

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 4. С. 144–155.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)  
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2025; 27 (4): 144–155.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.01

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-144-155

EDN: SBIAIH

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

**Наталья Олеговна Копаница, Владислав Игоревич Паймухин**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия*

**Аннотация.** Актуальность исследования связана с возможностью повышения прочностных свойств цементобетона за счет использования механически активированного вяжущего.

**Цель** работы заключается в оценке закономерностей и особенностей процессов гидратации механоактивированного портландцемента на ранних стадиях твердения.

**Материалы и методы.** Экспериментальные исследования выполнены с использованием сырьевых материалов, соответствующих требованиям действующих нормативных документов. В качестве вяжущего применялся портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Б производства ООО «Топкинский цемент».

**Результаты.** Представлены результаты физико-механических испытаний механически активированного цементного камня. Установлено, что совместная механоактивация цементного вяжущего с песком карьерной влажности в активаторе собственной конструкции обеспечивает повышение прочностных характеристик цементного камня на ранних сроках твердения. Конструкция активатора позволяет регулировать мощность и продолжительность измельчения. Наибольший эффект достигается при мощности двигателя 3000 Вт и времени обработки смеси в течение 5 мин.

Приведены результаты физико-химических исследований особенностей процесса гидратации вяжущего с применением рентгенофазового и колориметрического анализа.

**Ключевые слова:** активация, цементное тесто, механическая активация, модификация, вяжущее, цементные композиции, цементный камень

*Для цитирования:* Копаница Н.О., Паймухин В.И. Исследование свойств механически активированного цементного камня // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 4. С. 144–155. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-144-155. EDN: SBIAIH

ORIGINAL ARTICLE

## PROPERTIES OF MECHANICALLY ACTIVATED HYDRATED CEMENT

Natal'ya O. Kopanitsa, Vladislav I. Paimukhin

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

**Abstract. Purpose:** Evaluation of hydration mechanisms of mechanically activated Portland cement at early curing stages.

**Methodology:** Calorimetry of thermal effects during cement curing, X-ray diffraction analysis, XRD patterns are analyzed in Difrac.EVA software program, including the ICDD PDF2 database for the analysis of the phase composition, coherent scattering regions, internal elastic stresses.

**Research findings:** It is shown that mechanically activated cement binder together with sand of quarry moisture content in the activator provide an increase in strength properties of hydrated cement during its early curing. The activator design allows control for the power and time of grinding. The greatest effect is provided at the engine power of 3000 W and the mixture processing for 5 min. The results of physical and chemical analyses of the binder hydration process are presented using X-ray phase and colorimetric analysis.

**Keywords:** activation, cement paste, mechanical activation, modification, binder, cement compositions, hydrated cement

**For citation:** Kopanitsa N.O., Paimukhin V.I. Properties of Mechanically Activated Hydrated Cement. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (4): 144–155. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-4-144-155. EDN: SBIAIH

### Введение

Механическая активация (механоактивация) компонентов бетонной смеси применяется для увеличения реакционной способности (изменение физико-химических свойств) обрабатываемых веществ в последующих процессах и реакциях в результате механического воздействия. Механоактивация позволяет увеличить удельную поверхность дисперсных частиц цемента, приводит к изменению их поверхностной структуры, возникновению физических дефектов в подрешетках минералов, ускоряющих и усиливающих взаимодействие поверхностного слоя с водой [1, 2].

Механоактивация вяжущего основана на изменении его реакционной способности под действием механических сил, что приводит к ускорению или повышению эффективности химических, физико-химических или технологических процессов при механических воздействиях на материал [3, 4].

Активация измельчением относится к числу технически более доступных методов, которые сопровождают процесс структурообразования в материале. Она позволяет повысить реакционную способность твердого тела за счет возникновения дефектов кристаллической структуры и формирования активного

состояния развитой поверхности дисперсных материалов, обеспечивая возможность повышения прочностных характеристик цементного камня [5, 6, 7, 9]. Для осуществления процесса механоактивации используют мельницы (активаторы) различных типов: шаровые, пружинные, центробежные, вибрационные и др. При этом эффективность механической активации зависит от выбранного типа активатора и от свойств измельчаемых продуктов [8].

Целью исследования является оценка закономерностей и особенностей процессов гидратации механоактивированного портландцемента на ранних сроках твердения.

