

Синтез жаростойкого пенобетона на основе портландцемента для применения в конструкциях объектов специального строительства

УДК 691.3

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0024>

Номер статьи: C0024

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Почетный работник высшего профессионального образования РФ,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

amsychova@yandex.ru

Рябова Светлана Сергеевна

канд. техн. наук,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

ст. преподаватель каф. «Строительные материалы и технологии»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2583-2155

slanaryabova@mail.ru

Статья получена: 31.10.2025. Одобрена: 18.11.2025. Опубликована онлайн: 25.12.2025. © РИОР

Аннотация. Разработан жаростойкий пенобетон на основе портландцемента для применения в объектах специального строительства. Проведение целенаправленного синтеза жаростойкого пенобетона основано на полном связывании портландита в термостойкие фазы за счет введения тонкомолотых керамических добавок. Полученный материал соответствует заданным физико-механическим характеристикам: марка по средней плотности D700, класс по прочности на сжатие B1,5, класс по предельно допустимой температуре применения И6 (600 °C) и теплопроводность 0,15 Вт/(м·°C). Уникальным свойством является отрицательный коэффициент температурного расширения, обеспечивающий материалу компенсацию температурных деформаций металлоконструкций без разрушения. Образование термостойких фаз подтверждено физико-химическими методами анализа (ДТА и РФА).

Ключевые слова: жаростойкий пенобетон, портландцемент, отрицательный коэффициент температурного расширения, термостойкие фазы.

Synthesis of refractory foam concrete based on Portland cement for use in structures of special construction facilities

Anastasia Maximovna Sycheva

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation,
St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, Head of the Department
"Building Materials and Technologies",
St. Petersburg, Russia
amsychova@yandex.ru

Ryabova Svetlana Sergeevna

Candidate of Technical Sciences,
St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, Senior Lecturer,
Department of "Building Materials and Technologies"
St. Petersburg, Russia
slanaryabova@mail.ru

Abstract. Refractory foam concrete based on Portland cement has been developed for use in special construction facilities. The targeted synthesis of heat-resistant foam concrete is based on the complete binding of portlandite into heat-resistant phases due to the introduction of finely ground ceramic additives. The resulting material meets the specified physical and mechanical characteristics: grade D700 for average density, compressive strength class B 1.5, maximum permissible application temperature class I6 (600 °C) and thermal conductivity 0.15 W/(m·°C). A unique property is the negative coefficient of thermal expansion, which provides the material with compensation for thermal deformations of metal structures without destruction. The formation of heat-resistant phases is confirmed by physico-chemical analysis methods (DTA and XFA).

Keywords: refractory foam concrete, Portland cement, negative coefficient of thermal expansion, heat-resistant phases.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью в создании новых жаростойких материалов для объектов, которые работают в условиях повышенных температур.

Современные объекты специального строительства требуют от теплоизоляционных материалов не только низкой теплопроводности, но и способности выдерживать длительный высокотемпературный нагрев без разрушения.

Ключевыми отраслями, где необходимо внедрение таких материалов, являются:

1. Ракетно-космическая отрасль. В этой сфере требуется создание долговечной облицовки газоходов, способной выдерживать высокотемпературное газодинамическое воздействие при старте ракет-носителей, поскольку существующие материалы значительно деградируют [1,2].
2. Второе — атомная энергетика. Необходимо создание нового жаростойкого материала с повышенными демпферными свойствами, в частности для конструкции обечайки промежуточной реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Решение этих задач и являлось целью данного исследования, которое заключается в создании нового жаростойкого пенобетона (ЖПБ) на основе портландцемента (ПЦ).

Целевые физико-механические свойства для ЖПБ на основе ПЦ

Для решения поставленной задачи необходимо было обеспечить ЖПБ ряд ключевых физико-механических характеристик (Таблица 1).

