

УДК 666.945

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 81.09

Научная специальность ВАК: 2.6.14 Технологии силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)

EDN AYMJAX

DOI 10.62980/2076-0655-2026-34-45

РАЗМОЛОСПОСОБНОСТЬ СУЛЬФАТИРОВАННЫХ КЛИНКЕРОВ

Зорин Д.А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

АННОТАЦИЯ

Введение. Дисперсные характеристики цементов в значительной степени определяют их физико-механические свойства, а для расширяющихся цементов и деформационные характеристики. Регулирование дисперсных характеристик цементов достигается разными способами, в том числе изменением зернового состава. Зерновой состав цементов зависит от способов измельчения, микроструктуры клинкеров, а также от микротвердости входящих в его состав минералов, и от их размолоспособности. **Целью исследования:** является определение степени сопротивления размалываемости и энергозатрат при помоле расширяющей добавки в виде сульфферритного клинкера.

Материалы и методы исследования. В данной работе рассматривается размолоспособность сульфферритного клинкера как расширяющей добавки по сравнению с портландцементом. Была определена микротвердость, как степень сопротивления материала к разрушению. Установлена степень размалываемости клинкера по удельным затратам электроэнергии, проведены исследования по распределению частиц размолотой добавки по фракциям. Методами исследования являются ситовой анализ размолотого порошка, электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ. Для анализа распределения частиц по данным гранулометрического анализа применялось уравнение Розина-Раммлера-Беннета.

Результаты. Для железистых сульфатированных клинкеров трудно-размалываемые сульфатированные минералы ферриты при небольшой удельной поверхности ($S_{y0}=200 \text{ м}^2/\text{кг}$) сосредоточены в крупных и средних фракциях. С ростом удельной поверхности до $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ содержание этих минералов в средних фракциях увеличивается. При дальнейшем росте удельной поверхности до $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ сульфферриты кальция в основном располагаются в крупных ($>80 \text{ мкм}$) и мелких ($<45 \text{ мкм}$) фракциях. Силикаты в этом клинкере при помоле располагаются при $S_{y0}=200 \text{ м}^2/\text{кг}$ в средних фракциях, а с ростом удельной поверхности в мелких фракциях. Характеристический размер частиц для сульфферритного клинкера ($S_{y0}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$) составил $35\text{-}37 \text{ мкм}$.

Заключение. В статье сделан вывод, чтобы получить железистые сульфатированные минералы фракций $80\text{-}63 \text{ мкм}$ необходимо измельчение сульфатированных клинкеров до $S_{y0}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$, а для получения этих минералов размером менее 45 мкм , необходим их более тонкий помол до $400 \text{ м}^2/\text{кг}$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микротвердость минералов, характеристический размер частиц, размолоспособность, удельная поверхность, уравнение Розина-Раммлера-Беннета, сульфферритный клинкер, расширяющаяся добавка.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зорин Д.А. Размолоспособность сульфатированных клинкеров // Техника и технология силикатов. – 2026. – Т. 33, № 1. – С. 34-45. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-34-45> . EDN: AYMJAX

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».

Поступила в редакцию: 20.01.2026 г

Одобрена к публикации: 22.02. 2026 г.

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN AYMJAX

DOI 10.62980/2076-0655-2026-34-45

GRINDING CAPACITY OF SULFATED CLINKERS

Zorin D.A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

Introduction. The dispersion characteristics of cements largely determine their physical and mechanical properties, and for expansive cements, their deformation characteristics. Regulation of the dispersion characteristics of cements is achieved in various ways, including by changing the grain size distribution. The grain composition of cements depends on the grinding methods, the microstructure of the clinkers, as well as the microhardness of the minerals included in its composition, and their grindability. **The purpose of the study** is to determine the degree of resistance, grindability and energy consumption during grinding of an expanding additive in the form of sulfoferrite clinker.

Materials and methods of research. This paper examines the grindability of sulfoferrite clinker as an expanding additive in comparison with Portland cement. Microhardness was determined as the degree of resistance of a material to destruction. The degree of clinker grindability was determined based on specific energy consumption, and studies were conducted on the distribution of particles of ground additive by fractions. The research methods are sieve analysis of ground powder, electron microscopy, and X-ray phase analysis. The Rosin-Rammler-Bennett equation was used to analyze the particle distribution based on particle size analysis data. The article concludes that the expansion additive in the form of sulfoferrite clinker is acceptable from the point of view of energy resource use.

Results. For ferrous sulfated clinkers, difficult-to-grind sulfated ferrite minerals with a small specific surface area ($S_{sp}=200\text{ m}^2/\text{kg}$) are concentrated in large and medium fractions. With an increase in the specific surface area to $300\text{ m}^2/\text{kg}$, the content of these minerals in the middle fractions increases. With a further increase in the specific surface area to $400\text{ m}^2/\text{kg}$, calcium sulfoferrites are mainly located in large ($>80\text{ }\mu\text{m}$) and small ($<45\text{ }\mu\text{m}$) fractions. When ground, silicates in this clinker are located at $S_{sp}=200\text{ m}^2/\text{kg}$ in the medium fractions, and with an increase in the specific surface area in the fine fractions. The characteristic particle size for sulfoferrite clinker ($S_{sp}=400\text{ m}^2/\text{kg}$) was $35\text{--}37\text{ }\mu\text{m}$.

Conclusions. The article concludes that in order to obtain ferrous sulfated minerals of fractions $80\text{--}63\text{ }\mu\text{m}$, it is necessary to grind sulfated clinkers to $S_{sp}=300\text{ m}^2/\text{kg}$, and to obtain these minerals with a size of less than $45\text{ }\mu\text{m}$, their finer grinding to $400\text{ m}^2/\text{kg}$ is necessary.

KEY WORDS: microhardness of minerals, characteristic particle size, grindability, specific surface area, Rosin-Rammler-Bennett equation, sulfoferrite clinker, expanding additive

FOR CITATION: Zorin D.A. Grinding capacity of sulfated clinkers// Engineering and Technology of Silicates. – 2026. Vol. 33, No-. – Pp. 34 – 45. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-34-45> . EDN: AYMJAX

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”

Received by the editors: January 20, 2026

Approved for publication: February 22, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Тонкость помола, удельная поверхность, зерновой состав – дисперсные характеристики цементов, которые в значительной степени определяют их физико-механические свойства, а для расширяющихся цементов и деформационные характеристики [1-7]. В качестве расширяющихся добавок может использоваться множество материалов [7-10]. В данной работе в качестве расширяющей добавки рассматривается сульфферритный клинкер [11-14].

Регулирование деформационных характеристик расширяющихся цементов, может быть достигнуто разными способами, в том числе изменением зернового состава напрягающих и расширяющихся цементов [15, 16].