### Материалы и методы исследований

При проведении экспериментальных исследований в работе использовались сырьевые материалы, соответствующие требованиям нормативных документов. В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Б ООО «Топкинский цемент». Характеристики вяжущего удовлетворяют требованиям ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» и ГОСТ 30515–2013 «Цементы. Общие технические условия». Свойства цемента приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Характеристики портландцемента

Table 1

#### Portland cement properties

Нормальная влажность цементного теста, %	Сроки схватывания ч-мин		Предел прочности, МПа	Класс цемента	Содержание минеральных добавок, %
	Начало	Конец	Сжатие 28 сут		
26,0	2:30	3:50	51,4	ЦЕМ I 42,5Б	20

В качестве заполнителя использовался кварцевый песок Кудровского месторождения Томской области, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Физико-механические свойства используемого для проведения исследований песка приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Характеристики кварцевого песка Кудровского месторождения

Table 2

#### Properties of quartz sand from Kudrovskoe deposit

Содержание гравия, %	Частные (полные) остатки, % на ситах, мм					Содержание пылеватых и глинистых частиц, %	Модуль крупности	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16			насыпная	истинная
–	<u>0,5</u> 0,5	<u>1,0</u> 1,5	<u>4,5</u> 6,0	<u>35,0</u> 41,0	<u>53,5</u> 94,5	3,0	2,1	1390	2600

Механоактивация цементного вяжущего совместно с влажным песком осуществлялась в активаторе роторного типа собственной конструкции, с по-

мощью которого возможно повысить тонкость помола цемента, что способствует получению высококачественной тонкозернистой структуры. В этой связи для современного строительного материаловедения вновь становится актуальной механохимическая активация компонентов бетона, в частности цементно-песчаной смеси.

Для оценки закономерностей и особенностей процессов гидратации механоактивированного портландцемента на ранних стадиях твердения была проведена колориметрическая оценка тепловых эффектов при твердении активированного портландцемента в сравнении с контрольными образцами. Для проведения исследований готовились образцы-кубики размером  $2 \times 2 \times 2$  мм из смесей с различным соотношением компонентов: 1:1, 1:2, а также 2:1. Продолжительность твердения составляла 3 сут, а время активации варьировалось в пределах 2,5 и 5 мин. Образцы-кубики в возрасте 3 сут измельчались в агатовой ступке до состояния пудры. В качестве оборудования для исследования тепловыделения в цементных системах использовался дифференциальный микрокалориметр (ДМК). ДМК состоит из двух калориметрических ячеек (КЯ), размещенных в индивидуальных теплоизолирующих сосудах, что исключает возможность теплообмена между ними. Каждая КЯ снабжена единичными датчиками температуры в виде спая термопары или термометра сопротивления. Сигнал от датчиков передается по дифференциальной (термопара) или уравновешенной мостовой (термометр сопротивления) схемам и регистрируется через аналоговый цифровой преобразователь (АЦП) на компьютере [12]. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Bruker D2 Phaser. Перед началом анализа пробы подготавливались измельчением в агатовой ступке до состояния пудры, после чего плотно помещались в кювету из органического стекла. Поверхность пробы выравнивалась до уровня с кюветой. Расшифровка полученных дифрактограмм проводилась при помощи программы Diffrac.EVA, которая включает базы данных рентгеновской порошковой дифрактометрии PDF2 Международного центра дифракционных данных (ICDD, Denver, USA).

### **Результаты исследования**

В работе [10] были представлены результаты исследований механохимической активации цемента и песка карьерной влажности при их совместной обработке в определенных соотношениях. Влажный ( $W = 4-8\%$ ) песок совместно с вяжущим подвергался механической активации поверхности путем одновременного удаления пылевидных примесей без заметного измельчения зерен. Для оценки эффективности процесса активации в работе определялись оптимальные режимы помола исследуемой смеси. Полученный продукт может быть представлен как потенциальная добавка в бетонную смесь, выполняющая функцию прекурсора для стимуляции процессов гидратации цемента на ранних этапах, ускоряющая процесс набора прочности бетонной смеси.

Для проведения испытаний использовался активатор роторного типа собственной конструкции, позволяющий повысить тонкость помола цемента и, как следствие, обеспечить получение высококачественной тонкозернистой структуры. Это подчеркивает актуальность применения механохимической активации компонентов бетона, в частности цементно-песчаной смеси.

