в широком температурном интервале от  $1$  до  $1000^\circ\text{C}$  [39-49] и установлено, что наряду с гидроалюминатами кальция образуется гидроксид алюминия, а при повышенной температуре в результате дегидратации оксид алюминия и алюминаты кальция.

Так как согласно ГОСТ 969-2019 «Цементы глиноземистые и высокоглиноземистые» в состав алюминатных цементов не допускается введение каких-либо минеральных веществ при их производстве исследователями проводят многочисленные исследования по влиянию минеральных добавок на гидратацию и твердения алюминатных цементов и проводят изучение их свойств [50-54]. В соответствии с общей тенденцией в качестве добавок исследуют доменный гранулированный шлак [50,51], метакраолин [54], известняк [50] и др.

Основное заключение таких исследований сводится к тому, что введение добавок к алюминатным цементам приводит к стабилизации гексагональных гидроалюминатов кальция и приводит к минимизации образования гексагональных гидроалюминатов кальция. Это обуславливает стабильность роста прочности цементного камня и снижению деструктивных процессов при длительном твердении.

Исследования в системе  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  используются различные инструментальные методы исследования [55-58], в том числе численные методы посредством моделирования гидратации цемента и формирования микроструктуры [59].

### Hydration and hardening of high-alumina cement

The nature of hardening of cement stone, its strength properties are determined by the hydration process, its speed, the composition of hydrate compounds, and the morphological features of crystal hydrates [37].

In the  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  system, depending on temperature, humidity and other conditions, a number of calcium hydro-aluminates are formed:  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{CAH}_{10}$ ),  $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_2\text{AH}_8$ ),  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ),  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 13-19\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{C}_4\text{AH}_{13-19}$ ) [4,5,9].

It has been established that in this system deviations from the state of equilibrium are stable in nature and depend on temperature. At  $1-5^\circ\text{C}$  there are  $\text{CAH}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{AH}_8$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{10}$  and gibbsite. However,  $\text{C}_2\text{AH}_8$  according to [9] is unstable at  $1^\circ\text{C}$ , but an increase in temperature above  $25^\circ\text{C}$  is also accompanied by the transition of  $\text{C}_2\text{AH}_8$  and  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  into  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . In the range of  $25-90^\circ\text{C}$ , stable phases are  $\text{C}_3\text{AH}_6$  and gibbsite. Research confirms that the primary cause of the decrease in strength is the change in the volume of the solid phase (change in porosity) accompanying the processes of transformation of calcium aluminates present in aluminate cements. According to stoichiometric calculations, hydration causes a very large increase in the volume of the solid phase, and therefore a decrease in porosity and an increase in strength. It is the primary reason for the extremely high strength of aluminate cements [4,5].

The transition of unstable hexagonal calcium hydroaluminates (mainly  $\text{CAH}_{10}$  and  $\text{C}_2\text{AH}_8$ ) that arise during the process of transformation or hydration into  $\text{C}_3\text{AH}_6$  and  $\text{AH}_3$  that crystallize in a stable system causes a decrease in volume, as a result of which porosity increases and strength decreases [38].

Crystallization isotherms and equilibrium in the system have been studied in a wide temperature range from  $1$  to  $1000^\circ\text{C}$  [39-49]. It was established that, along with calcium hydroaluminates, aluminum hydroxide is formed, and at elevated temperatures, as a result of dehydration, aluminum oxide and calcium aluminates are formed.

According to GOST 969-2019 "Aluminous and high-alumina cements", the introduction of any mineral substances into the composition of aluminate cements during their production is not allowed, researchers are conducting numerous studies on the effect of mineral additives on the hydration and hardening of aluminate cements and studying their properties [50-54]. In accordance with the general trend, granulated blast furnace slag [50,51], metakaolin [54], limestone [50], etc. are being studied as additives.

The main conclusion of such studies is that the introduction of additives to aluminate cements leads to the stabilization of hexagonal calcium hydroaluminates and leads to the minimization of the formation of hexagonal calcium hydroaluminates. This ensures stable growth of the strength of the cement stone and a reduction in destructive processes during long-term hardening.

Research in the  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  system uses various instrumental research methods [55-58], including numerical methods by modeling cement hydration and microstructure formation [59].

### **Свойства высокоглиноземистых цементов**

Прочность является наиболее важным свойством алюминатного цемента. Его способность быстро затвердевать при затворении водой является отличительной чертой этого цемента. Трехдневная прочность, как правило, соответствует 28-дневной прочности портландцемента.

Прочность цементного камня алюминатного цемента зависит от минералогического и гранулометрического состава [4,5,60,61]. Цемент моноалюминатного состава (CA) имеет сравнительно высокую прочность в начальные сроки твердения без существенного прироста при длительном твердении. Цемент, содержащий диалюминат кальция, при низкой прочности в первые сутки достигает высоких показателей при длительном твердении. Регулируя соотношение CA / CA<sub>2</sub> и дисперсность цемента можно получать цементы с равномерным нарастанием прочности во все сроки твердения [4].

Как и в случае портландцемента повышение температуры при гидратации алюминатных цементов интенсифицирует процесс гидратации минералов, что приводит к быстрому образованию большого количества мелкокристаллических и гелеобразных продуктов реакций, которые за короткий период твердения не могут образовать прочный кристаллический каркас. Перекристаллизации первичных пластинчатых кристаллов CAH<sub>10</sub> и C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>, стабильных при комнатной температуре, в устойчивый кристаллогидрат C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> также препятствует образованию прочного цементного камня. Наибольшее снижение прочности цементного камня наблюдается в возрасте до 28 сут. Чем выше температура и чем длительнее ее воздействие, тем значительно снижается прочность. Поэтому изделия из глиноземистого цемента не рекомендуется пропаривать или подвергать автоклавной обработке. Для предотвращения снижения прочности бетона на основе глиноземистого цемента используют холодную воду и заполнитель, интенсивную поливку бетона водой.

