

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691.542, 536.664

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-3-25-32>

Кинетика тепловыделения механоактивированной цементно-песчаной композиции

А.В. Пузатова , А.Д. Когай , М.А. Дмитриева 

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград, Российская Федерация

✉ a.v.puzatova@gmail.com



EDN: EJTFZI

Аннотация

Введение. Механическая активация сухих компонентов цементных композитов используется для повышения начальной прочности, улучшения реологических характеристик смеси, сокращения сроков схватывания за счет повышения реакционной способности вяжущего. Кинетика тепловыделения компонентов цементных композитов, модифицированных методами механической активации, на данный момент мало изучена, и исследование ее изменения является актуальной задачей. Для описания кинетики тепловыделения используются известные уравнения, связывающие степень гидратации и относительное тепловыделение. Целью данной работы является исследование процесса тепловыделения механоактивированной цементно-песчаной композиции с определением параметров уравнений, описывающих кинетику тепловыделения.

Материалы и методы. Исследуемая механоактивированная композиция состоит из цемента и песка с отношением по массе 1:2,14, удельная поверхность — 3690,8 см²/г. С помощью изотермического калориметра проведен калориметрический анализ механоактивированной цементно-песчаной композиции, а также неактивированного цемента, получены данные тепловых потоков.

Результаты исследования. Определено, что цемент в составе механоактивированной композиции по показателям тепловыделения относится к умереннотермичным со значениями тепловыделения в возрасте 3 и 7 суток 247 Дж/г и 281 Дж/г соответственно. При предварительной механической активации цементно-песчаной композиции сокращаются время индукционного периода и время достижения 50 % от максимального значения тепловыделения цемента в 1,34 и 1,76–1,79 раз соответственно.

Обсуждение и заключение. В ходе проведенных исследований описана кинетика тепловыделения механоактивированной цементно-песчаной композиции. Установлено уменьшение индукционного периода процесса гидратации при механической активации цемента, что подтверждает эффективность механоактивации исходных сухих компонентов бетонов. Полученные результаты могут иметь практическое применение на заводах по производству сухих строительных смесей и бетонов при внедрении технологии механической активации компонентов бетонных композитов.

Ключевые слова: цемент, реакция гидратации, скорость реакции, механическая активация, цементно-песчаная композиция, кинетика тепловыделения

Для цитирования. Пузатова А.В., Когай А.Д., Дмитриева М.А. Кинетика тепловыделения механоактивированной цементно-песчаной композиции. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(3):25–32. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-3-25-32>

Kinetics of Heat Release of Mechanically Activated Cement-Sand Composition

Anastasiia V. Puzatova  , Alina D. Kogai , Maria A. Dmitrieva 

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

 a.v.puzatova@gmail.com

Abstract

Introduction. Mechanical activation of the dry components of cement composites is utilized in order to increase the initial strength, improve the rheological characteristics of the mixture, as well as to reduce the setting time by increasing the reactivity of the binder. Heat release kinetics of components of cement composites modified by means of mechanical activation methods has been insufficiently investigated and studying its changes is an urgent task. In order to describe heat release kinetics, well-known equations are used relating a degree of hydration and a relative heat release. The aim of this study is to examine heat emission of a mechanically activated cement-sand composition as well as to identify parameters of equations describing heat release kinetics.

Materials and Methods. The investigated mechanically activated composition consists of cement and sand with a weight ratio of 1:2.14, with a specific surface area of 3690.8 cm²/g. Using an isothermal calorimeter, a calorimetric analysis of a mechanically activated cement-sand composition, as well as non-activated cement, was conducted, and heat flux data were obtained.

Research Results. The cement in the composition of the mechanically activated composition was found to be moderately thermal in terms of heat release, with heat release values of 247 J/g and 281 J/g at the age of 3 and 7 days, respectively. During preliminary mechanical activation of the cement-sand composition, the time of the induction period and that to reach 50% of the maximum heat release of cement are reduced by 1.34 and 1.76–1.79 times, respectively.