Анализ экспериментальных данных [10] показал, что совместная активация цемента и песка карьерной влажности в соотношении 1:2 способствует росту прочностных характеристик цементно-песчаного раствора. Наибольший прирост прочности достигается при мощности двигателя активатора 3000 Вт и времени обработки смеси в течение 5 мин. Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 1.

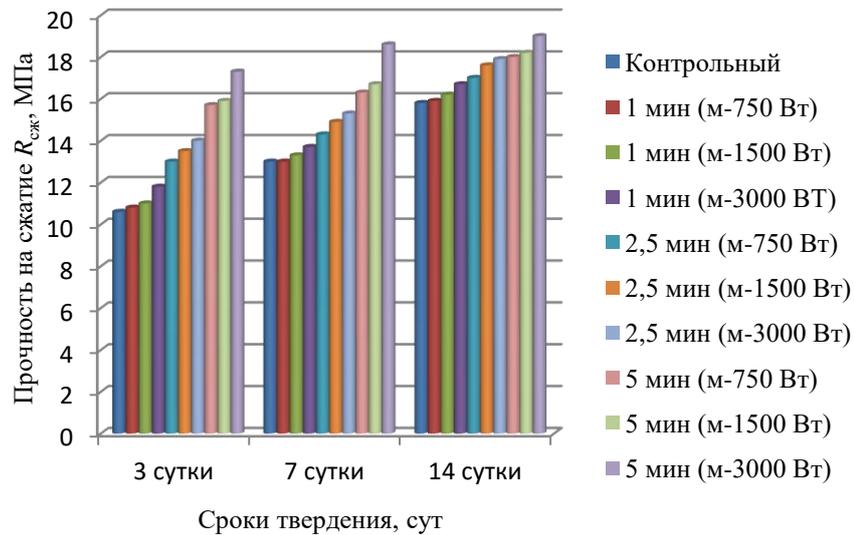


Рис. 1. Прочностные характеристики образцов в зависимости от времени активации и мощности двигателя

Fig. 1. Strength properties of samples depending on activation time and engine powder

Показано, что наибольший прирост прочности достигается при мощности двигателя 3000 Вт и времени обработки смеси, равном 5 мин. Прочность на ранних стадиях твердения (в течение 5 мин при указанной мощности) увеличивается на 7,5 % по сравнению с контрольными образцами.

Таким образом, полученные данные по оценке прочностных характеристик цементного камня с добавкой (прекурсор), полученной при совместном измельчении цемента с влажным песком, показывают высокую эффективность предложенного способа активации. Подготовка добавки происходит непосредственно в процессе приготовления бетонной смеси, т. е. включается в общую технологическую цепочку. Это обеспечивает активацию процессов гидратации цемента на ранних стадиях твердения бетонной смеси, способствуя улучшению физико-механических характеристик материала.

Для исследования физико-химических особенностей влияния полученной добавки на процесс гидратации вяжущего был применен колориметрический метод анализа. Реакции гидратации цементных минералов являются экзотермическими, и взаимодействие цемента с водой сопровождается выделением теплоты [11, 13].

Кривые тепловыделения системы приведены на рис. 2–7.