Высокоглиноземистый цемент, содержащий CA<sub>2</sub>, ввиду медленного твердения в начальные сроки целесообразно пропаривать. После пропаривания прочность цементного камня из CA<sub>2</sub> практически находится на уровне его 3-х суток прочности, при твердении в обычных условиях. Характер изменения прочности при сушке и дальнейшем нагреве цементного камня, подвергнутого пропариванию, не отличается от изменения прочностных показателей цемента, твердевшего в водных и воздушных условиях.

Жаростойкие свойства алюминатных цементов, таких как остаточная прочность, огнеупорность, деформация под нагрузкой при высоких температурах, термостойкость зависят от химико-минералогического состава цемента, вида заполнителя. В качестве заполнителя обычно применяют шамот, бой огнеупорного высокоглиноземистого кирпича, электрокорунда. Огнеупорность бетонов на основе глиноземистого цемента, рассчитанных на преимущественное содержание в них CA<sub>2</sub>, составляет 1740-1770°C.

Повышение технических свойств ВГЦ может осуществляться различными способами. Одним из таких способов является изменение технологических параметров на процессы формирования цементного клинкера (химический состав сырьевой смеси, ее гомогенность, температура обжига, скорость охлаждения и др.).

Введения в сырьевую смесь различных добавок может приводить как к интенсификации процесса синтеза

### **Properties of high alumina cements**

Strength is the most important property of aluminate cement. Its ability to harden quickly when mixed with water is a distinctive feature of this cement. The three-day strength is generally equivalent to the 28-day strength of portland cement.

The strength of aluminate cement stone depends on the mineralogical and granulometric composition [4,5,60,61]. Monoaluminate cement (CA) has a comparatively high strength in the initial stages of hardening without a significant increase during long-term hardening. Cement containing calcium dialuminate, with low strength in the first day, achieves high values with prolonged hardening. By adjusting the ratio of CA / CA<sub>2</sub> and the dispersion of cement, it is possible to obtain cements with a uniform increase in strength throughout all hardening periods [4].

As in the case of Portland cement, an increase in temperature during the hydration of aluminate cements intensifies the process of mineral hydration, which leads to the rapid formation of a large number of fine-crystalline and gel-like reaction products, which cannot form a strong crystalline framework during a short period of hardening. Recrystallization of primary plate-like crystals CAH<sub>10</sub> and C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub>, stable at room temperature, into stable crystal hydrate C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> also prevents the formation of durable cement stone. The greatest decrease in the strength of cement stone is observed at the age of up to 28 days. The higher the temperature and the longer its exposure, the more significantly the strength decreases. Therefore, it is not recommended to steam or autoclave products made from aluminous cement. To prevent a decrease in the strength of concrete based on aluminous cement, cold water and filler are used, and the concrete is intensively watered.

High-alumina cement containing CA<sub>2</sub>, due to its slow hardening in the initial stages, should be steamed. After steaming, the strength of the cement stone from CA<sub>2</sub> is practically at the level of its 3-day strength, when hardening under normal conditions. The nature of the change in strength during drying and further heating of the cement stone subjected to steaming does not differ from the change in the strength indicators of cement hardened in water and air conditions.

Heat-resistant properties of aluminate cements, such as residual strength, refractoriness, deformation under load at high temperatures, heat resistance depend on the chemical and mineralogical composition of the cement and the type of filler. Fireclay, broken high-alumina refractory bricks, and electrocorundum are usually used as filler. The fire resistance of concretes based on aluminous cement, designed for the predominant content of CA<sub>2</sub>, is 1740-1770°C.

Improving the technical properties of HAC can be accomplished in various ways. One of such methods is changing the technological parameters of the cement clinker formation processes (chemical composition of the raw mix, its homogeneity, firing temperature, cooling rate, etc.).

The introduction of various additives into the raw material mixture can lead to both the intensification of the

алюминатов кальция, так и к формированию новых минералов цементного клинкера. Появление новых фаз сильно влияет на технические свойства получаемого цемента [4].

С целью получения огнеупорного цемента перспективной добавкой, повышающей огнеупорность и не ухудшающей вяжущие свойства, является добавка оксида циркония [36]. Эта добавка вводится в сырьевую шихту при обжиге клинкера.

Цементы с добавкой  $ZrO_2$  могут содержать в своем минералогическом составе  $CaZrO_3$  совместно  $Ca_7ZrAl_6O_{18}$  [62,63]. Эти соединения обладают высокой огнеупорностью и вяжущими свойствами.

### Заключение

Несмотря на успехи, достигнутые в области создания высокоглиноземистых цементов, дальнейшее расширение их ассортимента и улучшение качества является весьма актуальным. Это предопределяется ростом производства и совершенствованием технологий различных отраслей промышленности. В этих условиях необходимы цементы, обеспечивающие долговечность футеровок тепловых агрегатов, т.е. их создание является важной и актуальной задачей.

Среди различных направлений исследований по повышению технических свойств ВГЦ внимание исследователей привлекает проблема направленного воздействия (т.е. изменения технологических параметров) на процессы формирования цементного клинкера (химический состав сырьевой смеси, ее гомогенность, температура обжига, скорость охлаждения, введения различных добавок и др.).

Огнеупорные свойства высокоглиноземистых цементов повышаются с увеличением содержания  $Al_2O_3$ . Вместе с тем, от цемента требуется и быстрый набор прочности, а это достигается повышением основности минералов, т.е. увеличением содержания СаО. Исходя из ряда опубликованных данных и теоретических предположений, для исследований принят состав высокоглиноземистого цемента из расчета получения 10 % СА и 90%  $CA_2$ .