Discussion and Conclusion. In the course of the study, the heat release kinetics of a mechanically activated cement-sand composition is described. A decrease in the induction period of the hydration process during mechanical activation of cement has been identified confirming the efficiency of mechanical activation of initial dry concrete components. The results can be practically applied in plants for producing dry building mixtures and concretes while introducing the technology of mechanical activation of concrete composite components.

Keywords: cement, hydration reaction, reaction rate, mechanical activation, cement-sand composition, heat release kinetics

For citation. Puzatova AV, Kogai AD, Dmitrieva MA Kinetics of Heat Release of a Mechanically Activated Cement-Sand Composition. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(3):25–32. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-3-25-32>

Введение. Цемент является основным вяжущим материалом, характеризующим процессы структурообразования бетона в целом. Исходный порошок портландцемента обычно состоит из четырех основных фаз: алита (C₃S), белита (C₂S), алюмината (C₃A) и феррита (C₄AF) [1]. При смешивании цементного вяжущего с водой происходит процесс гидратации, сопровождающийся выделением тепла. Различная интенсивность реакции и ее высокая динамичность в течение времени легли в основу разделения всего процесса гидратации на отдельные периоды, которые легко зафиксировать при анализе изменения тепловыделения системы [2].

При смешивании вяжущего с водой происходит интенсивное, но кратковременное выделение тепла, продолжающееся всего несколько минут (начальная стадия). Данная стадия связана с первоначальной активностью C₃S, обусловленной эффектом смачивания, а также реакцией алюминатных фаз. Затем тепловая мощность стабилизируется до относительно постоянной скорости в течение индукционного периода, и раствор остается в относительно пластичном жидком состоянии в течение примерно 2 часов. Причины индукционного периода и его завершения широко обсуждаются, и в настоящее время наиболее популярна гипотеза об образовании защитных мембран вокруг частиц цемента, что требует затрат тепловой энергии [2, 3]. Независимо от конкретного механизма, окончание индукционного периода характеризуется резким увеличением скорости тепловыделения, вызванным прежде всего образованием продуктов реакции: гидросиликатов кальция (ГСК) и гидроокиси кальция (ГК). Этот период ускорения заканчивается максимумом тепловыделения (примерно через 10–12 часов). После этого выделение тепла замедляется (стадия замедления) до устойчивого уровня (период твердения или медленного взаимодействия), во время которого гидратация продолжается в течение периода от нескольких месяцев до нескольких лет. В результате этого длительного периода реакции структура и, что более важно, пористая структура затвердевшего цементного теста будет постоянно меняться со временем.

Как известно, тепловыделение бетона и набор прочности неразрывно связаны друг с другом [4, 5]: чем быстрее происходит процесс гидратации, тем интенсивнее становится рост кристаллогидратов, формирующих прочную структуру цементного камня и всего композита. Степень гидратации α_τ , связанную со скоростью реакции, можно определить на основании механических и физических свойств, представленных кинетикой набора прочности и кинетикой тепловыделения:

$$\alpha_\tau = \frac{R_\tau}{R_{28}} = \frac{Q_\tau}{Q_{max}},$$

где τ — время твердения, сут; R_τ — прочность в возрасте τ , МПа; R_{28} — прочность в возрасте 28 суток, МПа; Q_τ — значение интегрального тепловыделения в момент времени τ , Дж/г; Q_{max} — максимальное значение тепловыделения цемента в возрасте 28 суток, Дж/г.

С целью описания кинетики тепловыделения, связанной с кинетикой набора прочности, в [6; 7] используется уравнение, аналогичное по структуре EN 1992-1-1¹:

$$\frac{Q_\tau}{Q_{max}} = \exp\left(k \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{\tau}\right)^d\right)\right), \quad (1)$$

где k, d — параметры уравнения.

Существует еще несколько уравнений, которые используются для описания скорости тепловыделения вяжущего в процессе твердения. В отечественной литературе для описания кинетики тепловыделения используется формула И.Д. Запорожца [8; 9]:

$$\frac{Q_\tau}{Q_{max}} = 1 - (1 + A \cdot \tau)^{-n}, \quad (2)$$

где A — коэффициент темпа роста тепловыделения при t твердения +20 °С, ч⁻¹; n — показатель, зависящий от свойств цемента.