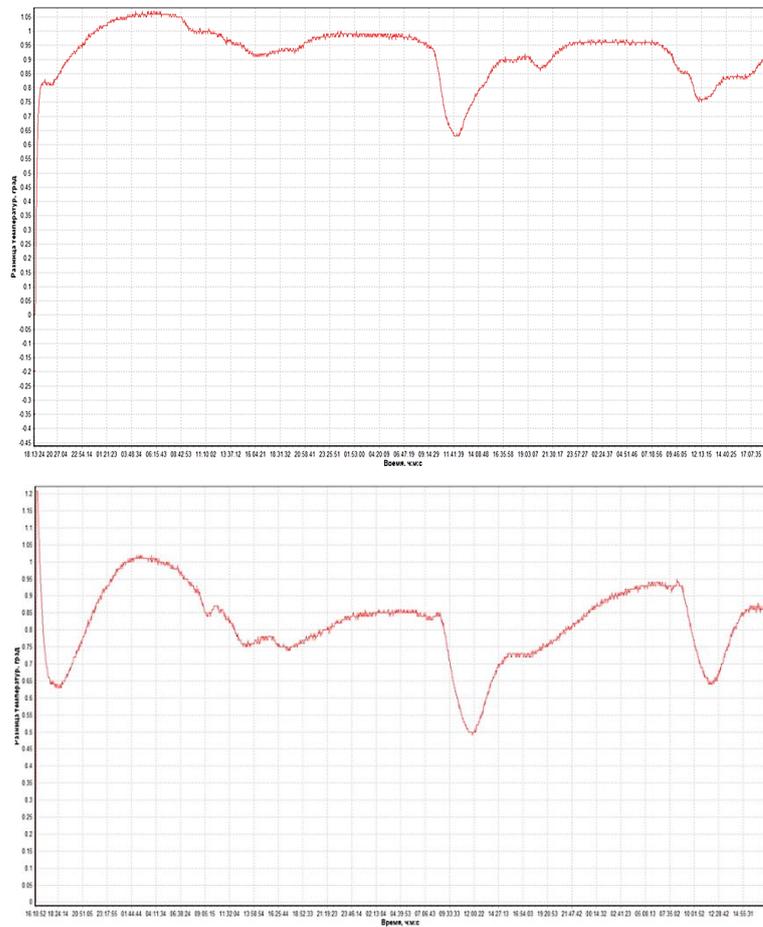


Рис. 2. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:1 В/Ц = 0,4 (3 сут),  $\tau = 0$  мин; 2,5 мин  
 Fig. 2. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:1 and water/cement 0.4 (3 days),  $\tau = 0$  and 2.5 min

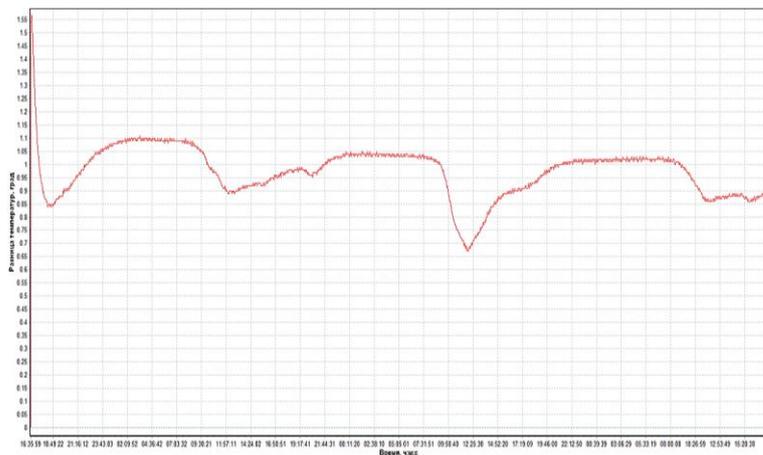


Рис. 3. Кривая тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:1 В/Ц = 0,4 (3 сут),  $\tau = 5$  мин  
 Fig. 3. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:1 and water/cement 0.4 (3 days),  $\tau = 5$  min

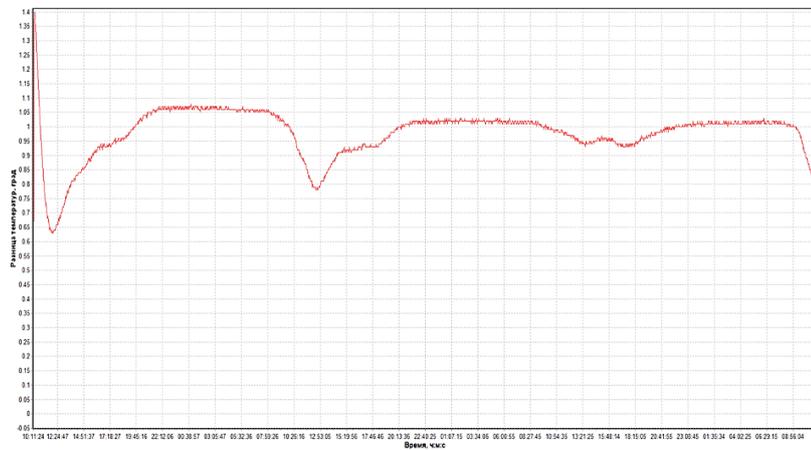
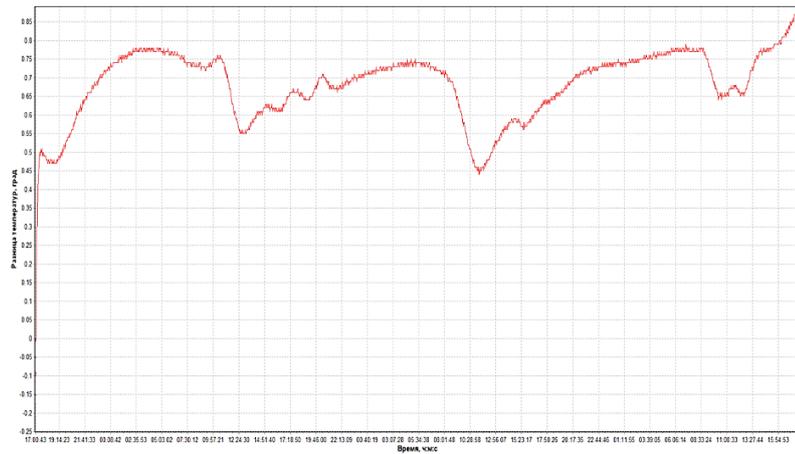