Таблица 1

Целевые физико-механические свойства для ЖПБ на основе ПЦ

№ п/п	Параметр	Значение
1	Марка по средней плотности	D700
2	Класс по прочности на сжатие	В1,5
3	Класс по предельно допустимой температуре применения	И6 (600°C)
4	Коэффициент теплопроводности	λ = не более 0,2 Вт/(м·°C)
5	Коэффициент температурного расширения (КТР)	Отрицательное значение

Однако ключевой и наиболее сложной задачей было обеспечение совместной работы материалов в конструкции.

Дело в том, что при высокотемпературном воздействии металлические элементы конструкций расширяются. Чтобы компенсировать это расширение и предотвратить разрушение ЖПБ под действием температуры, он должен сжиматься.

Для достижения этого эффекта материал должен обладать отрицательным коэффициентом температурного расширения и повышенными деформативными свойствами.

Задача исследования

Из трудов таких ученых, как К. Д. Некрасов, М. Г. Масленникова и О. В. Болотникова, известно [3-5], что ключевой проблемой при создании жаростойких бетонов на ПЦ является портландит ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), который образуется в результате гидратации цемента. При температуре около 585 °C он разлагается на CaO и воду, что и приводит к образованию трещин.

В пенобетонах эта проблема усиливается, поскольку в нём соотношение цемента к заполнителю составляет 2:1, в то время как в обычных бетонах — примерно 1:3.

Таким образом, цемента, а следовательно, и образующегося портландита, значительно больше.

Материалы и методы

В данной работе предложен новый подход, который позволит превратить этот недостаток — избыток ПЦ — в преимущество за счет его полного связывания в термостойкие фазы (Рис. 1).



Рис. 1. Схема перехода недостатка использования портландцемента в ЖПБ в его преимущество

Такие фазы обеспечат устойчивость к повышенным температурам не только портландцементному камню, но и ЖПБ на его основе.

Из анализа литературы таких ученых как М. М. Сычев, К. Д. Некрасов, М. Г. Масленникова и других известно [3, 4], что для процессов связывания Ca(OH)_2 необходимо использование тонкомолотых добавок, например, на основе SiO_2 .

Основная научная идея работы заключается в том, что необходимо подобрать такую природу тонкомолотой добавки, которая позволит связать весь избыточный Ca(OH)_2 в термостойкие фазы. Температура разрушения термостойких фаз портландцементного камня представлена в Таблице 2.

Таблица 2

Температура разрушения термостойких фаз портландцементного камня

№ п/п	Фазы портландцементного камня	Название фазы портландцементного камня	$T, ^\circ\text{C}$
1	$\text{C}_4\text{S}_3\text{H}$	Фошагит	650–700
2	$\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$	Ксонотлит	775–800
3	$\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$	Гиролит	140–150; 700–780
4	$\text{C}_3\text{S}_{10}\text{H}_3$	Трускотит	600–700
5	$\text{C}_5\text{S}_2\text{H}$	Кальциевый хондродит	650–700

Из трудов научной школы профессора Сватовской Ларисы Борисовны известно [6], что для синтеза строительных материалов повышенного качества сырье можно рассматривать по значению энергетической характеристики его основного катиона — орбитальной электроотрицательности (ОЭО, χ , эВ) — чем выше это значение ОЭО (Таблица 3), тем более прочная связь образуется между сырьевыми компонентами.

Таблица 3

Энергетическая характеристика катиона сырья (ОЭО)

№	Катион металла (Me) сырьевого компонента	ОЭО, χ , эВ	Вид сырья
1	Алюминий (Al^{3+})	6,01	Керамический кирпич, алюмосиликатные микросфера, шамотный порошок
2	Титан (Ti^{4+})	4,35	Титан-содержащее сырье
3	Магний (Mg^{2+})	2,42	Магний-содержащее сырье
4	Железо (Fe^{3+})	2,22	Железо-содержащее сырье

Из таблицы видно, что наибольшее значение этой величины соответствует катиону алюминия (6,01 эВ), который содержится в большом количестве в керамических материалах.