В зарубежной практике используется формула Т. Knudsen [10–12]:

$$\frac{1}{Q_\tau} = \frac{1}{Q_{max}} + \frac{\tau_{50}}{Q_{max} \cdot (\tau - \tau_s)}, \quad (3)$$

где τ_{50} — время выделения 50 % от Q_{max} ; τ_s — продолжительность индукционного периода.

Тепловыделение цемента зависит от многих факторов, таких как фазовый состав, количество воды затворения, условия хранения и твердения и пр. Также значимым фактором является состояние поверхности зерен цемента и их размер. Известно, что цемент обладает наибольшей химической активностью сразу после изготовления, и эта активность снижается с течением времени. Для того чтобы повысить реакционную способность вяжущего, существуют методы его активации, самым распространенным среди которых является способ механической активации [13]. При механической активации происходит образование свежей развитой и химически активной поверхности частиц, что способствует повышению скорости реакции гидратации и изменению характера тепловыделения.

Авторами разработана механоактивированная цементно-песчаная композиция (ЦПК), эффективность которой в производстве цементных композитов доказана [14]. Показано, что предварительная совместная механическая активация сухих компонентов (цемента и песка), входящих в состав бетонной смеси, повышает начальную прочность композита более чем в 2 раза, улучшает реологические характеристики смеси и сокращает сроки схватывания. Кинетика тепловыделения компонентов цементных композитов, модифицированных методами механической активации, на данный момент мало изучена, и исследование ее изменения является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование процесса тепловыделения механоактивированной цементно-песчаной композиции с определением параметров уравнений, описывающих кинетику тепловыделения.

Материалы и методы. Исследуемая механоактивированная композиция состоит из цемента и песка с отношением по массе 1:2,14. В экспериментах использовался портландцемент Евроцем 500 супер, ЦЕМ I 42,5Н, производитель ООО «Петербург цемент», Россия. Песок строительный, фракционный состав: 70 % — фракция 2,5–1,25 мм, 30 % — фракция 0,63–0,315 мм. Механическая активация проводилась в лабораторной шаровой мельнице Retsch Emax, предназначенной для сверхбыстрого и сверхтонкого измельчения. Режим активации — 5 минут при скорости 1000 об/мин. Удельная поверхность механоактивированной композиции составляет 3690,8 см²/г [14].

В рамках данной работы был произведен калориметрический анализ механоактивированной ЦПК в соответствии с ГОСТ 310.5-88². Данный метод позволяет изучить кинетику реакции гидратации цемента, анализируя термодинамику протекания твердения раствора. Для исследования процессов тепловыделения использовался 8-канальный изотермический калориметр ТАМ Air, позволяющий проводить анализ тепловыделения реакций в изотермическом режиме, анализировать кинетику протекания экзотермических и эндотермических реакций.

¹ EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1–1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization Edt; 2004. 227 p.

² ГОСТ 310.5-88 «Цементы. Метод определения тепловыделения»: введ. 01.01.1989. М.: Издательство стандартов; 1988. 6 с.

В изотермическом режиме работы прибора термостат поддерживает постоянную температуру системы на протяжении всего эксперимента, при этом непрерывно фиксируются любые тепловые эффекты, связанные с химическим или физическим процессом в образце. Изотермические измерения дают количественную информацию, отражающую скорости изучаемых процессов.

Все каналы калориметра двойные, включающие в себя образец и эталон сравнения в ампулах объемом 20 мл. Принцип работы калориметра заключается в сравнении с последующим фиксированием скорости теплового потока исследуемого образца с эталоном сравнения, представленным инертным материалом. В каждую ампулу помещалось 6 грамм исследуемой механоактивированной ЦПК и 3 грамма воды. За эталон сравнения принят кварцевый песок, масса которого вычислена исходя из обеспечения эквивалентности теплоемкости компонентов исследуемого образца и эталона сравнения и в данной работе составляет 21 грамм. Длительность эксперимента составляла 120 часов. Точность установки температуры прибора $\pm 0,02$ °С, предел чувствительности — 4 мкВт, погрешность — ± 23 мкВт. Исследование тепловыделения производилось на 4 образцах механоактивированной ЦПК, для адекватной оценки полученных данных проведена статистическая обработка результатов эксперимента.