Рис. 4. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:2 В/Ц = 0,4 (3 сут),  $\tau = 0$  мин; 2,5 мин  
 Fig. 4. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:2 and water/cement 0.4 (3 days),  $\tau = 0$  and 2.5 min

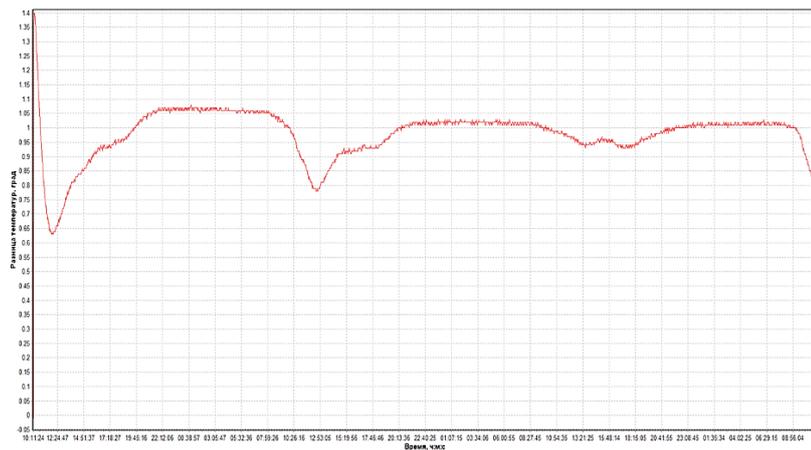


Рис. 5. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 1:2 В/Ц = 0,4 (3 сут),  $\tau = 5$  мин  
 Fig. 5. Heat release curve at ratios: cement/sand 1:2 and water/cement 0.4 (3 days),  $\tau = 5$  min

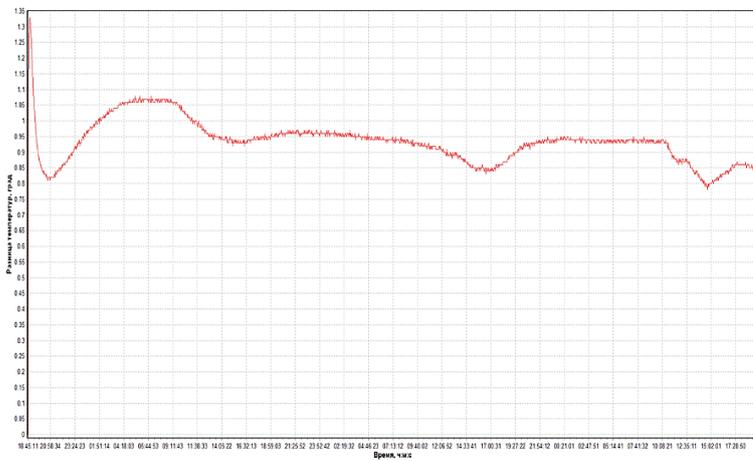
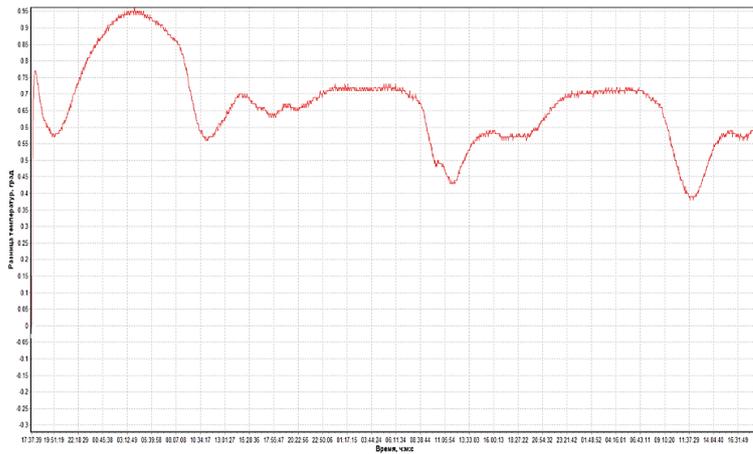