С учетом вышесказанного, в составе ЖПБ предложено использовать в качестве части тонкомолотой добавки керамический кирпич, в качестве части мелкого заполнителя — алюмосиликатные микросфера и молотый шамотный порошок.

На Рис. 2 представлена качественная схема, которая иллюстрирует связывание портландита с керамическими компонентами за счет образования между ними новой связи.



Рис. 2. Качественная схема образования новой связи между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и катионами керамического сырья

С целью подтверждения возможности прохождения таких процессов в пенобетоне был выполнен термодинамический расчет возможных реакций твердения ПЦ (Таблица 4, процессы 1, 4) и взаимодействия тонкомолотой добавки на основе SiO_2 с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (процессы 2, 3, 5).

Таблица 4
Термодинамический расчет образования термостойких фаз

<i>№</i>	<i>Катион металла (Ме) сырьевого компонента</i>	<i>600°C</i>	<i>Термостойкие фазы</i>
1	$2(\text{C}_3\text{S}) + 3\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_4\text{S}_3\text{H} + 2\text{Ca}(\text{OH})_2$	-160,16	$\text{C}_4\text{S}_3\text{H}$
2	$4\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_4\text{S}_3\text{H} + 3\text{H}_2\text{O}$	-339,47	
3	$6\text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{S}_6\text{H} + 5\text{H}_2\text{O}$	-243,29	$\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$
4	$2(\text{C}_3\text{S}) + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$	138,11	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
5	$2\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\text{SiO}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2 + 2,5\text{H}_2\text{O}$	-940,16	$\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$

Расчет производился в соответствии с третьим законом термодинамики и показал принципиальную возможность образования термостойких фаз в составе ЖПБ.

Результаты

В результате теоретического и экспериментального подбора состава, был получен состав ЖПБ на основе ПЦ, представленный в [1, 7]. С учетом поставленной задачи синтеза ЖПБ на основе ПЦ и научных основ были выбраны следующие компоненты:

1. Вяжущее — портландцемент;
2. С целью повышения долговечности, предложено использовать комплексную тонкомолотую добавку, включающую молотый гранулированный шлак и тонкомолотый кирпич марки М200. Аморфное строение этих компонентов способствует образованию термостойких фаз в составе ЖПБ.
3. Заполнители: песок дробленый породы диабаз, шамотный порошок (огнеупорные заполнители) и алюмосиликатные микросфера. Микросфера представляют собой полые шарики с гладкой поверхностью, заполненные внутри газом CO_2 . Использование микросфер позволяет снизить коэффициент теплопроводности ЖПБ. (коэффициентом теплопроводности $\sim 0,016 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{°C}$.)
4. Базальтовое волокно с целью придания материалу необходимых демпферных свойств.

Поскольку в составе ЖПБ используются компоненты с высокой удельной поверхностью (тонкомолотый гранулированный шлак и тонкомолотый кирпич), то реологические характеристики пенобетонной смеси значительно ухудшаются. С целью

повышения растекаемости смеси предложено использовать комплексную добавку пластифицирующего действия [1, 7].

В качестве пенообразователя предложено использовать: пенообразователь на протеиновой.

Как видно из данных представленных в Таблице 5, основные физико-механические характеристики полученного ЖПБ полностью соответствуют целевым значениям, показанным в таблице 1, что подтверждает высказанные ранее предположения.

Таблица 5
Физико-механические свойства ЖПБ на основе ПЦ

<i>№ п/п</i>	<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
1	Марка по средней плотности	D700
2	Класс по прочности на сжатие	B1,5
3	Класс по предельно допустимой температуре применения (в соответствии с ГОСТ 20910)	И6 (600 °C)
4	Остаточная прочность после прогрева	60%
5	Число воздушных теплосмен (в соответствии с ГОСТ 20910)	T20
6	Коэффициент теплопроводности	$\lambda = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$
7	Коэффициент температурного расширения (КТР)	минус $6,52 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, при 100 °C; минус $18,30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, при 200 °C; минус $19,00 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, при 300 °C; минус $22,07 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, при 400 °C.