Считая, что в исследуемой механоактивированной композиции тепловыделением при смешивании с водой обладает только цемент (как реагирующее вещество), полученные значения интегрального тепловыделения смеси были пересчитаны на 1 грамм цемента. Для сравнения процессов, протекающих в активированной и неактивированной системе, и подтверждения эффективности механической активации относительно скорости реакции гидратации дополнительно проведен калориметрический анализ необработанного цемента.

Результаты исследования. Результатом проведения калориметрического анализа исследуемых образцов стал набор данных теплового потока, на основании которых получены данные интегрального тепловыделения, подлежащие дальнейшей обработке. Так как наиболее активное тепловыделение исследуемых систем происходит первые 24 часа, для дальнейших исследований отобраны значения интегрального тепловыделения с шагом 2 часа — первые сутки, затем с шагом 12 часов — в возрасте 2–5 суток. В таблице 1 представлены значения интегрального тепловыделения механоактивированной ЦПК (Q), пересчитанные значения тепловыделения на 1 г цемента ($Q_{\text{отн.ЦЕМ}}$) и значения относительного тепловыделения, полученные делением значений тепловыделения в момент времени τ на максимальное значение тепловыделения цемента в возрасте 28 суток (Q/Q_{max}). Значение максимального тепловыделения цемента ЦЕМ I 42,5Н (М500) в соответствии с СП 41.13330.2012³ составляет $Q_{\text{max}} = 385$ Дж/г (кДж/кг).

Таблица 1

Показатели тепловыделения механоактивированной ЦПК

τ , ч	Q , Дж/г	$Q_{\text{отн.ЦЕМ}}$, Дж/г	Q/Q_{max}	τ , ч	Q , Дж/г	$Q_{\text{отн.ЦЕМ}}$, Дж/г	Q/Q_{max}
2	0,951	2,988	0,008	22	49,511	155,465	0,404
4	2,976	9,346	0,024	24	51,834	162,758	0,423
6	7,246	22,752	0,059	36	62,415	195,984	0,509
8	13,692	42,993	0,112	48	69,605	218,560	0,568
10	20,969	65,843	0,171	60	74,738	234,677	0,610
12	28,257	88,728	0,230	72	78,786	247,387	0,643
14	34,909	109,613	0,285	84	82,000	257,481	0,669
16	39,881	125,226	0,325	96	84,320	264,763	0,688
18	43,712	137,257	0,357	108	85,911	269,761	0,701
20	46,847	147,100	0,382	120	87,000	273,180	0,710

Значения интегрального тепловыделения активированной ЦПК представляют средние значения для 4 образцов. Была проведена статистическая обработка данных интегрального тепловыделения для каждого момента времени, средние значения статистических показателей для всего массива обработанных данных составляют: среднеквадратическая ошибка среднего арифметического $m = 0,29$; показатель точности $\varepsilon = 0,59$ %; коэффициент вариации $V_c = 1,18$ %.

Для определения характера термичности активированной цементно-песчаной композиции выделены значения интегрального тепловыделения в возрасте 3 и 7 суток. Тепловыделение в возрасте 3 суток составило 247 Дж/г, значение в возрасте 7 суток получено экстраполированием и составило 281 Дж/г. По ГОСТ 23464-79⁴ к низкотермич-

³ СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений»: введ. 01.01.2013. М.: Минрегион России; 2012. 72 с.

⁴ ГОСТ 23464-79 «Цементы. Классификация»: введ. 01.07.1979. М.: Издательство стандартов; 1985. 11 с.

ным относятся цементы с тепловыделением до 230 и 270 кДж/кг в 3 и 7 суток соответственно, к умереннотермичным — до 315 кДж/кг в 7 суток [7]. Таким образом, цемент в составе механоактивированной цементно-песчаной композиции относится к умереннотермичным.

В таблице 2 представлены значения интегрального тепловыделения неактивированного цемента и значения относительного тепловыделения.