Рис. 6. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 2:1 В/Ц = 0,4 (3 сут),  $\tau = 5$  мин  
Fig. 6. Heat release curve at ratios: cement/sand 2:1 and water/cement 0.4 (3 days),  $\tau = 5$  min

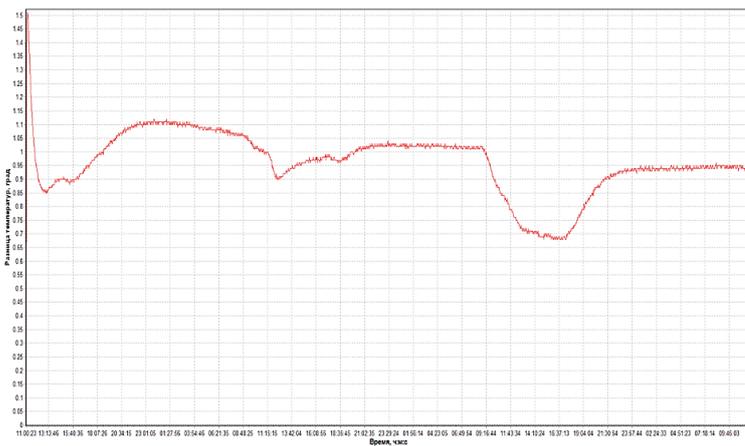


Рис. 7. Кривые тепловыделения при соотношении Ц:П = 2:1 В/Ц = 0,4 (3 сут),  $\tau = 0$  мин; 2,5 мин  
Fig. 7. Heat release curve at ratios: cement/sand 2:1 and water/cement 0.4 (3 days),  $\tau = 2.5$  min

Тепловыделение при смачивании цемента водой стимулирует развитие процессов гидролиза  $C_3S$ , сопровождающихся образованием гидроксида кальция. Реакция гидролиза и теплота смачивания (левая часть максимума тепловыделения при смачивании) являются своеобразным энергетическим импульсом для запуска процессов гидратации цемента [14].

Цикличность процессов гидратации и диспергирования при тепловыделении обусловлена периодичностью процессов накопления коллоидных продуктов гидратации и их перекристаллизации в более компактное состояние, сопровождающееся высвобождением свободной воды в системе.

Расчет теплоты смачивания цементно-песчаной смеси при различном соотношении компонентов и времени активации представлен в табл. 3.

Таблица 3

## Теплота смачивания цементно-песчаной смеси

Table 3

## Heat of wetting of cement-sand mix

Состав	Время активации, мин		
	0	2,5	5
Ц:П = 1:1	$Q_{см} = 5,205$ Дж	$Q_{см} = 7,681$ Дж	$Q_{см} = 9,902$ Дж
Ц:П = 1:2	$Q_{см} = 3,240$ Дж	$Q_{см} = 8,894$ Дж	$Q_{см} = 12,387$ Дж
Ц:П = 2:1	$Q_{см} = 4,883$ Дж	$Q_{см} = 8,433$ Дж	$Q_{см} = 9,575$ Дж

Представленные данные показывают, что изменение температуры цементно-песчаной смеси при контакте с водой протекает аналогично чистому цементу. Однако после первого индукционного периода механизм взаимодействия цемента с водой в смеси с песком существенно изменяется, что сопровождается увеличением разности температур материала в ячейках до 0,50–0,80 °С. Такая разность поддерживается в течение длительного времени.

Это объясняется тем, что образование продуктов гидратации цемента происходит не только за счет протекания процессов гидратации самого цемента, но и дополнительно в результате химических реакций образования гидросиликатов кальция при взаимодействии активированных нанодисперсных частиц цементного вяжущего с кварцевым песком. Это, в свою очередь, приводит к увеличению теплоты смачивания в активированной системе «цемент – песок – вода» (табл. 3). Из данных табл. 3 следует, что наибольшее увеличение теплоты смачивания цементно-песчаной смеси наблюдается при соотношении компонентов 1:2. Для выявления кристаллических фаз, формирующих структуру цементного камня, и оценки изменения интенсивности существующих фаз в исследуемых системах был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) цементно-песчаного камня (рис. 8).