Анализ литературных данных показывает, что улучшение жаростойких свойств может быть обеспечено введением в состав сырьевой смеси при обжиге клинкера более огнеупорных добавок. Однако, в этом случае можно ожидать образование в составе цемента гидратационно неактивных соединений, которые могут привести к снижению одного из основных показателей цемента - его прочности.

Наиболее перспективным и наиболее востребованным в настоящее время является использование соединений циркония в сочетании с минерализатором обжига, что требует широкомасштабных научных исследований.

### Литература.

1. Неформованные огнеупоры: Справочное издание: В 2-х томах. Т. I. Свойства и применение неформованных огнеупоров / Под ред. И. Д. Кашеева. — 2-е изд. — М.: Теплотехник, 2004. — 400 с.
2. Неформованные огнеупоры: Справочное издание: В 2-х томах. Т. I. Книга 1. Общие вопросы технологии / Ю. Е. Пивинский. — 2-е изд. — М.: Теплотехник, 2004. — 448 с.
3. Некрасов К.Д. Жароупорный бетон. - М.: Промстройиздат, 1957. — 283 с.
4. Кузнецова, Т. В. Глиноземистый цемент / Т. В. Кузнецова, Й. Талабер. — Москва: Стройиздат, 1988. — 272 с. — ISBN 5-274-00217-X. — EDN YQMMAP.

process of synthesis of calcium aluminates and the formation of new cement clinker minerals. The appearance of new phases greatly influences the technical properties of the resulting cement [4].

In order to obtain refractory cement, a promising additive that increases refractoriness without worsening the binding properties is the addition of zirconium oxide [36]. This additive is introduced into the raw material batch during clinker firing.

Cements with the addition of  $ZrO_2$  can contain  $CaZrO_3$  together with  $Ca_7ZrAl_6O_{18}$  in their mineralogical composition [62,63]. These compounds have high fire resistance and binding properties.

### Conclusion

Despite the successes achieved in the field of creating high-alumina cements, further expansion of their range and improvement of quality is highly relevant. This is determined by the growth of production and the improvement of technologies in various branches of industry. In these conditions, cements are needed to ensure the durability of the linings of thermal units, i.e. their creation is an important and urgent task.

Among the various areas of research on improving the technical properties of HAC, the attention of researchers is drawn to the problem of targeted influence (i.e. changing the process parameters) on the processes of formation of cement clinker (chemical composition of the raw material mixture, its homogeneity, firing temperature, cooling rate, introduction of various additives, etc.).

The refractory properties of high alumina cements increase with increasing content of  $Al_2O_3$ . At the same time, cement is also required to quickly gain strength, and this is achieved by increasing the basicity of minerals, i.e. by increasing the content of СаО. Based on a number of published data and theoretical assumptions, the composition of high-alumina cement was adopted for the research based on the calculation of obtaining 10 % of CA and 90% of  $CA_2$ .

Analysis of literary data shows that improvement of heat-resistant properties can be achieved by introducing more refractory additives into the composition of the raw mixture during clinker firing. However, in this case, one can expect the formation of hydration-inactive compounds in the cement composition, which can lead to a decrease in one of the main indicators of cement - its strength.

The most promising and most in-demand method at present is the use of zirconium compounds in combination with a roasting mineralizer, which requires large-scale scientific research.

### References:

1. Neformovannyye ogneupory: Spravochnoe izdanie: V 2-h tomah. T. I. Svoystva i primeneniye neformovannykh ogneuporov / Pod red. I. D. Kasheeva. — 2-e izd. — M.: Teplo-tehnik, 2004. — 400 s.
2. Neformovannyye ogneupory: Spravochnoe izdanie: V 2-h tomah. T. I. Kniga 1. Obschie voprosy tehnologii / Yu. E. Pivinskiy. — 2-e izd. — M.: Teplotehnik, 2004. — 448 s.
3. Nekrasov K.D. Zharoupornyy beton. - M.: Prom-stroyizdat, 1957. — 283 s.
4. Kuznecova, T. V. Glinozemisty cement / T. V. Kuznecova, Y. Talaber. — Moskva: Stroyizdat, 1988. — 272 s. — ISBN 5-274-00217-X. — EDN YQMMAP.



5. Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы / Т. В. Кузнецова. – Москва: Стройиздат, 1986. – 208 с. – EDN YRNAYL.
6. Кулиева, Б. А. Физико-химические свойства и области применения глиноземистого цемента / Б. А. Кулиева, А. Арыков, Д. Атаев // Вестник науки. – 2024. – Т. 2, № 4(73). – С. 653-656. – EDN XYRLQR.
7. Кривобородов Ю.Р. Специальные цементы: разновидности, свойства и применение // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30. № 1. С. 84-91
8. Alonso M.C., Vera-Agullo J., Guerreiro L., Flor-Laguna V., Sanchez M., Collares-Pereira M. Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants Original Research Article // Cement and Concrete Research, Volume 82, April 2016, Pages 74-86
9. Тейлор, Х.Ф.У. Химия цемента / Х.Ф.У. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
10. Yongpan Tian, Xiaolin Pan, Haiyan Yu, Ganfeng Tu. Formation mechanism of calcium aluminate compounds based on high-temperature solid-state reaction. Original Research Article // Journal of Alloys and Compounds, Volume 670, 15 June 2016, Pages 96-104
11. Di Zhang, Xiaolin Pan, Haiyan Yu, Yuchun Zhai. Mineral Transition of Calcium Aluminate Clinker during High-Temperature Sintering with Low-lime Dosage Original Research Article // Journal of Materials Science & Technology, Volume 31, Issue 12, December 2015, Pages 1244-1250
12. Анализ структурно-фазового состояния моноалюмината кальция / Ю. А. Абзаев, Ю. С. Саркисов, Т. В. Кузнецова [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 3(47). – С. 56-62. – DOI 10.5862/MCE.47.6. – EDN SBZAHX.
13. Влияние режимов термообработки на процесс синтеза кальций-алюминатных фаз в технологии особо чистого высокоглиноземистого цемента / М. А. Трубицын, М. Н. Япрынтцев, Л. В. Фурда [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 2. – С. 84-93. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-2-84-93. – EDN TOWZFY.
14. Impact of Precursor Granulometry on the Synthesis of Calcium-Aluminate Phases / M. A. Trubitsyn, L. V. Furda, M. N. Yapryntsev [et al.] // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2023. – Vol. 96, No. 3. – P. 297-309. – DOI 10.1134/s1070427223030059. – EDN PSUXEE.
15. Гусев Б.В., Кривобородов Ю.Р., Самченко С.В. Технология портландцемента и его разновидностей: Учебное пособие / Москва, 2016. 113 с.
16. Бурлов И.Ю. Синтез алюминатных и алюмоферритных клинкеров в печи плазменного типа/ Атореф. дисс. на соискание уч. степени кад. наук – М - 2002.-17 с.
17. Кривобородов Ю.Р., Самченко С.В. Физико-химические свойства сульфатированных клинкеров / Аналитический обзор / Сер. I Цементная промышленность Том Выпуск 2. Москва, 1991.
18. Кузнецова, Т. В. Глиноземистый цемент и его разновидности – Москва: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1975. – 48 с.
19. Kuznetsova, T. V. Development of compositions for refractory material containing aluminomagnesian spinel / T. V. Kuznetsova, N. S. Tret'yakova // Glass and Ceramics. – 2004. – Vol. 61, No. 5-6. – P. 154-156. – DOI 10.1023/B:GLAC.0000043078.27925.b4. – EDN LIQAOP.
20. Совершенствование свойств глинозёмистого цемента и его применение / С. В. Самченко, Т. А. Лютикова, Т. В. Кузнецова, Т. Г. Дудолодова // Цемент и его применение. – 2006. – № 3. – С. 46-48. – EDN HUZJMV.
21. Самченко, С. В. Влияние микропримесей на фазовый состав глиноземистых цементов / С. В. Самченко, Т. В. Кузнецова // Современные задачи инженерных наук : сборник научных трудов Симпозиума и Международного научно-технического Форума, Москва, 11–12 октября 2017 года. –
5. Kuznecova, T. V. Alyuminatnye i sul'foalyuminatnye cementy / T. V. Kuznecova. – Moskva: Stroyizdat, 1986. – 208 s. – EDN YRNAYL.