Зерновой состав цементов зависит, в первую очередь, от способов измельчения, так и от микроструктуры клинкеров, микротвердости входящих в его состав минералов, и от их размолосопособности [17-19].

Одной из характеристик степени сопротивления материала механическим усилиям является микротвердость – твердость отдельных участков микроструктуры. Величина микротвердости зависит от структуры кристалла, а именно от силы и типа химической связи между ионами, координационных чисел, вида и количества дефектов решетки и т.п.

Размалываемость материалов, в свою очередь, характеризуется зависимостью тонкости измельчения от удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на помол [11, 20, 21].

Целью исследования: является определение степени сопротивления размалываемости и энергозатрат при помоле расширяющей добавки в виде сульфферритного клинкера.

Материалы и методы исследования

В работе использовался портландцементный клинкер и сульфферритный клинкер. Химический состав их приведен в таблице 1.

Определение микротвердости минералов железистого клинкера и определялось на микротвердомере конструкции ПМТ-3 с алмазной пирамидкой.

Микротвердость характеризовали числом твердости, представляющим собой отношение нагрузки к боковой поверхности полученного отпечатка, рассчитанной по формуле:

$$H = 1854 \frac{P}{d^2}$$

где H – число твердости, кг/мм²;

P – нагрузка на острие алмазной пирамиды, кг;

d – длина диагонали отпечатка, мкм.

Определение микротвердости кристаллов проводилось на шлифах гранул клинкера размера 50-80 мм. В шлифах отбирались кристаллы размером 30-50, 50-70 и 80-120 мкм. Измерения производились при 25 параллельных определений.

Размалываемость материалов характеризуется зависимостью тонкости измельчения от удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на помол [20, 21].

Размалываемость материала определялась согласно методике Гипроцемента.

Удельный расход энергии находился по формуле:

INTRODUCTION

Fineness of grinding, specific surface area, grain size composition are the dispersed characteristics of cements, which largely determine their physical and mechanical properties, and for expanding cements, their deformation characteristics [1-7]. A variety of materials can be used as expanding additives [7-10]. In this work, sulfoferrite clinker is considered as an expanding additive [11-14].

Regulation of the deformation characteristics of expansive cements can be achieved in various ways, including changing the grain size composition of stress-straining and expansive cements [15, 16].

The grain composition of cements depends, first of all, on the grinding methods, as well as on the microstructure of the clinkers, the microhardness of the minerals included in its composition, and on their grindability [17-19].

One of the characteristics of the degree of resistance of a material to mechanical stress is microhardness – the hardness of individual sections of the microstructure. The value of microhardness depends on the structure of the crystal, namely on the strength and type of chemical bonds between ions, coordination numbers, the type and number of lattice defects, etc.

The grindability of materials, in turn, is characterized by the dependence of the fineness of grinding on the specific energy consumption spent on grinding [11, 20, 21].

The purpose of the study is to determine the degree of resistance, grindability and energy consumption during grinding of an expanding additive in the form of sulfoferrite clinker.

Materials and methods of research

Portland cement clinker and sulfoferrite clinker were used in the study. Their chemical composition is given in Table 1.

The microhardness of iron clinker minerals was determined using a PMT-3 microhardness tester with a diamond pyramid.

Microhardness was characterized by the hardness number, which is the ratio of the load to the lateral surface of the resulting indentation, calculated using the formula:

where H is the hardness number, kg/mm²;

P is the load on the tip of the diamond pyramid, kg;

d is the diagonal length of the indentation, μm .

The microhardness of crystals was determined on sections of clinker granules measuring 50–80 mm. Crystals measuring 30-50, 50-70 and 80-120 μm were selected from thin sections. Measurements were made in 25 parallel determinations.

The grindability of materials is characterized by the dependence of the fineness of grinding on the specific energy consumption spent on grinding [15, 16].

The grindability of the material was determined according to the Giprocement method.

The specific energy consumption was found using the formula:

$$\mathcal{E}_n = \frac{0,28 \cdot 1000 \cdot n}{P \cdot 60 \cdot 48}$$

где \mathcal{E}_n – удельный расход энергии (полезный), затраченной при размоле в течение n оборотов мельницы, кВт·ч/т;

n – число оборотов мельницы, считая от начала размола;

P – вес загружаемого материала, кг;

48 – скорость вращения мельницы об/мин;

0,28 – полезная мощность мелющих тел, развиваемая в одном отделении мельницы при загрузке 55,0 кг мелющих тел и пробой материала, кВт.

Удельная производительность рассчитывалась по формуле:

$$b = \frac{1000}{\mathcal{E}}$$

где b – удельная производительность, кг/час/кВт.

Для установления гранулометрического состава сульфоферритного клинкера (СФК) были проведены исследования по распределению частиц размолотой добавки по фракциям.

Распределение частиц по фракциям (далее выход по классам) выражалось в процентах к общему весу пробы. Выходы по классам показывают, сколько материала от всей пробы крупнее данного размера.

Кроме выходов отдельных классов подсчитывали суммарный выход всех классов крупнее данного размера (суммарный выход по плюсу) и суммарный выход всех классов мельче данного размера (выход по минусу).

Построение кривых распределения частиц по данным гранулометрического анализа проводилось по уравнению Розина-Раммлера-Беннета:

$$R = 100 \cdot e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^n}$$

где R – остаток на сите, %;

d – размер частиц, мкм;

d_0 – действительная крупность материала (характеристический размер частиц);

n – показатель степени, характеризующий рассеяние частиц по крупности (коэффициент равномерности).

Определение распределения частиц добавок размером менее 28 мкм проводилось на лазерном гранулометре Mastersizer.

При исследовании распределения минералов по фракциям, для клинкера определенной удельной поверхности снимался рентгеновский спектр, и определялась интенсивность линий для минералов.

Далее для каждого класса снимался узкий интервал спектра в углах 2θ расположения анализируемого пика, и описывались его характеристики: положение пика, интенсивность пика, ширина пика на его полувысоте.

where \mathcal{E}_n is the specific energy consumption (useful) expended during grinding during n mill revolutions, kW·h/t;

n – the number of revolutions of the mill, counting from the start of grinding;

P – weight of loaded material, kg;

48 – mill rotation speed rpm;

0,28 – useful power of grinding media developed in one section of the mill when loaded with 55.0 kg of grinding media and material breakdown, kW.

Specific productivity was calculated using the formula:

where b is the specific productivity, kg/hour/kW.

To establish the granulometric composition of sulfoferriite clinker (SFC), studies were conducted on the distribution of particles of ground additive by fractions.