Анализ дифрактограмм показывает, что основными фазами активированного цементно-песчаного камня являются: кварц, гидросиликаты состава  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  и  $2CaO \cdot SiO_2 \cdot 4H_2O$ , гидроалюминаты, гидроферриты кальция, а также этtringит. На основании проведенного РФА отмечается интенсивный рефлекс гидроалюмината кальция после 5 мин активации, что объясняет повышенные значения прочности активированного цементного камня.

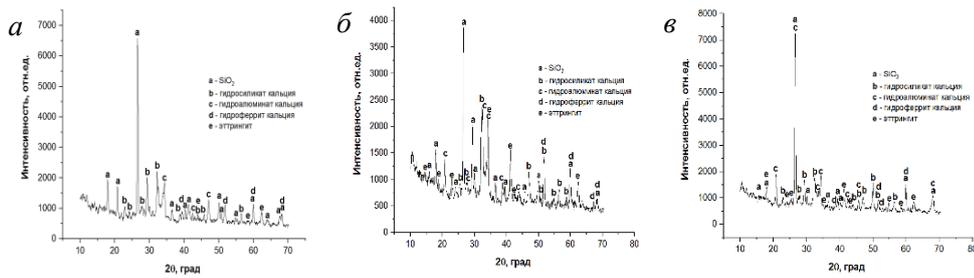


Рис. 8. РФА активированного цементно-песчаного камня:

*a* – контрольный; *б* – время активации 2,5 мин; *в* – время активации 5 мин

Fig. 8. XRD patterns for activated hydrated cement:

*a* – reference; *b* – activation time 2.5 min; *c* – activation time 5 min

### Заключение

В ходе исследования были изучены физико-химические особенности влияния полученной добавки на процессы гидратации вяжущего в ранние сроки твердения.

Предложенная добавка (прекурсор), полученная в результате совместного измельчения цемента с влажным песком, готовится непосредственно в процессе приготовления бетонной смеси, что позволяет интегрировать данный этап в общую технологическую цепочку. Полученная добавка активирует процессы гидратации цемента на ранних стадиях твердения бетонной смеси, что способствует повышению ее прочностных характеристик.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния разработанной добавки на физико-технические свойства получаемой бетонной смеси и затвердевшего бетона.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцева Н.Л. Исследование изменения физико-химических свойств портландцемента при измельчении : специальность 05.23.05 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1967. 15 с.
2. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective polyfunctional additive for composite materials based on cement // Digital technologies in construction engineering Selected Papers. Series Title Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. V. 173. P. 125–131. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8
3. Голк В.И., Полухин О.Н., Дзанаров В.Х. Феномен активации вяжущих свойств веществ в дезинтеграторе // Сухие строительные смеси. 2015. № 1. С. 21–23.
4. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 3. С. 203–216. EDN: HSQIOV
5. Болдырев В.В., Аввакумов Е.Г., Болдырева Е.В. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий. Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 2009. 343 с. ISBN 978-5-7692-1063-1.
6. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62). С. 3–12. 148. DOI: 10.5862/MCE.62.1
7. Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. Симферополь : Таврия, 1997. 180 с.

8. Аввакумов Е.Г., Гусев А.А. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. Новосибирск : Акад. изд-во «Гео», 2009. 155 с.
9. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Самченко С.В., Козлова И.В., Лукьянова Н.А. Влияние способов активации на структурно-технологические характеристики наномодифицированных цементных композиций // *Нанотехнологии в строительстве*. 2022. Т. 14. № 6. С. 481–492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492. EDN: PFYSQZ
10. Паймухин В.И. Анализ способов активации компонентов бетонной смеси // *Материалы 69-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2023. С. 6–8.
11. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Физико-химические процессы при активации цементно-песчаной смеси в центробежном смесителе // *Известия вузов. Физика*. 2011. Т. 54. № 11 (3). С. 346–349.
12. Патент № 2475714 Российская Федерация, G01K17/08. Дифференциальный микрокалориметр и способ измерения тепловыделения : № 2010139028/28 : заявл. 20.03.2012 : опубл. 20.02.2013 / Иванов Ю.А., Лотов В.А. ; заявитель и патентообладатель ООО «Техноаналит». Бюл. № 5. 9 с.
13. Лотов В.А., Сударев Е.А., Иванов Ю.А. Тепловыделение в системе цемент-вода при гидратации и твердении // *Строительные материалы*. 2011. № 11. С. 35–37.
14. Сударев Е.А. Интенсификация процессов гидратации и твердения цемента при механохимической и химической активации : специальность 05.17.11 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2012. 22 с.