Для подтверждения образования термостойких фаз в составе ЖПБ были проведены физико-химические исследования образцов с помощью рентгенофазового, дериватографического и микроскопического анализов (Рис. 3).

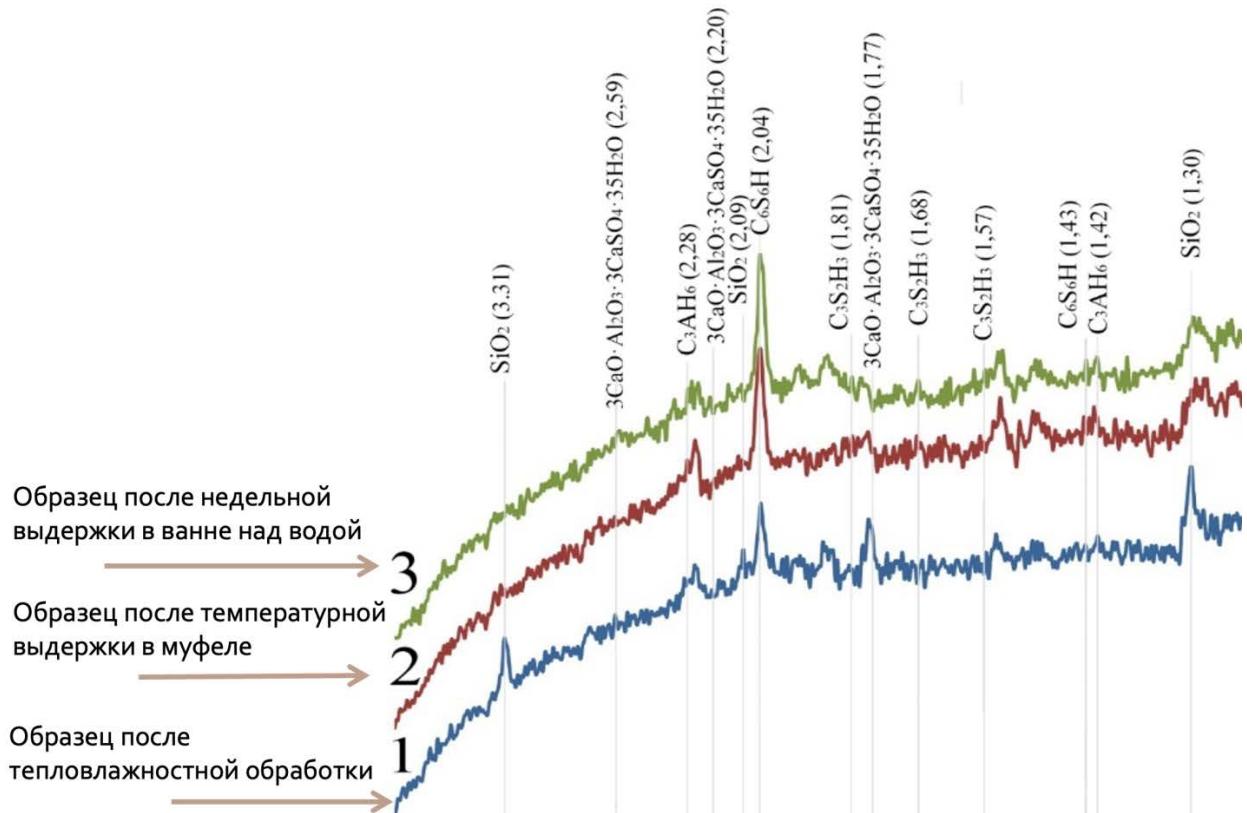


Рис. 3. Рентгенограммы образцов ЖПБ

Результаты рентгенофазового анализа показали наличие целевых термостойких фаз:

1. Ксонотлита (C₆S₆H);
2. Афвиллита (C₃S₂H₃);
3. Фошагита (C₄S₃H).