The particle size distribution (hereinafter referred to as yield by class) was expressed as a percentage of the total sample weight. Yields by class indicate how much of the sample's material is larger than a given size.

In addition to the outputs of individual classes, the total output of all classes larger than a given size (total plus output) and the total output of all classes smaller than a given size (minus output) were calculated.

The construction of particle distribution curves based on granulometric analysis data was carried out using the Rosin-Rammler-Bennett equation:

where R is the residue on the sieve, %;

d – particle size, μm ;

d_0 – actual size of the material (characteristic particle size);

n is an exponent characterizing the dispersion of particles by size (uniformity coefficient).

The distribution of additive particles smaller than 28 μm was determined using a Mastersizer laser granulometer.

When studying the distribution of minerals by fractions, an X-ray spectrum was taken for clinker with a certain specific surface area, and the intensity of the lines for minerals was determined.

Next, for each class, a narrow range of the spectrum was removed at the 2θ angles of the analyzed peak, and its characteristics were described: peak position, peak intensity, peak width at its half-height.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТОВ
Table 1. Chemical composition of cements

Вид клинкера Type of clinker	Содержание оксидов, % Oxide content, %								
	П.п.п. Losses	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	R ₂ O
ПЦ PC	0,74	20,13	4,85	3,83	62,29	1,13	6,18	0,01	0,72
СФК SFC	0,11	12,23	3,09	23,79	51,83	1,92	5,19	0,01	1,18

Эксперименты и обсуждение результатов

В результате определения микротвердости были получены результаты, приведенные в таблице 2 и на рисунке 1.

Анализируя результаты по микротвердости, можно отметить высокие показатели у минералов сульфогерритного клинкера, при сравнении с данными по микротвердости других минералов [15, 18].

Поскольку сульфатированные минералы составляют порядка 55-75% минералогического состава сульфатированных клинкеров, то именно от них будет зависеть размалываемость клинкеров.

Experiments and discussion of results

As a result of determining the microhardness, the results presented in Table 2 and Figure 1 were obtained.

Analyzing the results of microhardness, one can note high indicators for sulfoferrite clinker minerals, when compared with the data on microhardness of other minerals [15, 18].

Since sulfated minerals make up approximately 55-75% of the mineralogical composition of sulfated clinkers, the grindability of clinkers will depend on them.

ТАБЛИЦА 2 МИКРОТВЕРДОСТЬ КРИСТАЛЛОВ МИНЕРАЛОВ СУЛЬФАТИРОВАННЫХ КЛИНКЕРОВ
Table 2 Microhardness of crystals of minerals of sulfated clinkers

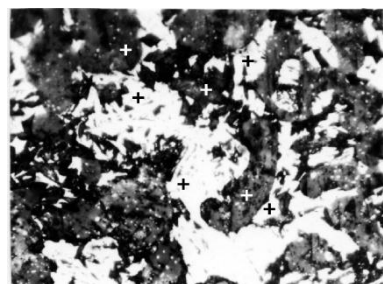
Минерал Mineral	Число твердости Н, кг/мм ² ; в кристаллах размером, мкм Hardness number Н, kg/mm ² ; in crystals of size, μm			Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	По шкале Мооса On the Mohs scale
	30-50	50-70	80-120		
Сульфогеррит кальция С ₂ F·СаSO ₄ Calcium sulfoferrite	460	520	585	4,53	6,5
Белит в сульфогерритном клинкере Belite in sulfoferrite clinker	241	285	330	3,31	5

РИСУНОК 1

Поверхности сульфогерритного клинкера

Figure 1

Surfaces of sulfoferrite clinker



После обработки результатов размалываемости были получены следующие данные, которые представлены в таблице 3.

Из представленных результатов видно, что для достижения удельной поверхности равной 400 м²/кг увеличивается удельный расход электроэнергии у портландцементного клинкера на 46,7 кВт·ч/т, у сульфогерритного клинкера – на 51,3 кВт·ч/т.

Сульфогерритный клинкер является более трудноразмалываемым, по сравнению с портландцементом. Больше всего времени на достижение Суд=400 м²/кг затрачивается при помоле сульфогерритного клинкера, оно составляет 140 мин.

Из приведенного графика на рисунке 2 видно, что тонкость измельчения материалов различна при одинаковых условиях измельчения. Это объясняется различной кристаллической структурой минералов и их твердостью.

Оценивая размалываемость сульфогерритного и портландцементного клинкеров по остатку на сите R₀₀₈ видно, что при измельчении до остатка 15% эти клинкера размалываются легче, чем при измельчении до остатка 5-10% (рис. 3).

After processing the grindability results, the following data were obtained, which are presented in Table 3.

From the presented results it is evident that in order to achieve a specific surface area equal to 400 m²/kg the specific energy consumption of Portland cement clinker increases by 46.7 kWh/t, and of sulfoferrite clinker by 51.3 kWh/t.

Sulfoferrite clinker is more difficult to grind than portland cement. The longest time to achieve Ssp=400 m²/kg is spent on grinding sulfoferrite clinker, it is 140 min.

From the graph in Figure 2 it can be seen that the fineness of grinding of materials varies under the same grinding conditions. This is explained by the different crystal structure of minerals and their hardness.

When evaluating the grindability of sulfoferrite and Portland cement clinkers based on the residue on the R₀₀₈ sieve, it is clear that when ground to a residue of 15%, these clinkers are ground more easily than when ground to a residue of 5-10% (Fig. 3).

ТАБЛИЦА 2 РАЗМАЛЫВАЕМОСТЬ ПЦ КЛИНКЕРА И СФ КЛИНКЕРА В МЕЛЬНИЦЕ
Table 2 Grinding capacity of Portland cement clinker and SF clinker in a mill