6. Kulieva, B. A. Fiziko-himicheskie svoystva i oblasti primeneniya glinozemistogo cementa / B. A. Kulieva, A. Arykov, D. Ataev // Vestnik nauki. – 2024. – T. 2, № 4(73). – S. 653-656. – EDN XYRLQR.
7. Krivoborodov Yu.R. Special'nye cementy: razno-vidnosti, svoystva i primeneniye // Tehnika i tehnologiya silikatov. 2023. T. 30. № 1. S. 84-91
8. Alonso M.C., Vera-Agullo J., Guerreiro L., Flor-Laguna V., Sanchez M., Collares-Pereira M. Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants Original Research Article // Cement and Concrete Research, Volume 82, April 2016, Pages 74-86
9. Teylor, H.F.U. Himiya cementa / H.F.U. Teylor. – M.: Mir, 1996. – 560 s.
10. Yongpan Tian, Xiaolin Pan, Haiyan Yu, Ganfeng Tu. Formation mechanism of calcium aluminate compounds based on high-temperature solid-state reaction. Original Research Article // Journal of Alloys and Compounds, Volume 670, 15 June 2016, Pages 96-104
11. Di Zhang, Xiaolin Pan, Haiyan Yu, Yuchun Zhai. Mineral Transition of Calcium Aluminate Clinker during High-Temperature Sintering with Low-lime Dosage Original Research Article // Journal of Materials Science & Technology, Volume 31, Issue 12, December 2015, Pages 1244-1250
12. Analiz strukturno-fazovogo sostoyaniya monoalyuminata kal'ciya / Yu. A. Abzaev, Yu. S. Sarkisov, T. V. Kuznecova [i dr.] // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. – 2014. – № 3(47). – S. 56-62. – DOI 10.5862/MCE.47.6. – EDN SBZAHX.
13. Vliyanie rezhimov termoobrabotki na process sin-teza kal'ciy-alyuminatnykh faz v tehnologii osobo chistogo vysokogli-nozemistogo cementa / M. A. Trubicyn, M. N. Yapryncev, L. V. Furda [i dr.] // Vestnik Belgorodskogo gos-udarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shu-hova. – 2022. – № 2. – S. 84-93. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-2-84-93. – EDN TOWZFY.
14. Impact of Precursor Granulometry on the Synthesis of Calcium-Aluminate Phases / M. A. Trubitsyn, L. V. Furda, M. N. Yapryntsev [et al.] // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2023. – Vol. 96, No. 3. – P. 297-309. – DOI 10.1134/s1070427223030059. – EDN PSUXEE.
15. Gusev B.V., Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Tehnologiya portlandcementa i ego raznovidnostey: Uchebnoe posobie / Moskva, 2016. 113 s.
16. Burlov I.Yu. Sintez alyuminatnykh i alyumoferritnykh klinkerov v pechi plazmennogo tipa/ Ato-ref. diss. na soiskanie uch. stepeni kad. nauk – M - 2002.-17 s.
17. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Fiziko-himicheskie svoystva sul'fatirovannykh klinkerov / Anali-ticheskiy obzor / Ser. I Cementnaya promyshlennost' Tom Vypusk 2. Moskva, 1991.
18. Kuznecova, T. V. Glinozemisty cement i ego razno-vidnosti – Moskva: MHTI im. D.I. Mendeleeva, 1975. – 48 s.
19. Kuznetsova, T. V. Development of compositions for refractory material containing aluminomagnesian spinel / T. V. Kuznetsova, N. S. Tret'yakova // Glass and Ceramics. – 2004. – Vol. 61, No. 5-6. – P. 154-156. – DOI 10.1023/B:GLAC.0000043078.27925.b4. – EDN LIQAOP.
20. Sovershenstvovanie svoystv glinozemistogo cemen-ta i ego primeneniye / S. V. Samchenko, T. A. Lyutikova, T. V. Kuznecova, T. G. Dudoladova // Cement i ego primeneniye. – 2006. – № 3. – S. 46-48. – EDN HUZJMV.
21. Samchenko, S. V. Vliyanie mikroprimesey na fazovyy sostav glinozemistyykh cementov / S. V. Samchenko, T. V. Kuznecova // Sovremennyye zadachi inzhenernykh nauk : sbornik nauchnykh trudov Simpoziuma i Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo Forum, Moskva, 11–12 oktyabrya 2017 goda. – Moskva: Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet im. A.N. Kosy-gina, 2017. – S. 102-105. – EDN YPCBMV.