Таблица 2

Показатели тепловыделения цемента ЦЕМ I 42,5Н

τ , ч	Q , Дж/г	Q/Q_{max}	τ , ч	Q , Дж/г	Q/Q_{max}
2	1,328	0,003	22	107,582	0,279
4	4,829	0,013	24	116,539	0,303
6	10,538	0,027	36	153,226	0,398
8	19,580	0,051	48	175,406	0,456
10	31,527	0,082	60	191,484	0,497
12	43,570	0,113	72	201,146	0,522
14	57,606	0,150	84	206,723	0,537
16	71,197	0,185	96	211,234	0,549
18	83,883	0,218	108	214,707	0,558
20	95,495	0,248	120	217,540	0,565

Значения интегрального тепловыделения неактивированного цемента представляют средние значения для 5 образцов. Была проведена статистическая обработка данных интегрального тепловыделения для каждого момента времени, средние значения статистических показателей для всего массива обработанных данных составляют: среднеквадратическая ошибка среднего арифметического $m = 1,55$; показатель точности $\varepsilon = 2,30$ %; коэффициент вариации $V_c = 4,29$ %.

На рис. 1 показаны графики кинетики тепловыделения механоактивированной цементно-песчаной композиции (акт. ЦПК) и неактивированного цемента (ЦЕМ I 42,5Н). Представлены кривые интегрального тепловыделения, полученные экспериментальным способом, и теоретические значения, полученные расчетным способом с использованием уравнений ф. (1), (2), (3).

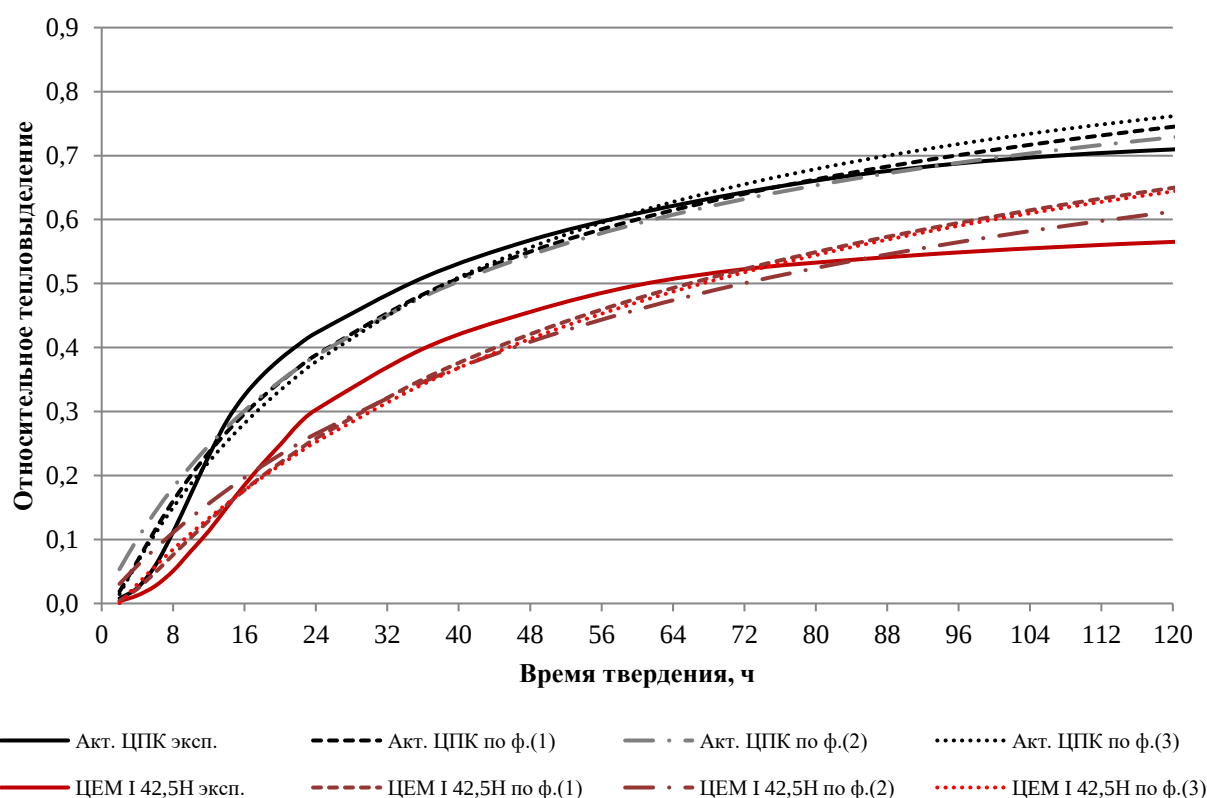


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные относительные тепловыделения механоактивированной ЦПК и неактивированного цемента