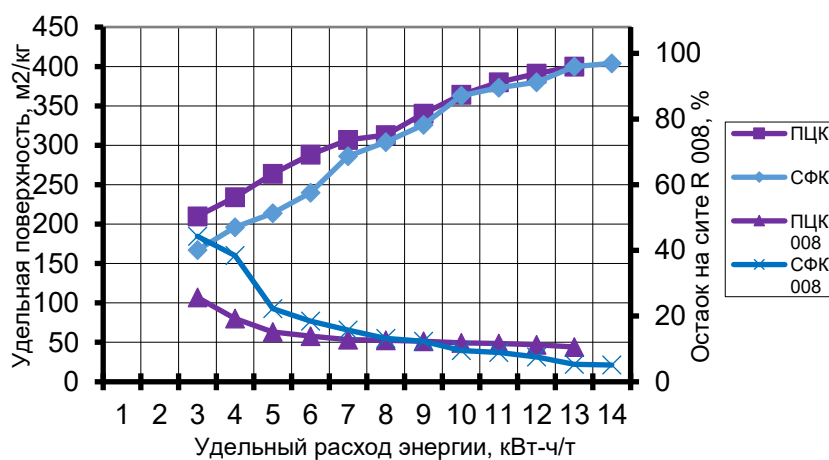
Материал Material	Число оборотов мельницы при размоле The number of revolutions of the mill during grinding	Суммарная продолжительность размола, мин Total grinding time, min	Суммарный расход электроэнергии, кВт/ч Total power consumption, kW/h	Производительность, кг/ч Productivity, kg/h	Удельный расход энергии, кВт·ч/т Specific energy consumption, kWh/t	Удельная производительность, кг/час/кВт Specific productivity, kg/hour/kW	Остаток на сите 0,08, % Residue on sieve 0.08, %	Удельная поверхность, м ² /кг Specific surface area, m ² /kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПЦкл. Portland cement clinker	1440	30	0,140	20,0	14,0	71,4	25,7	210
	1920	40	0,187	15,0	18,7	53,5	19,3	234
	2400	50	0,233	12,0	23,3	42,9	15,2	264
	2880	60	0,28	10,0	28,0	35,7	13,9	288
	3360	70	0,327	8,6	32,7	30,6	12,8	307
	3840	80	0,373	7,5	37,3	26,8	12,6	313
	4320	90	0,420	6,7	42,0	23,8	12,3	340
	4800	100	0,467	6,0	46,7	21,4	11,9	364
	5280	110	0,513	5,5	51,3	19,5	11,7	380
	5760	120	0,560	5,0	56,0	17,9	11,3	391
6240	130	0,607	4,6	60,7	16,5	10,6	400	
СФК Sulfofer-rite clinker	1440	30	0,140	20,0	14,0	71,4	44,3	167
	1920	40	0,187	15,0	18,7	53,5	38,5	196
	2400	50	0,233	12,0	23,3	42,9	22,3	214
	2880	60	0,28	10,0	28,0	35,7	18,5	240
	3360	70	0,327	8,6	32,7	30,6	15,8	286
	3840	80	0,373	7,5	37,3	26,8	13,2	304
	4320	90	0,420	6,7	42,0	23,8	12,3	326
	4800	100	0,467	6,0	46,7	21,4	9,5	363
	5280	110	0,513	5,5	51,3	19,5	8,9	373
	5760	120	0,560	5,0	56,0	17,9	7,6	380
	6240	130	0,607	4,6	60,7	16,5	5,3	400
	6720	140	0,653	4,3	65,3	15,3	5,1	404

РИСУНОК 2

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗМАЛЫВАЕМОСТИ СФК и ПЦК

Figure 2

Grindability characteristics of sulfofer-rite clinker (SFK) and Portland cement clinker (PCK)



У сульфогерритного клинкера при достижении остатка на сите R008 15% удельная поверхность увеличивается не так интенсивно, чем у портландцементного клинкера и достигает значения 280 м²/кг. У сульфогерритного клинкера при росте удельной поверхности до 400 м²/кг уменьшается и

In sulfofer-rite clinker, when the residue on the R008 sieve reaches 15%, the specific surface area increases less intensively than in Portland cement clinker and reaches a value of 280 m²/kg. In sulfofer-rite clinker, with an increase in the specific surface area to 400 m²/kg, the

остаток на сите R₀₀₈ до 5%, в отличие от портландцементного клинкера, у которого остаток на сите снижается не так сильно.

Можно сделать вывод, что для сульфатированного клинкера и между величиной удельной поверхности и процентом остатка на контрольном сите R₀₀₈ нет однозначной зависимости.

residue on the R₀₀₈ sieve also decreases to 5%, in contrast to Portland cement clinker, for which the residue on the sieve does not decrease as much.

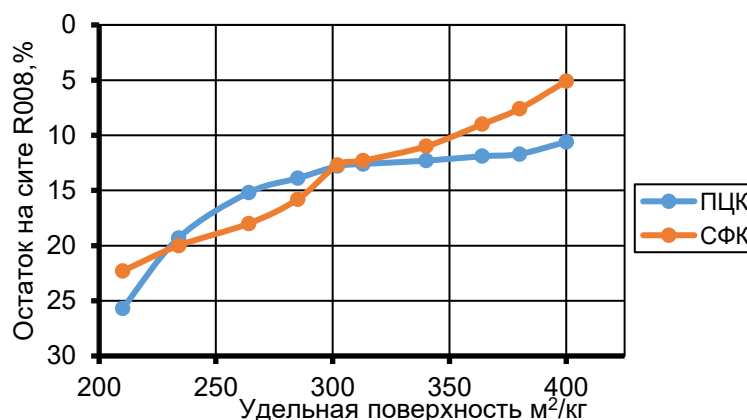
It can be concluded that for sulfated clinker there is no unambiguous relationship between the specific surface area and the percentage of residue on the R₀₀₈ control sieve.

РИСУНОК 3

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И ПРОЦЕНТОМ ОСТАТКА НА СИТЕ R₀₀₈ для СФ и ПЦ клинкеров

Figure 3

Ratio between specific surface area and percentage of residue on sieve R₀₀₈ for sulfoferrite and Portland cement clinkers



Для анализа гранулометрического состава сульфферритного клинкера были проведены исследования по распределению частиц размолотой добавки по фракциям.

Результаты гранулометрического анализа представлены в таблице 4 и на рисунке 4.

To analyze the granulometric composition of sulfoferrite clinker, studies were conducted on the distribution of particles of ground additive by fractions.

The results of granulometric analysis are presented in Table 4 and Figure 4.

ТАБЛИЦА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Table 4 Results of granulometric analysis

Крупность, мкм Size, μm	S _{уд} 200 м²/кг			S _{уд} 300 м²/кг			S _{уд} 400 м²/кг		
	Выход класса, % Yield, %	Суммарный выход, % Total yield, %		Выход класса, % Yield, %	Суммарный выход, % Total yield, %		Выход класса, % Yield, %	Суммарный выход, % Total yield, %	
		по плюсу on the plus side	по минусу on the minus side		по плюсу on the plus side	по минусу on the minus side		по плюсу on the plus side	по минусу on the minus side
+0,25	4,88	4,88	-	0,68	0,68	-	1,4	1,4	-
-0,25 +0,2	0,50	5,38	95,12	0,26	0,94	99,32	0,32	1,72	98,60
-0,2 +0,125	4,64	10,02	94,62	1,16	2,1	99,06	2,47	4,19	98,28
-0,125 +0,08	15,68	25,70	89,98	10,75	12,85	97,90	6,44	10,63	95,81
-0,08 +0,063	5,29	30,99	74,30	5,13	17,98	87,15	4,94	15,57	89,37
-0,063 +0,045	2,92	33,91	69,01	3,2	21,18	82,02	6,86	22,43	84,43
-0,045 +0,028	53,10	87,01	66,09	68,65	89,83	78,82	66,95	89,38	77,57
-0,028 +0	12,99	100,00	12,99	10,17	100,00	10,17	10,62	100,00	10,62

Из полученных результатов следует, что при удельной поверхности 200 м²/кг характерно наличие всех фракций: крупных – более 200 мкм, средних – 60-80 мкм и мелких – менее 45 мкм, и минимальная разница по плюсу и по минусу у фракций 45-80 мкм.