- Москва: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, 2017. – С. 102-105. – EDN YPCBMV.
22. Гусев, Б. В. Свойства глиноземистых цементов при различных режимах кристаллизации расплава / Б. В. Гусев, Т. В. Кузнецова, С. В. Самченко // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии : Тезисы докладов в 5 томах, Екатеринбург, 26–30 сентября 2016 года / Уральское отделение Российской академии наук. Том 3. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2016. – С. 150. – EDN XXTGWL.
  23. Jin-hong Li, Bi-ya Cai, Wu-wei Feng, Yu-qin Liu, Hong-wen Ma. Investigations on phase constitution, mechanical properties and hydration kinetics of aluminous cements containing magnesium aluminate spinel // *Ceramics International*, Volume 39, Issue 7, September 2013, Pages 8393-8400
  24. Braulio M.A.L., Morbioli G.G., Milanez D.H., Pandolfelli V.C. Calcium aluminate cement source evaluation for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO refractory castables // *Ceramics International*, Volume 37, Issue 1, January 2011, Pages 215-221
  25. Куколев Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов. – М: Высшая школа, 1966, - 463 с.
  26. Куколев Г.В., Ройзен А.И. Огнеупорные бетоны с повышенными огневыми свойствами // *Огнеупоры*, 1949, №2, С. 11-12.
  27. Кравченко И.В. Глиноземистый цемент. - М.: Госстройиздат, 1961, - 175 с.
  28. Мельник М.Т., Илюха Н.Г. Шаповалова Н.Н. Огнеупорные цементы. – Киев: Вища школа. – 121 с.
  29. Ewais E.M.M., Khalil N.M., Amin M.S., Ahmed Y.M.Z., Barakat M.A. Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement // *Ceramics International*, Volume 35, Issue 8, December 2009, Pages 3381-3388
  30. Arbi K., Palomo A., Fernández-Jiménez A. Alkali-activated blends of calcium aluminate cement and slag/diatomite // *Ceramics International*, Volume 39, Issue 8, December 2013, Pages 9237-9245
  31. Kouznetsova, T. V. The use of vanadium production waste to produce alumina cement / T. V. Kouznetsova, Y. R. Krivoborodov, I. Y. Burlov // *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, Moscow, 06–07 июня 2018 года. Vol. 326. – Moscow: American Concrete Institute, 2018. – EDN EWRJVH.
  32. Никитина, М. А. Оценочная характеристика качества кальциево-алюминатного цемента с использованием техногенных материалов / М. А. Никитина, И. Н. Борисов, Т. И. Тимошенко // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси.* – 2020. – № 4(61). – С. 16-25. – EDN BTPQXY.
  33. Перспективы использования глиноземсодержащих отходов промышленности в производстве жаростойких бетонов / А. И. Хлыстов, С. В. Соколова, М. Н. Баранова [и др.] // *Экология и промышленность России.* – 2021. – Т. 25, № 7. – С. 13-19. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-7-13-19. – EDN RDZYBR.
  34. Исследование возможности использования алюминатных отходов алюминиевых сплавов для получения глиноземистого цемента / А. А. Крутилин, Т. В. Крапчетова, Н. А. Инькова, О. К. Пахомова // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 125-138. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-6-125-138. – EDN ZUZWRN.
  35. Эваис Э.М., Ахмед Й.М.З., Халил Н.М., Амин М.С., Баракат М.А. Использование алюминиевого шлама и алюминиевого шлака (окалина) для изготовления глиноземистого цемента // *Огнеупоры и техническая керамика.* 2010. № 11-12. С. 61-69. EDN: OJBQWR
  36. Илюха Н.Г. Цементы специального назначения на основе алюминатов щелочноземельных элементов и двойных оксидов. Автореф. дисс. д-ра техн. наук. – Харьков, 1984. – 48 с. (для служебного пользования).
  37. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня: монография / С. В. Самченко. Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. 284 с.
  22. Gusev, B. V. Svoystva glinozemistykh cementov pri razlichnykh rezhimakh kristallizatsii rasplava / B. V. Gusev, T. V. Kuznecova, S. V. Samchenko // *HH Mendeleevskiy s'ezd po obshchey i prikladnoy himii : Tezisy dokladov v 5 tomah*, Ekaterinburg, 26–30 sentyabrya 2016 goda / Ural'skoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk. Tom 3. – Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie RAN, 2016. – S. 150. – EDN XXTGWL.
  23. Jin-hong Li, Bi-ya Cai, Wu-wei Feng, Yu-qin Liu, Hong-wen Ma. Investigations on phase constitution, mechanical properties and hydration kinetics of aluminous cements containing magnesium aluminate spinel // *Ceramics International*, Volume 39, Issue 7, September 2013, Pages 8393-8400
  24. Braulio M.A.L., Morbioli G.G., Milanez D.H., Pandolfelli V.C. Calcium aluminate cement source evaluation for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO refractory castables // *Ceramics International*, Volume 37, Issue 1, January 2011, Pages 215-221
  25. Kukolev G.V. Himiya kremniya i fizicheskaya himiya silikatov. – M: Vysshaya shkola, 1966, - 463 s.
  26. Kukolev G.V., Royzen A.I. Ogneupornye betony s povyshennymi ognevymi svoystvami // *Ogneupory*, 1949, №2, S. 11-12.
  27. Kravchenko I.V. Glinozemisty cement. - M.: Gosstroyizdat, 1961, - 175 s.
  28. Mel'nik M.T., Ilyuha N.G. Shapovalova N.N. Ogneupornye cementy. – Kiev: Vischa shkola. – 121 s.
  29. Ewais E.M.M., Khalil N.M., Amin M.S., Ahmed Y.M.Z., Barakat M.A. Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement // *Ceramics International*, Volume 35, Issue 8, December 2009, Pages 3381-3388
  30. Arbi K., Palomo A., Fernández-Jiménez A. Alkali-activated blends of calcium aluminate cement and slag/diatomite // *Ceramics International*, Volume 39, Issue 8, December 2013, Pages 9237-9245
  31. Kouznetsova, T. V. The use of vanadium production waste to produce alumina cement / T. V. Kouznetsova, Y. R. Krivoborodov, I. Y. Burlov // *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, Moscow, 06–07 iyunya 2018 goda. Vol. 326. – Moscow: American Concrete Institute, 2018. – EDN EWRJVH.
  32. Nikitina, M. A. Ochenochnaya karakteristika kachestva kal'cievo-alyuminatnogo cementa s ispol'zovaniem tehnogennykh materialov / M. A. Nikitina, I. N. Borisov, T. I. Timoshenko // *ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi.* – 2020. – № 4(61). – S. 16-25. – EDN BTPQXY.
  33. Perspektivy ispol'zovaniya glinozemsoderzhashchikh othodov promyshlennosti v proizvodstve zharostoykikh betonov / A. I. Hlystov, S. V. Sokolova, M. N. Baranova [i dr.] // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii.* – 2021. – T. 25, № 7. – S. 13-19. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-7-13-19. – EDN RDZYBR.
  34. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya alyuminatnykh othodov alyuminiyevykh splavov dlya polucheniya glinozemistogo cementa / A. A. Krutilin, T. V. Krapchetova, N. A. In'kova, O. K. Pahomova // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta.* – 2023. – T. 25, № 6. – S. 125-138. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-6-125-138. – EDN ZUZWRN.
  35. Ewais E.M., Ahmed Y.M.Z., Halil N.M., Amin M.S., Barakat M.A. Ispol'zovanie alyuminiyevogo shlama i alyuminiyevogo shlaka (okaliny) dlya izgotovleniya glinozemistogo cementa // *Ogneupory i tehniceskaya keramika.* 2010. № 11-12. S. 61-69. EDN: OJBQWR
  36. Ilyuha N.G. Cementy special'nogo naznacheniya na osnove alyuminatov schelochnozemel'nykh elementov i dvoynykh oksidov. Avtoref. diss. d-ra tehn. nauk. – Har'kov, 1984. – 48 s. (dlya sluzhebnoho pol'zovaniya).
  37. Samchenko S.V. Formirovanie i genezis struktury cementnogo kamnya: monografiya / S. V. Samchenko. Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, Ay Pi Er Media, EBS ASV, 2016. 284 s.