Параметры уравнений ф. (1), (2), (3) для представленных на рис. 1 результатов приведены в таблице 3, где также приведено сравнение полученных значений параметров с данными других исследователей.

Таблица 3

Параметры уравнений кинетики тепловыделения

Уравнение	$\frac{Q_\tau}{Q_{max}} = \exp(k \cdot (1 - (\frac{28}{\tau})^d))$		$\frac{Q_\tau}{Q_{max}} = 1 - (1 + A \cdot \tau)^{-n}$		$\frac{1}{Q_\tau} = \frac{1}{Q_{max}} + \frac{\tau_{50}}{Q_{max} \cdot (\tau - \tau_s)}$	
Обозначение	ф. (1)		ф. (2)		ф. (3)	
Параметр	k	d	A	n	τ_{50}	τ_s
Расч. для акт. ЦПК	0,20	0,52	0,037	0,77	37,13	1,45
Расч. для ЦЕМ I 42,5Н	0,32	0,5*	0,018	0,83*	65,30	1,97
Г.В. Несветаев и др. для ЦЕМ I 42,5Н [6, 15]	0,16–0,21	0,46–0,51	0,022	1,55	44,5	6

*Параметр принят по данным [16]

В соответствии с полученными данными, значение индукционного периода для активированной цементно-песчаной композиции составляет $\tau_s = 1,45$ часа. Расчетное значение времени индукционного периода для неактивированного цемента составило 1,97 часа. Окончание индукционного периода активированной композиции относительно неактивированного цемента наступает быстрее в 1,34 раза.

Полученный параметр τ_{50} механоактивированной композиции для уравнения (3) составляет 37,13 часа, что коррелирует с экспериментальным значением времени достижения 50 % тепловыделения, который по данным эксперимента составляет 34,45 часа, расхождение результатов составляет 2,68 часа или 7,2 %. Параметр τ_{50} цемента для уравнения (3) составляет 65,30 часа, что также коррелирует с экспериментальным значением, который составляет 61,59 часа, расхождение результатов составляет 3,71 часа или 5,7 %. Время достижения 50 % значения тепловыделения для активированной композиции сокращается в 1,76 и 1,79 раз для расчетных и экспериментальных значений соответственно. Таким образом, подтверждается эффективность механической активации цемента относительно сокращения индукционного периода и более раннего начала структурообразования цементного композита, модифицированного механической активацией компонентов.

Обсуждение и заключение. В результате проведенных исследований получены значения интегрального тепловыделения для механоактивированной цементно-песчаной композиции. Определено, что цемент в составе механоактивированной композиции по показателям тепловыделения относится к умереннотермичным со значениями тепловыделения в возрасте 3 и 7 суток 247 Дж/г и 281 Дж/г соответственно. Получены параметры уравнений, описывающих кинетику тепловыделения. Определены значения продолжительности индукционного периода для механоактивированной композиции (1,45 часа) и неактивированного цемента (1,97 часа). Время достижения 50 % от максимального значения тепловыделения цемента для активированной композиции составляет 34–37 часов, тогда как для неактивированного цемента — 61–65 часов.

Полученные в ходе исследования данные подтверждают эффективность механической активации исходных сухих компонентов бетонов с точки зрения оценки кинетики тепловыделения и изменения характера термичности. При механической активации цементно-песчаной композиции сокращаются время индукционного периода и время достижения 50 % от максимального значения тепловыделения вяжущего в 1,34 раза и 1,76–1,79 раз соответственно, что свидетельствует об эффективности применения механоактивированной цементно-песчаной композиции как добавки в бетоны. Результаты могут иметь практическое применение на заводах по производству сухих строительных смесей и бетонов при внедрении технологии механической активации компонентов.