С ростом удельной поверхности эта разница увеличивается, а кривая выхода по классу в области средних и крупных классов сглаживается, что свидетельствует о росте средних и мелких фракций.

Кривые распределения частиц по данным гранулометрического анализа по уравнению Розина-Раммлера-Беннета в координатах RRB представлены на рисунке 5.

From the obtained results it follows that with a specific surface area of 200 м²/kg the presence of all fractions is characteristic: large – more than 200 μm, medium – 60-80 μm and small – less than 45 μm, and the minimum difference in plus and minus is in fractions of 45-80 μm.

With the growth of the specific surface area, this difference increases, and the yield curve by class in the region of medium and large classes is smoothed out, which indicates an increase in medium and small fractions.

The particle distribution curves based on the particle size distribution analysis data using the Rosin-Rammler-Bennett equation in RRB coordinates are shown in Figure 5.

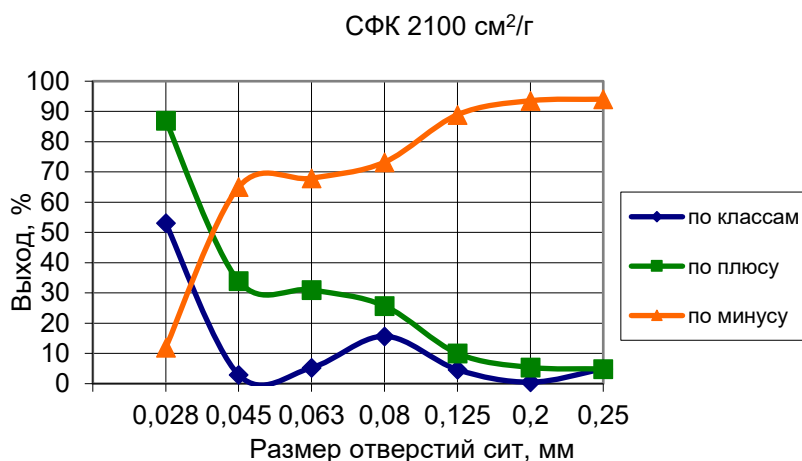
РИСУНОК 4

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ПО ФРАКЦИЯМ

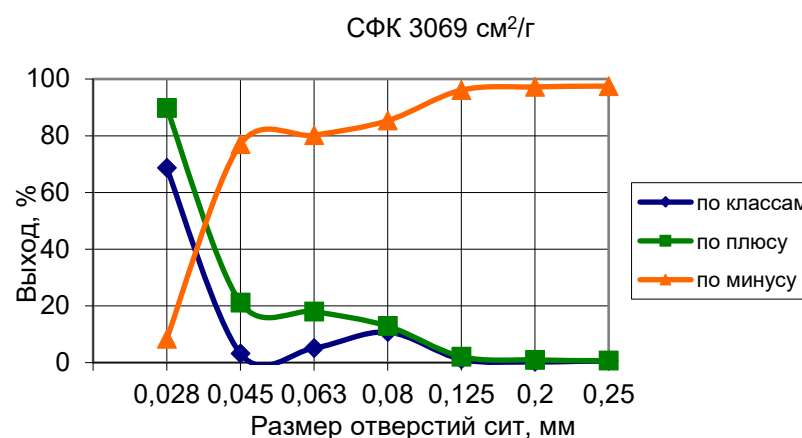
- а) удельная поверхность 2100 см²/г
- б) удельная поверхность 3069 см²/г
- в) удельная поверхность 4003 см²/г

Figure 4

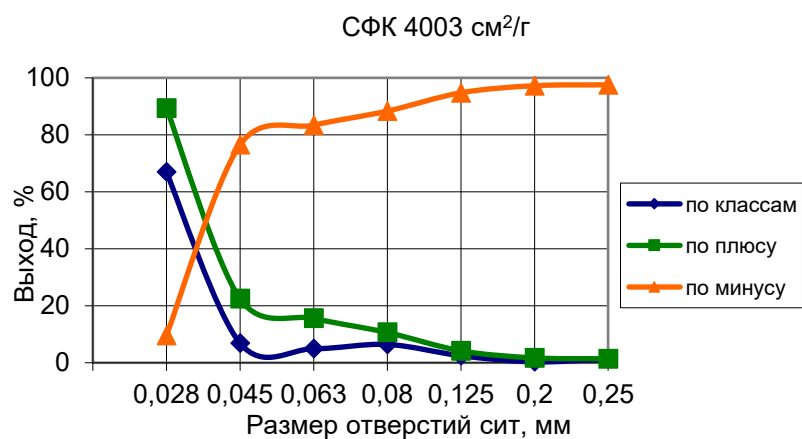
- Particle distribution by fractions
- a) specific surface area 2100 cm²/g
 - b) specific surface area 3069 cm²/g
 - c) specific surface area 4003 cm²/g



а (а)



б (б)



в (с)

По тангенсу угла наклона кривых находили значение n , а по пересечению прямой линии для $R=36,8\%$ определяли действительную крупность материала. Результаты определений приведены в таблице 5.

Как видно из полученных данных, чем выше удельная поверхность частиц, тем равномернее их распределение в мелких фракциях, о чем свидетельствуют более высокие значения n , и тем меньше характеристический размер частиц в совокупности мелких фракций.

Характеристический размер частиц для сульфферритного клинкера ($S_{уд}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$) составил 35-37 мкм.

The value of n was found from the tangent of the slope of the curves, and the actual size of the material was determined from the intersection of the straight line for $R=36.8\%$. The results of the determinations are given in Table 5.

As can be seen from the obtained data, the higher the specific surface area of the particles, the more uniform their distribution in the fine fractions, as evidenced by the higher values of n , and the smaller the characteristic size of the particles in the aggregate of fine fractions.

The characteristic particle size for sulfoferrite clinker ($S_{sp}=400 \text{ m}^2/\text{kg}$) was 35–37 μm .