## REFERENCES

1. Kudryavtseva N.L. “Changes in physical and chemical properties of Portland cement during grinding”. PhD Abstract, Moscow, 1967. 15 p. (In Russian)
2. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective Polyfunctional Additive for Composite Materials Based on Cement. In: *Selected Papers “Digital Technologies in Construction Engineering. Ser. Lecture Notes in Civil Engineering”*. 2022; 173: 125–131. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8
3. Golik V.I., Polukhin O.N., Dzaparov V.Kh. Phenomenon of Activation of Binding Properties of Substances in Disintegrator. *Sukhie stroitel'nye smesi*. 2015; (1): 21–23. (In Russian)
4. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and Mechanical Activation of Solids. *Uspekhi Khimii*. 2006; 75 (3): 203–216. EDN: HSQIOV (In Russian)
5. Boldyrev V.V., Avvakumov E.G., Boldyreva E.V. Fundamentals of Mechanical Activation, Mechanochemistry and Mechanochemical Technologies. Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie RAN, 2009. 343 p. ISBN 978-5-7692-1063-1. (In Russian)
6. Ibragimov R.A., Pimenov S.I. Influence of Mechanochemical Activation on Cement Hydration Processes. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2016; 2 (62): 3–12. 148. (In Russian)
7. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Influence of Mechanochemical Activation of Binder on Properties of Fine-Grained Concrete. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2016; 62 (2): 3–12. DOI: 10.5862/MCE.62.1 (In Russian)
8. Fedorkin S.I. Mechanical Activation of Secondary Raw Materials in Building Material Production. Simferopol: Tavriya, 1997. 180 p. (In Russian)
9. Avvakumov E.G. Mechanical Activation Methods in Processing Natural and Man-Made Raw Materials. Novosibirsk: “Geo”, 2009. 155 p. (In Russian)
10. Kopanitsa N.O., Dem'yanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Luk'yanova N.A. Influence of Activation Methods on Structural and Technological Properties of Nanomodified Cement Composition. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2022; 14 (6): 481–492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492. EDN: PFYSQZ (In Russian)
11. Paimukhin V.I. Analysis of Activation Methods of Concrete Mix Components. In: *Proc. 69th Univ. Sci. Conf. of Students and Young Scientists*. S.V. Efimenko, Ed., Tomsk: TSUAB, 2023. Pp. 6–8. (In Russian)
12. Lotov V.A., Sudarev E.A., Kutugin V.A. Physicochemical Processes during Activation of Cement-Sand Mixture in a Centrifugal Mixer. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2011; 54 (11/3): 346–349 (In Russian)

13. *Ivanov Yu.A., Lotov V.A.* “Differential microcalorimeter and method for measuring heat release”. Patent Russ. Fed. No. 2475714. 2013. 9 p. (In Russian)
14. *Lotov V.A., Sudarev E.A., Ivanov Yu.A.* Heat release in Cement-Water System during Hydration and Curing. *Stroitel'nye materialy*. 2011; (11): 35–37. (In Russian)
15. *Sudarev E.A.* “Intensification of cement hydration and hardening processes with mechanochemical and chemical activation”. PhD Abstract. Tomsk, 2012. (In Russian)

#### **Сведения об авторах**

*Копаница Наталья Олеговна*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kopanitsa@mail.ru

*Паймухин Владислав Игоревич*, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, v.i.paimukhin@yandex.ru

#### **Authors Details**

*Natal'ya O. Kopanitsa*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

*Vladislav I. Paimukhin*, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, v.i.paimukhin@yandex.ru

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Authors contributions**

The authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.04.2025  
Одобрена после рецензирования 25.04.2025  
Принята к публикации 05.05.2025

Submitted for publication 10.04.2025  
Approved after review 25.04.2025  
Accepted for publication 05.05.2025