38. Matusinović T, Šipušić J, Vrbos N. Porosity–strength relation in calcium aluminate cement pastes // *Cement and Concrete Research*, Volume 33, Issue 11, November 2003, Pages 1801-1806
39. 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
40. Krivoborodov, Y. R. Structural Changes in Refractory Calcium Aluminate Cement Concrete / Y. R. Krivoborodov, T. V. Kuznetsova, S. V. Samchenko // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – Vol. 59, No. 2. – P. 151-155. – DOI 10.1007/s11148-018-0197-1. – EDN BREKVE.
41. Кузнецова, Т. В. Изменения свойств высокоглиноземистого цементного камня при нагревании / Т. В. Кузнецова // *Сухие строительные смеси*. – 2018. – № 1. – С. 26-28. – EDN XQIBHV.
42. Кузнецова, Т. В. Изменения свойств высокоглиноземистого цементного камня при нагревании / Т. В. Кузнецова // *Технологии бетонов*. – 2017. – № 11-12(136-137). – С. 40-42. – EDN YMQQBM.
43. Минералогический состав продуктов гидратации алюминатных цементов / Г. М. Калатоци, Х. В. Урманова, Д. Д. Нецвет [и др.] // *Региональная архитектура и строительство*. – 2024. – № 1(58). – С. 40-46. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_1\_40. – EDN IHRXPU.
44. Neven Ukrainczyk, Tomislav Matusinović. Thermal properties of hydrating calcium aluminate cement pastes // *Cement and Concrete Research*, Volume 40, Issue 1, January 2010, Pages 128-136
45. Peiming Wang, Linglin Xu. Hydration properties of portland cement plus calcium aluminate cement at 0~20°C // *Procedia Engineering*, Volume 27, 2012, Pages 253-260
46. Nasser Y. Mostafa, Z.I. Zaki, Omar H. Abd Elkader. Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature // *Cement and Concrete Composites*, Volume 34, Issue 10, November 2012, Pages 1187-1193
47. Klaus S.R., Neubauer J., Goetz-Neunhoeffler F. Hydration kinetics of CA2 and CA—Investigations performed on a synthetic calcium aluminate cement // *Cement and Concrete Research*, Volume 43, January 2013, Pages 62-69
48. Valentin Antonovič, Jadvyga Kerienė, Renata Boris, Marius Aleknevičius. The Effect of Temperature on the Formation of the Hydrated Calcium Aluminate Cement Structure // *Procedia Engineering*, Volume 57, 2013, Pages 99-106
49. Xuejun Shang, Guotian Ye, Yaqian Zhang, Huanhuan Li, Dan Hou. Effect of micro-sized alumina powder on the hydration products of calcium aluminate cement at 40 °C // *Ceramics International*, Volume 42, Issue 13, October 2016, Pages 14391-14394
50. Кривобородов Ю.Р., Бойко А.А. Влияние минеральных добавок на гидратацию глиноземистого цемента // *Техника и технология силикатов*. 2011. Т. 18. № 4. С. 12-15.
51. Önder Kırca, İ. Özgür Yaman, Mustafa Tokyay. Compressive strength development of calcium aluminate cement–GGBFS blends // *Cement and Concrete Composites*, Volume 35, Issue 1, January 2013, Pages 163-170
52. Małgorzata Niziurska, Jan Małolepszy, Grzegorz Malata. The Influence of Lithium Carbonate on Phase Composition of Calcium Aluminate Cement Paste // *Procedia Engineering*, Volume 108, 2015, Pages 363-370
53. Ru Wang, Pei-Ming Wang. Formation of hydrates of calcium aluminates in cement pastes with different dosages of SBR powder. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 2, February 2011, Pages 736-741
54. Невед'ев, А. П. Смешанное вяжущее на основе глиноземистого цемента и метаксаолина / А. П. Невед'ев, Д. Ю. Коссов, Т. В. Кузнецова // *Сухие строительные смеси*. – 2014. – № 2. – С. 28-30. – EDN TAQHEN.
55. David Torrén-Martín, Lucía Fernández-Carrasco, Sagrario Martínez-Ramírez. Hydration of calcium aluminates and
38. Matusinović T, Šipušić J, Vrbos N. Porosity–strength relation in calcium aluminate cement pastes // *Cement and Concrete Research*, Volume 33, Issue 11, November 2003, Pages 1801-1806
39. 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
40. Krivoborodov, Y. R. Structural Changes in Refractory Calcium Aluminate Cement Concrete / Y. R. Krivoborodov, T. V. Kuznetsova, S. V. Samchenko // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – Vol. 59, No. 2. – P. 151-155. – DOI 10.1007/s11148-018-0197-1. – EDN BREKVE.
41. Kuznecova, T. V. Izmeneniya svoystv vysokoglinozemistogo cementnogo kamnya pri nagrevanii / T. V. Kuznecova // *Suhie stroitel'nye smesi*. – 2018. – № 1. – S. 26-28. – EDN XQIBHV.
42. Kuznecova, T. V. Izmeneniya svoystv vysokoglinozemistogo cementnogo kamnya pri nagrevanii / T. V. Kuznecova // *Tehnologii betonov*. – 2017. – № 11-12(136-137). – S. 40-42. – EDN YMQQBM.
43. Mineralogicheskiy sostav produktov gidratatsii aluminatnyh cementov / G. M. Kalatozi, H. V. Urmanova, D. D. Necvet [i dr.] // *Regional'naya arhitektura i stroitel'-stvo*. – 2024. – № 1(58). – S. 40-46. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_1\_40. – EDN IHRXPU.
44. Neven Ukrainczyk, Tomislav Matusinović. Thermal properties of hydrating calcium aluminate cement pastes // *Cement and Concrete Research*, Volume 40, Issue 1, January 2010, Pages 128-136
45. Peiming Wang, Linglin Xu. Hydration properties of portland cement plus calcium aluminate cement at 0~20°C // *Procedia Engineering*, Volume 27, 2012, Pages 253-260
46. Nasser Y. Mostafa, Z.I. Zaki, Omar H. Abd Elkader. Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature // *Cement and Concrete Composites*, Volume 34, Issue 10, November 2012, Pages 1187-1193
47. Klaus S.R., Neubauer J., Goetz-Neunhoeffler F. Hydration kinetics of CA2 and CA—Investigations performed on a synthetic calcium aluminate cement // *Cement and Concrete Research*, Volume 43, January 2013, Pages 62-69
48. Valentin Antonovič, Jadvyga Kerienė, Renata Boris, Marius Aleknevičius. The Effect of Temperature on the Formation of the Hydrated Calcium Aluminate Cement Structure // *Procedia Engineering*, Volume 57, 2013, Pages 99-106
49. Xuejun Shang, Guotian Ye, Yaqian Zhang, Huanhuan Li, Dan Hou. Effect of micro-sized alumina powder on the hydration products of calcium aluminate cement at 40 °C // *Ceramics International*, Volume 42, Issue 13, October 2016, Pages 14391-14394
50. Krivoborodov Yu.R., Boyko A.A. Vliyanie mineral'nyh dobavok na gidratatsiyu glinozemistogo cementa // *Teh-nika i tehnologiya silikatov*. 2011. T. 18. № 4. S. 12-15.
51. Önder Kırca, İ. Özgür Yaman, Mustafa Tokyay. Compressive strength development of calcium aluminate cement–GGBFS blends // *Cement and Concrete Composites*, Volume 35, Issue 1, January 2013, Pages 163-170
52. Małgorzata Niziurska, Jan Małolepszy, Grzegorz Malata. The Influence of Lithium Carbonate on Phase Composition of Calcium Aluminate Cement Paste // *Procedia Engineering*, Volume 108, 2015, Pages 363-370
53. Ru Wang, Pei-Ming Wang. Formation of hydrates of calcium aluminates in cement pastes with different dosages of SBR powder. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 2, February 2011, Pages 736-741
54. Nefed'ev, A. P. Smeshannoe vyazhushee na osnove glinozemistogo cementa i metakaolina / A. P. Nefed'ev, D. Yu. Kossov, T. V. Kuznecova // *Suhie stroitel'nye smesi*. – 2014. – № 2. – S. 28-30. – EDN TAQHEN.
55. David Torrén-Martín, Lucía Fernández-Carrasco, Sagrario Martínez-Ramírez. Hydration of calcium aluminates and