Список литературы/References

1. Кирсанов Д.А. Влияние минералогического состава клинкера и комплексных органо-минеральных добавок на долговечность бетона. *Технологии бетонов*. 2025;1(198):63–68. URL: <https://stroyamat.ru/2025/03/03/tb-1-2025/> (дата обращения 16.07.2025).

Kirsanov DA Influence of the Mineralogical Composition of Clinker and Complex Organo-Mineral Additives on the Durability of Concrete. *Technologies of Concretes*. 2025;1(198):63–68. (In Russ.) URL: <https://stroyamat.ru/2025/03/03/tb-1-2025/> (accessed: 16.07.2025).

2. Очкина Н.А. Тепловыделение высокоглиноземистого цемента в процессе гидратации. *Региональная архитектура и строительство*. 2022;3(52):96–100. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_3_96

Ochkina NA Heat Release of High-Alumina Cement during Hydration. *Regional Architecture and Construction*. 2022;3(52):96–100. (In Russ.) https://doi.org/10.54734/20722958_2022_3_96

3. Эльмурзаев М.Б., Межидов В.Х., Муртазаев С.А.Ю. Механизм формирования на цементном зерне защитного слоя, определяющего продолжительность индукционного периода. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015;1:16–21.
Elmurzaev MB, Mezhdidov VKh, Murtazaev SAYu Mechanism of Formation of a Protective Layer on Cement Grain that Determines the Duration of the Induction Period. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2015;1:16–21. (In Russ.)
4. Лотов В.А., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Зубкова О.А. Термокинетические исследования в системе «цемент–микрокремнезем–суперпластификатор–вода». *Техника и технология силикатов*. 2021;28(2):42–49.
Lotov VA, Sarkisov YuS, Gorlenko NP, Zubkova OA Thermokinetic Studies in the "Cement–Silica–Superplasticizer–Water" System. *Silicate Engineering and Technology*. 2021;28(2):42–49. (In Russ.)
5. Котов С.В., Сивков С.П. Высокоэффективные интенсификаторы помола для измельчения портландцемента с минеральными добавками. *Техника и технология силикатов*. 2013;20(4):16–20. URL: <https://tsilicates.ru/ru/nauka/article/80564/view> (дата обращения 16.07.2025).
Kotov SV, Sivkov SP Highly Effective Grinding Intensifiers for Grinding Portland Cement with Mineral Additives. *Silicate Engineering and Technology*. 2013;20(4):16–20. (In Russ.) URL: <https://tsilicates.ru/ru/nauka/article/80564/view> (accessed: 16.07.2025).
6. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Yazyev BM. Autogenous Shrinkage and Early Cracking of Massive Foundation Slabs. *Magazine of Civil Engineering*. 2024;17(6):13005. <https://doi.org/10.34910/MCE.130.5>
7. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В. Учет влияния добавок на тепловыделение бетона с целью предотвращения раннего трещинообразования массивных монолитных конструкций. *Вестник евразийской науки*. 2024;16(6):50SAVN624. URL: <https://esj.today/PDF/50SAVN624.pdf> (дата обращения 16.07.2025).
Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Shut VV Taking into Account the Influence of Additives on the Heat Dissipation of Concrete in Order to Prevent Early Cracking of Massive Monolithic Structures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(6):50SAVN624. (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/50SAVN624.pdf> (accessed: 16.07.2025).
8. Стародубцев А.А. Анализ тепловыделения бетонных конструкций в стадии набора прочности. *Тенденции развития науки и образования*. 2022;84(2):164–167. URL: <https://doicodex.ru/doi/10.24425/2022-91.pdf> (Дата обращения 31.07.2025).
Starodubtsev AA Analysis of Heat Generation of Concrete Structures at the Stage of Strength Gain. *Trends in the Development of Science and Education*. 2022;84(2):164–167. (In Russ.) URL: <https://doicodex.ru/doi/10.24425/2022-91.pdf> (accessed: 31.07.2025).
9. Семенов К.В., Титов Н.С. Учет тепловыделения бетона в расчетах термической трещиностойкости массивных железобетонных конструкций. *Инженерные исследования*. 2024;1(16):3–12. URL: <https://eng-res.ru/archive/2024/1/3-12.pdf> (дата обращения 16.07.2025).
Semenov KV, Titov NS Accounting the Heat Generation of Concrete When Calculating Thermal Crack Resistance of Massive Reinforced Concrete Structures. *Engineering Research*. 2024;1(16):3–12. (In Russ.) URL: <https://eng-res.ru/archive/2024/1/3-12.pdf> (accessed: 16.07.2025).
10. Knudsen T. On Particle Size Distribution in Cement Hydration. In: *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement*. Paris: Editions Septima; 1980. Pp. 170–175.
11. Sun Y, Wang ZH, Park DJ, Chen YK, Kim HS, Kim WS et al. Mathematical determination of the maximum heat release for fly ash cement paste: Effect of heat flow monitoring time, calculation approach and fly ash content. *Thermochimica Acta*. 2023;726:179553, <https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179553>
12. Kang Li, Zhengxian Yang, Shilin Dong, Pingping Ning, Dejun Ye, Yong Zhang. Hydration heat and kinetics of ternary cement containing ultrafine steel slag and blast-furnace slag at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2025;471:140712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140712>
13. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Предварительная активация цементно-песчаной смеси с целью повышения прочности бетона. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2022;65(8):94–101. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6595>
Lotov VA, Sudarev EA, Kutugin VA Preliminary Activation of a Cement-Sand Mixture in Order to Increase the Strength of Concrete. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2022;65(8):94–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6595>
14. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Оценка эффективности механической активации исходных компонентов композиционного материала на основе цемента. *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2024;4(61):3–17. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/3-17>