Полученные данные рентгено-фазового анализа нашли своё подтверждение в результатах дериватографического анализа (Рис. 4).

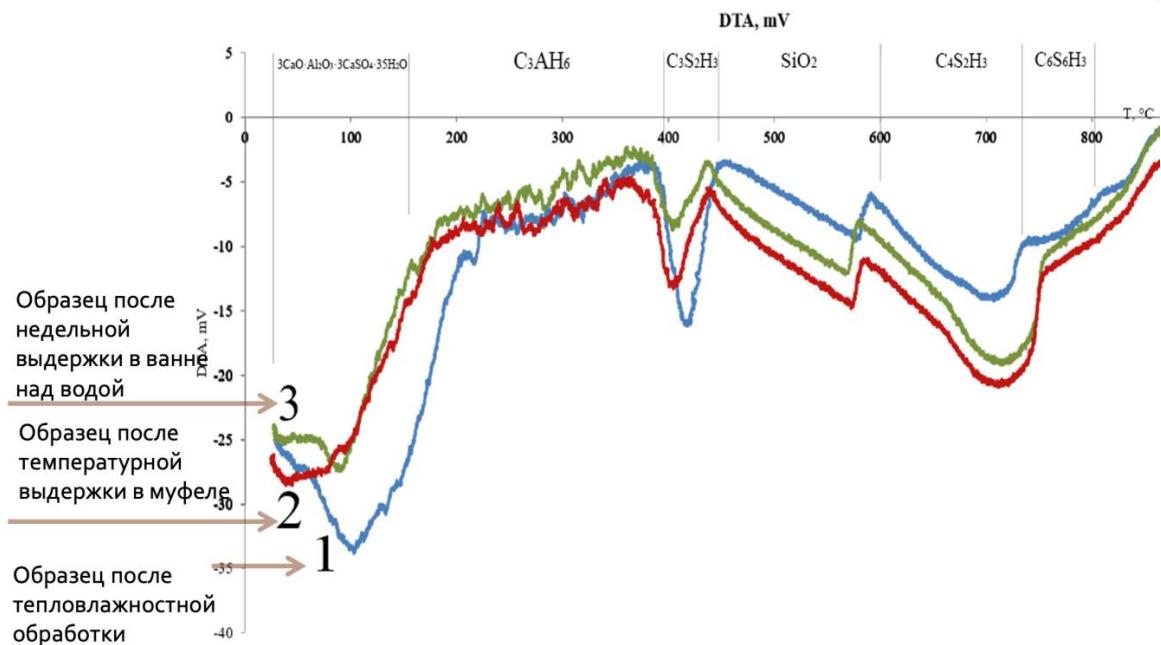


Рис. 4. Дериватограммы образцов ЖПБ

Проведённые физико-химические исследования показали отсутствие в образцах фазы портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Это позволяет утверждать, что он полностью прореагировал с компонентами комплексной тонкомолотой добавки и керамического сырья, перейдя в термостойкие фазы.

Таким образом, образование этих фаз и полное связывание портландита обеспечили полученному материалу достаточную прочность на сжатие и необходимую прочность после прогрева, что и определяет его долговечность в условиях эксплуатации при повышенных температурах.

Заключение

На основе полученного ЖПБ на ПЦ, были разработаны технические решения его применения в конструкции газохода универсального стартового комплекса «Ангара» вместо металлооблицовки [1, 7].

Такое техническое решение позволит повысить долговечность конструкции и увеличить срок ее эксплуатации.

В атомной энергетике жаростойкий пенобетон был рекомендован для применения в конструкции обечайки промежуточной реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Научная и практическая значимость работы подтверждена созданием нового материала, его успешным промышленным внедрением и комплексным исследованием свойств.