РИСУНОК 5

КРИВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В КООРДИНАТАХ РОЗИНА-РАММЛЕРА-БЕННЕТА ДЛЯ СУЛЬФОФЕРРИТНОГО КЛИНКЕРА

Figure 5

Particle distribution curves in Rosin-Rammler-Bennett coordinates for sulfoferrite clinker

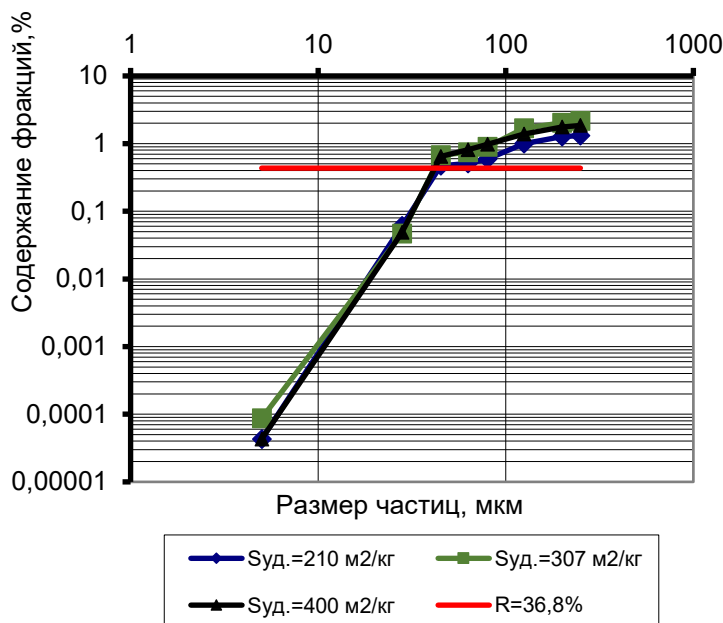


ТАБЛИЦА 5 ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ КРУПНОСТЬ МАТЕРИАЛА

Table 5 Actual size of material

Материал Material	$S_{уд}, м^2/кг$ $S_{sp}, m^2/kg$	$tg \alpha$ или n $tg \alpha$ or n	$d_0, мкм$ $d_0, \mu m$
Сульфферритный клинкер Sulfoferrite clinker	210	1,25	48
	340	1,38	40
	400	1,54	37

Определение распределения частиц этих добавок размером менее 28 мкм проводилось на лазерном гранулометре Mastersizer. Исследования показали, что преимущественный размер частиц составляет 10-20 мкм. Распределение частиц по фракциям представлены в таблице 6.

The distribution of particles of these additives with a size of less than 28 μm was determined using a Mastersizer laser granulometer. Studies have shown that the predominant particle size is 10-20 μm. The distribution of particles by fractions is presented in Table 6.

ТАБЛИЦА 6 ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ РАСШИРЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТОВ

Table 6 Fractional composition of expanding components

Вид расширяющейся добавки Type of expanding additive	$S_{уд}$ $м^2/кг$ S_{sp} m^2/kg	Содержание фракций (мкм), % Content of fractions (μm), %					
		>60	40-60	20-40	10-20	2-10	<2
Сульфферритный клинкер Sulfoferrite clinker	400	6	12	22	18	27	15

При исследовании минералов по фракциям для клинкеров с определенной удельной поверхностью снимался рентгеновский спектр.

Для сульфферритного клинкера – $C_2F \cdot CaSO_4$ с $d = 0,265$ нм, для белита в сульфатированных клинкерах анализировался по пику $\beta-C_2S$ с $d = 0,278$ нм.

Для железистых сульфатированных клинкеров трудно-размалываемые сульфатированные минералы ферриты при небольшой удельной поверхности ($S_{уд}=200 м^2/кг$) сосредоточены в крупных и средних фракциях. С ростом удельной поверхности до $300 м^2/кг$ содержание этих минералов в средних фракциях увеличивается. При дальнейшем росте удельной поверхности до $400 м^2/кг$ сульфферриты

When studying minerals by fractions for clinkers with a certain specific surface area, an X-ray spectrum was recorded.

For sulfoferrite clinker – $C_2F \cdot CaSO_4$ with $d = 0.265$ nm, for Belite in sulfated clinkers it was analyzed by the $\beta-C_2S$ peak with $d = 0.278$ nm.

For ferrous sulfated clinkers, difficult-to-grind sulfated ferrite minerals with a small specific surface area ($S_{sp}=200 м^2/кг$) are concentrated in large and medium fractions. With an increase in the specific surface area to $300 м^2/кг$, the content of these minerals in the middle fractions increases. With a further increase in the specific surface area to $400 м^2/кг$, calcium sulfoferrites are mainly located in

кальция в основном располагаются в крупных (>80 мкм) и мелких (<45 мкм) фракциях. Силикаты в этом клинкере при помоле располагаются при $S_{уд}=200$ м²/кг в средних фракциях, а с ростом удельной поверхности в мелких фракциях. На рисунке 6 представлены результаты анализа рентгеновских спектров в виде зависимости интенсивности пиков от размера частиц.

large (>80 μm) and small (<45 μm) fractions. When ground, silicates in this clinker are located at $S_{sp}=200$ m²/kg in the medium fractions, and with an increase in the specific surface area in the fine fractions. Figure 6 shows the results of the analysis of X-ray spectra in the form of a dependence of peak intensity on particle size.

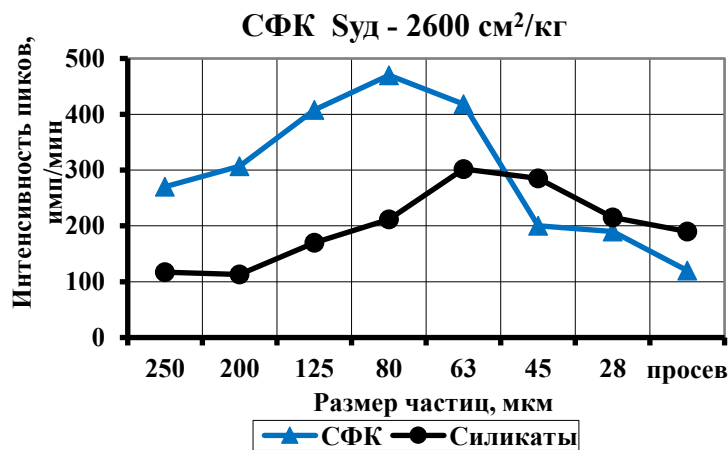
РИСУНОК 6
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ СУЛЬФОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ И ДВУХКАЛЬЦИЕВОГО СИЛИКАТА
 по фракциям в размолотом до различных удельных поверхностей сульфферритного клинкера

- а) удельная поверхность 2600 см²/г
- б) удельная поверхность 3400 см²/г
- в) удельная поверхность 400 см²/г