Puzatova AV, Dmitrieva MA, Leutsin VN Evaluation of the Effectiveness of Mechanical Activation of the Initial Components of a Cement-Based Composite Material. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2024;4(61):3–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/3-17>

15. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Shut VV Specific heat dissipation of concrete and the risk of early cracking of massive reinforced concrete foundation slabs. *Construction Materials and Products*. 2024;7(4):3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-3>

16. Ковшар С.Н., Гушин С.В., Эралиев Б.А. Оценка термонапряженного состояния бетонного массива. *Наука и техника*. 2021;20(3):207–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215>

Kovshar SN, Gushchin SV, Eraliev BA Assessment of thermal stress state of concrete massif. *Science & Technique*. 2021;20(3):207–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-207-215>

Об авторах:

Пузатова Анастасия Вячеславовна, старший преподаватель образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), зав. лабораторией строительных материалов, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), asharanova@kantiana.ru

Когай Алина Дмитриевна, ассистент образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), аспирант, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), ad.kogai@yandex.ru

Дмитриева Мария Александровна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), admitrieva@kantiana.ru

Заявленный вклад авторов:

А.В. Пузатова: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение экспериментов и расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

А.Д. Когай: проведение экспериментов, формирование теоретической части.

М.А. Дмитриева: научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Anastasiia V. Puzatova, Senior Lecturer of the Institute of High Technologies Educational and Scientific Cluster of the Immanuel Kant Baltic Federal University (14 A. Nevsky Str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), Head of the Laboratory of Building Materials, [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), asharanova@kantiana.ru

Alina D. Kogai, PhD student, Assistant of Institute of High Technologies Educational and Scientific Cluster of the Immanuel Kant Baltic Federal University (14 A. Nevsky St., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), ad.kogai@yandex.ru

Maria A. Dmitrieva, D.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Institute of High Technologies Educational and Scientific Cluster of the Immanuel Kant Baltic Federal University (14 A. Nevsky St., Kaliningrad, 236041, Russian Federation), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), admitrieva@kantiana.ru

Claimed contributorship:

AV Puzatova: formation of the basic concept, aims and objectives of the research, conducting the experiments and calculations, preparing the manuscript, forming the conclusions.

AD Kogai: conducting the experiments, forming the theoretical part.

MA Dmitrieva: scientific supervision, analysis of the research results, correction of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 12.05.2025

Поступила после рецензирования / Revised 05.06.2025

Принята к публикации / Accepted 02.07.2025