- calcium sulfoaluminate studied by Raman spectroscopy // Cement and Concrete Research, Volume 47, May 2013, Pages 43-50
56. Chotard T., Gimet-Breart N., Smith A., Fargeot D., Bonnet J.P., Gault C. Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age // Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 3, March 2001, Pages 405-412
57. García del Cura, P. Garcés, E. García Alcocel. Petrographical analysis of calcium aluminate cement mortars: Scanning electron microscopy and transmitted light microscopy // Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 12, December 1999, Pages 1881-1885
58. Ana Cuesta, Rodrigo U. Ichikawa, Diana Londono-Zuluaga, Angeles G. De la Torre, Isabel Santacruz, Xavier Turrillas, Miguel A.G. Aranda. Aluminum hydroxide gel characterization within a calcium aluminate cement paste by combined Pair Distribution Function and Rietveld analyses // Cement and Concrete Research, Volume 96, June 2017, Pages 1-12
59. Yang Liu, Muyu Liu, Hua Li, Guitao Luo, Hongbo Tan, Qimin Liu Hydration kinetics of Portland cement shifting from silicate to aluminate dominance based on multi-mineral reactions and interactions // Materials & Design 233 (2023) 112228, doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112228
60. Самченко С.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние дисперсности специального цемента на структуру твердеющего камня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2003. № 5-2. С. 238-240.
61. Самченко С.В., Зорин Д.А., Борисенкова И.В. Влияние дисперсности глиноземистого шлака и сульфоалюминатного клинкера на формирование структуры цементного камня // Техника и технология силикатов. 2011. Т. 18. № 2. С. 12-14.
62. Bruni Y.L., Garrido L.B., Aglietti E.F. Reaction and phases from monoclinic zirconia and calcium aluminate cement at high temperatures // Ceramics International, Volume 38, Issue 5, July 2012, Pages 4237-4244
63. Eun-Hee Kang, Jun-Sang Yoo, Bo-Hye Kim, Sung-Woo Choi, Seong-Hyeon Hong. Synthesis and hydration behavior of calcium zirconium aluminate (Ca<sub>7</sub>ZrAl<sub>6</sub>O<sub>18</sub>) cement // Cement and Concrete Research, Volume 56, February 2014, Pages 106-111
- calcium sulfoaluminate studied by Raman spectroscopy // Cement and Concrete Research, Volume 47, May 2013, Pages 43-50
56. Chotard T., Gimet-Breart N., Smith A., Fargeot D., Bonnet J.P., Gault C. Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age // Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 3, March 2001, Pages 405-412
57. García del Cura, P. Garcés, E. García Alcocel. Petrographical analysis of calcium aluminate cement mortars: Scanning electron microscopy and transmitted light microscopy // Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 12, December 1999, Pages 1881-1885
58. Ana Cuesta, Rodrigo U. Ichikawa, Diana Londono-Zuluaga, Angeles G. De la Torre, Isabel Santacruz, Xavier Turrillas, Miguel A.G. Aranda. Aluminum hydroxide gel characterization within a calcium aluminate cement paste by combined Pair Distribution Function and Rietveld analyses // Cement and Concrete Research, Volume 96, June 2017, Pages 1-12
59. Yang Liu, Muyu Liu, Hua Li, Guitao Luo, Hongbo Tan, Qimin Liu Hydration kinetics of Portland cement shifting from silicate to aluminate dominance based on multi-mineral reactions and interactions // Materials & Design 233 (2023) 112228, doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112228
60. Samchenko S.V., Krivoborodov Yu.R. Vliyanie dispersnosti special'nogo cementa na strukturu tverdeyushego kamnya // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. 2003. № 5-2. S. 238-240.
61. Samchenko S.V., Zorin D.A., Borisenkova I.V. Vliyanie dispersnosti glinozemistogo shlaka i sul'foalyumi-natnogo klinkera na formirovanie struktury cementnogo kamnya // Tehnika i tehnologiya silikatov. 2011. T. 18. № 2. S. 12-14.
62. Bruni Y.L., Garrido L.B., Aglietti E.F. Reaction and phases from monoclinic zirconia and calcium aluminate cement at high temperatures // Ceramics International, Volume 38, Issue 5, July 2012, Pages 4237-4244
63. Eun-Hee Kang, Jun-Sang Yoo, Bo-Hye Kim, Sung-Woo Choi, Seong-Hyeon Hong. Synthesis and hydration behavior of calcium zirconium aluminate (Ca<sub>7</sub>ZrAl<sub>6</sub>O<sub>18</sub>) cement // Cement and Concrete Research, Volume 56, February 2014, Pages 106-111

**Работа представлена на II Международном научно-практическом симпозиуме «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития».**

**Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».**

**The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”**

**Кривобородова Светлана Юрьевна** – преподаватель и аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [skrivoborodova@rambler.ru](mailto:skrivoborodova@rambler.ru) (автор для связи)

**Коршунов Андрей Владимирович** – доктор химических наук, профессор; профессор кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [korshunovav@mgsu.ru](mailto:korshunovav@mgsu.ru)

**Вклад авторов:** Кривобородова С.Ю. – обработка материала, написание статьи, Коршунов А.В. – идея, научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Krivoborodova Svetlana Yuryevna** – teacher and postgraduate student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
E-mail: [skrivoborodova@rambler.ru](mailto:skrivoborodova@rambler.ru)

**Korshunov Andrey Vladimirovich** – Doctor of Chemical Sciences, Professor; Professor of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: [korshunovav@mgsu.ru](mailto:korshunovav@mgsu.ru)

**Contribution of the author:** Krivoborodova S.Yu. – processing of material, writing of the article, Korshunov A.V. – idea, scientific supervision.

The authors declare that there is no conflict of interest.