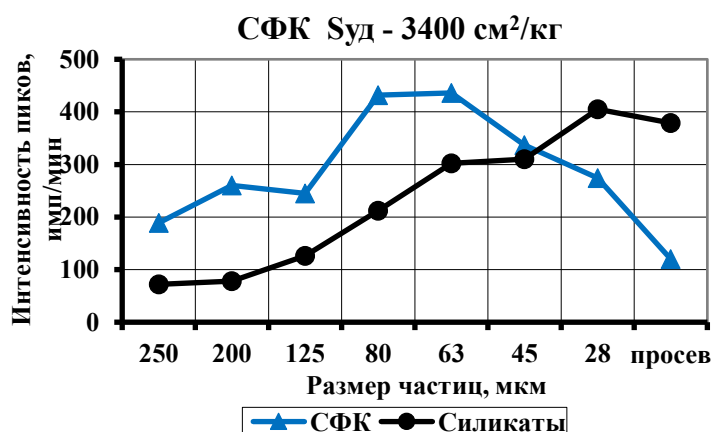
Figure 6

Distribution of calcium sulfoferrite and dicalcium silicate minerals by fraction in sulfoferrite clinker ground to different specific surface areas

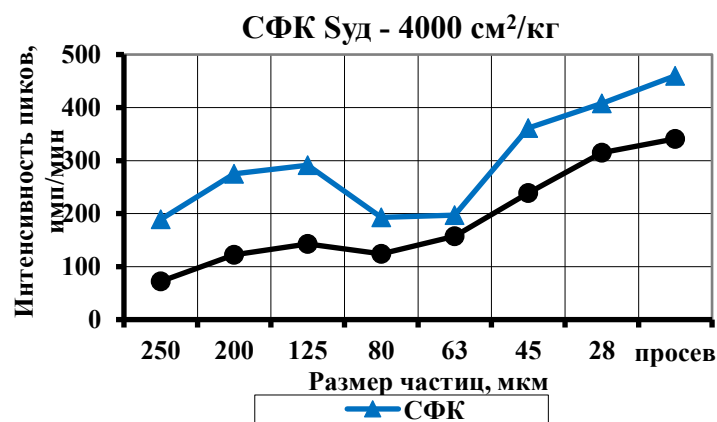
- a) specific surface area of 2600 cm²/g
- b) specific surface area of 3400 cm²/g
- c) specific surface area of 400 cm²/g



а (a)



б (b)



в (c)

Заклучение

Распределение минералов по фракциям хорошо объясняется их микротвердостью. Чем больше микротвердость, тем труднее размалывается материал, и тем больше его в крупных фракциях.

Таким образом, чтобы получить железистые сульфатированные минералы фракций 80-63 мкм необходимо измельчение сульфатированных клинкеров до $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$, а для получения этих минералов размером менее 45 мкм, необходим их более тонкий помол до $400 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Литература:

1. Трунтов Н.С., Шукшин Ф.Б., Самченко С.В. Расширение цемента, связанное с образованием этtringита // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 413-421. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-413-421>, EDN ELDEFM.
2. Шарафутдинов З. З. Действие расширяющих добавок на процесс формирования цементного камня // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 2(350). – С. 28-34. – [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2022-2\(350\)-28-34](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2022-2(350)-28-34). EDN: DTKLER
3. Zhu, H., Zhang, D., Wang, Y., Wang, T., & Li, V. C. Development of self-stressing Engineered Cementitious Composites (ECC). Cement and Concrete Composites. – 2021. 118, 103936. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103936>
4. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его разновидностей: Учебное пособие / Б. В. Гусев, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, 2016. – 113 с. – ISBN 978-5-7264-1230-6. – EDN XMA YRX.
5. Кривобородов, Ю. Р. Специальные цементы: разновидности, свойства и применение / Ю. Р. Кривобородов // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 84-91. – EDN BANTUI
6. Самченко, С. В. Влияние дисперсности специального цемента на структуру твердеющего камня / С. В. Самченко, Ю. Р. Кривобородов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2003. – № 5-2. – С. 238-240. – EDN TOGQHR.
7. Самченко, С. В. Влияние дисперсности глиноземистого шлака и сульфатоминерального клинкера на формирование структуры цементного камня / С. В. Самченко, Д. А. Зорин, И. В. Борисенкова // Техника и технология силикатов. – 2011. – Т. 18, № 2. – С. 12-14. – EDN NWE GWR.
8. Самченко С.В. Сульфатированные алюмоферриты кальция и цементы на их основе./ Самченко С. В.; Федеральное агентство по образованию, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Издательский центр М. 2004. 120 с. EDN: QNDUNJ
9. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р. Состав, свойства и применение специальных цементов // Технологии бетонов. – 2014. – №2. – С. 8-11. EDN: SZTHJL
10. Samchenko S.V., Zorin D. A. Use sulfoferritic cements in construction// E3S Web of Conferences. – 2018. 33, 02070 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302070> EDN: XXERGH
11. Samchenko S., Zorin D. Electricity costs for grinding of cement with expanding additives // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Vol. 7, No. 2. – P. 274-276. – <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11930>. EDN: XYFKDB
12. Borisov I., Grebeniuk A., Dyukareva V. Combined cements with non-shrinking properties using sulfoferrite clinker //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. 451, 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012011> EDN: DSQCUX
13. Гребенюк А. А., Борисов И.Н. Повышение качества сульфатированного клинкера на основе промышленных отходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. № 11. – С. 177-184. <https://doi.org/10.12737/22354>; EDN: WXQONV
14. Борисов И.Н., Мандрикова О.С. Синтез сульфатированного клинкера для производства безусадочных и расширяющихся

Conclusions

This distribution of minerals by fractions is well explained by their microhardness. The higher the microhardness, the more difficult it is to grind the material, and the more of it is in large fractions.

Thus, in order to obtain iron sulfated minerals of fractions 80-63 μm , it is necessary to grind sulfated clinkers to $S_{sp}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$, and to obtain these minerals with a size of less than 45 μm , it is necessary to grind them finer to $400 \text{ м}^2/\text{кг}$.