В рамках перспективных направлений планируется:

1. Углублённое исследование долговечности ЖПБ в атомной энергетике. Поскольку срок эксплуатации реактора составляет более 30 лет, то планируется изучение возможных твердофазных реакций в составе ЖПБ на основе ПЦ, которые предположительно могут протекать при длительном воздействии температуры. Основная цель — это возможное подтверждение образования новых керамических фаз в его составе, таких как муллит, анортит или ранкинит.
2. Расширение сфер применения для ЖПБ. Например:
 - в промышленном и гражданском строительстве — это футеровка дымовых и промышленных труб;
 - в авиационной отрасли — для создания демпфирующих полос на взлётно-посадочных полосах;
 - в транспортной инфраструктуре — в качестве энергопоглощающих элементов на высокоскоростных магистралях.

Список литературы

1. Гера, В. И. и др. Технические решения с применением жаростойкого пенобетона для конструкций газохода универсального стартового комплекса космического ракетного комплекса «Ангара» / В.И. Гера, Д.Н. Гула, В.Г. Котович, С.С. Рябова, А.М. Сычева // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2022. Вып. 681. С. 141–146.
2. Головчинский В. О. и др. Определение коэффициента температурного линейного расширения жаростойкого пенобетона для применения в конструкциях газохода стартовых сооружений / В.О. Головчинский, Ю.А. Каменев, С.С. Рябова, А.С. Соломахин, А.М. Сычева // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2022. Вып. 684. С. 334–341.
3. Некрасов, К. Д., Тарасова, А. П. Жаростойкий бетон на портландцементе. М. : Стройиздат, 1969. 92 с.
4. Масленникова М. Г. Легкие жароупорные бетоны на портландцементе и на жидким стекле с керамзитовым и вермикулитовым заполнителями : автореферат дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. н. Акад. строительства и архитектуры СССР. Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона. Москва, 1963. 20 с.

5. Береговой В. А. и др. Жаростойкие пенобетоны: монография. Пенза : ПГУАС, 2007. 112 с.;
6. Термодинамический и электронный аспекты свойств композиционных материалов для строительства и экозащиты / Под науч. Ред. Л.Б. Сватовской. Санкт-Петербург: ОАО «Издательство Стройиздат СПб», 2004. 176 с., ил.
7. Sycheva, A. M., Ruabova, S. S., Pirogov, S. Yu., Pyzhov, S. I. Refractory Foam Concrete for Nuclear Power Engineering // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. Vol. 64. Pp. 38–45.

References

1. Gera, V. I. et al. Technical solutions using heat-resistant foam concrete for flue structures of the universal launch complex of the Angara space rocket complex / V. I. Gera, D. N. Gula, V. G. Kotovich, S. S. Ryabova, A. M. Sycheva // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2022. I. 681. Pp. 141-146.
2. Golovchinsky V. O. et al. Determination of the coefficient of temperature linear expansion of heat-resistant foam concrete for use in the structures of the launch tube // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2022. I. 684. pp. 334-341.
3. Nekrasov, K. D., Tarasova, A. P. Heat-resistant concrete on Portland cement. Moscow : Stroyizdat, 1969. 192 p.
4. Light heat-resistant concretes based on Portland cement and liquid glass with expanded clay and vermiculite fillers : abstract of the dissertation submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences / Acad. construction and architecture of the USSR. Scientific research. institute of Concrete and Reinforced concrete. Moscow, 1963. 20 p.
5. Beregovoy V. A. [et al.] Heat—resistant foam concrete: a monograph. Penza : PGUAS, 2007. 112 p.
6. Thermodynamic and electronic aspects of the properties of composite materials for construction and environmental protection / Under the scientific editorship of L.B. Svatovskaya. Saint Petersburg: Stroyizdat SPb Publishing House, 2004. 176 p.
7. Sycheva, A. M., Ruabova, S. S., Pirogov, S. Yu., Pyzhov, S. I. Refractory Foam Concrete for Nuclear Power Engineering // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. Vol. 64. Pp. 38–45.