References:

1. Truntov N.S., Shukshin F.B., Samchenko S.V. Cement expansion associated with ettringite formation // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 413 – 421. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-413-421>, EDN ELDEFM.
2. Sharafutdinov Z. Z. The effect of expanding additives on the formation of cement stone // Construction of oil and gas wells on land and at sea. – 2022. – No. 2(350). – Pp. 28-34. – [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2022-2\(350\)-28-34](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2022-2(350)-28-34). (in Russian). EDN: DTKLER
3. Zhu, H., Zhang, D., Wang, Y., Wang, T., & Li, V. C. Development of self-stressing Engineered Cementitious Composites (ECC). Cement and Concrete Composites. – 2021. 118, 103936. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103936>
4. Gusev, B. V. Tehnologiya portlandcementa i ego raznovidnostey: Uchebnoe posobie / B. V. Gusev, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. – Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, Ay Pi Er Media, 2016. – 113 s. – ISBN 978-5-7264-1230-6. – EDN XMA YRX.
5. Krivoborodov, Yu. R. Special'nye cementy: raznovidnosti, svoystva i primeneniye / Yu. R. Krivoborodov // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2023. – T. 30, № 1. – S. 84-91. – EDN BANTUI
6. Samchenko, S. V. Vliyaniye dispersnosti special'nogo cementa na strukturu tverdeyushchego kamnya / S. V. Samchenko, Yu. R. Krivoborodov // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. – 2003. – № 5-2. – S. 238-240. – EDN TOGQHR.
7. Samchenko, S.V. Vliyaniye dispersnosti glinozemistogo shlaka i sul'foaluminatnogo klinkera na formirovaniye struktury cementnogo kamnya / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, I. V. Borisenkova // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2011. – T. 18, № 2. – S. 12-14. – EDN NWE GWR.
8. Samchenko S.V. Sul'fatirovannyye alyumoferrity kal'ciya i cementy na ih osnove/ Samchenko S. V.; Federal'noe agentstvo po obrazovaniyu, RHTU im. D. I. Mendeleeva, Izdatel'skiy centr M. 2004. 120 s. EDN: QNDUNJ
9. Kuznecova T.V., Krivoborodov Yu.R. Sostav, svoystva i primeneniye special'nyh cementov // Tehnologii betonov. – 2014. – №2. – S. 8-11. EDN: SZTHJL
10. Samchenko S.V., Zorin D. A. Use sulfoferritic cements in construction// E3S Web of Conferences. – 2018. 33, 02070 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302070> EDN: XXERGH
11. Samchenko S., Zorin D. Electricity costs for grinding of cement with expanding additives // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Vol. 7, No. 2. – P. 274-276. – <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11930>. EDN: XYFKDB
12. Borisov I., Grebeniuk A., Dyukareva V. Combined cements with non-shrinking properties using sulfoferrite clinker //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. 451, 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012011> EDN: DSQCUX
13. Grebenyuk A. A., Borisov I.N. Improving the quality of sulfoferrite clinker based on industrial waste // Bulletin of BSTU

- цементов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 269. EDN: OXCNUH
15. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня. Монография - М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. - 284 с. EDN: XNAINH
16. Шахова Л.Д., Черкасов Р.А., Березина Н.М., Манельюк Д.Б. Классификации технологических добавок при помолце цемента // Фундаментальные исследования. – 2014. № 12-2. – С. 295-299. EDN: TENEYP
17. Кашаев Э.Ф., Хохряков О.В. Размолоспособность компонентов цемента низкой водопотребности // Инновационная наука. – 2016. – № 11-2. – С. 40-44. EDN: WZUNSV
18. Самченко С.В., Д. А. Зорин Д.А., Нгуен З.Т.Л., Танг В.Л. Влияние содержания комплексных добавок на деформационные характеристики цемента // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 137-151. – <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2023.1.10> . EDN: EZUPCD
19. Богданов В.С., Шарапов Р.Р., Богданов Д.В., Кабанов С.Ю. Новый подход к определению параметров зернового состава цемента аналитическим методом // Цемент и его применение. – 2011. – № 1. – С. 135-140. EDN: NDXSOD
20. Кузнецова, Т. В. Микроскопия материалов цементного производства / Т. В. Кузнецова ; Т. В. Кузнецова, С. В. Самченко. – Москва: МИКХиС, Изд.-полиграфический центр, 2007. – ISBN 978-5-98523-054-3. – EDN QNEKMJ.
21. Голиков В.М., Репин С.В., Сапожников А.И. Снижение энергозатрат при производстве цемента с применением вибрационных машин // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2016. №3. – С. 105-112. EDN: XWOLPT
- named after V.G. Shukhov. – 2016. No. 11. – Pp. 177-184. (in Russian). <https://doi.org/10.12737/22354>; EDN: WXQONV
14. Borisov I.N., Mandrikova O.S. Synthesis of sulfoferrite clinker for the production of shrinkage-free and expanding cements // Modern Problems of Science and Education. – 2012. – No. 2. – P. 269. (in Russian). EDN: OXCNUH
15. Samchenko S.V. Formation and Genesis of the Structure of Cement Stone. Monograph - Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, IPR Media, EBS ASV, 2016. - 284 p. (in Russian). EDN: XNAINH
16. Shakhova L.D., Cherkasov R.A., Berezina N.M., Manelyuk D.B. Classification of technological additives during cement grinding // Fundamental Research. – 2014. No. 12-2. – Pp. 295-299. (in Russian). EDN: TENEYP
17. Kashayev E.F., Khokhryakov O.V. Grinding capacity of low-water-demand cement components // Innovative Science. – 2016. – No. 11-2. – Pp. 40-44. (in Russian). EDN: WZUNSV
18. Samchenko S.V., D. A. Zorin D.A., Nguyen Z.T.L., Tang V.L. Influence of the content of complex additives on the deformation characteristics of cement // Construction: Science and Education. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – Pp. 137-151. – <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2023.1.10> . (in Russian). EDN: EZUPCD
19. Bogdanov V.S., Sharapov R.R., Bogdanov D.V., Kabanov S.Yu. A New Approach to Determining the Parameters of Cement Grain Composition Using an Analytical Method // Cement and Its Applications. – 2011. – No. 1. – Pp. 135-140. (in Russian). EDN: NDXSOD
20. Kuznecova, T. V. Mikroskopiya materialov cementnogo proizvodstva / T. V. Kuznecova, S. V. Samchenko. – Moskva: MIKHIS, Izd-vo poligraficheskiy centr, 2007. – ISBN 978-5-98523-054-3. – EDN QNEKMJ.
21. Golikov V.M., Repin S.V., Sapozhnikov A.I. Reduction of energy consumption in cement production with the use of vibration machines // Bulletin of Tuva State University. Technical and Physical and Mathematical Sciences. – 2016. No. 3. – Pp. 105-112. (in Russian). EDN: XWOLPT

Зорин Дмитрий Александрович – доцент кафедры Строительного материаловедения, кандидат технических наук ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)
E-mail: dim-z@yandex.ru

Zorin Dmitriy Aleksandrovich - Associate Professor of the Department of Building Materials Science, Candidate of Sciences (Engineering), National Research University Moscow State University of Civil Engineering
E-mail: dim-z@yandex.ru