



**БАЛТИЙСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ИММАНУИЛА КАНТА**

**Международная научно-практическая конференция  
«Материаловедение, формообразующие  
технологии и оборудование 2025» (ICMSSTE 2025)  
27-30 мая 2025 г**

# **КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ И НАБОРОМ ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПЗИТОВ**

**Пузатова Анастасия Вячеславовна**

ст. преподаватель, зав. лаб. Строительных материалов

ОНК «Институт высоких технологий»

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

**Ялта 2025**

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, тепловыделение бетона и набор прочности связаны друг с другом – чем быстрее происходит процесс гидратации с выделением тепла, тем интенсивнее становится рост кристаллогидратов, формирующих прочную структуру цементного камня и всего композита. Степень гидратации  $\alpha_\tau$ , связанную со скоростью реакции, можно определить на основании механических и физических свойств, представленных кинетикой набора прочности и кинетикой тепловыделения:

$$\text{Степень гидратации} \quad \alpha_\tau = \frac{R_\tau}{R_{28}} = \frac{Q_\tau}{Q_{max}}$$

где  $t$  – время твердения, сут;

$R_t$  – прочность в возрасте  $t$ , МПа;

$R_{28}$  – прочность в возрасте 28 суток, МПа;

$Q_t$  – значение интегрального тепловыделения в момент времени  $t$ , Дж/г;

$Q_{max}$  – максимальное значение тепловыделения цемента в возрасте 28 суток, Дж/г.

С целью описания кинетики тепловыделения, связанной с кинетикой набора прочности, используется уравнение по EN 1992-1-1:

$$\frac{R_t}{R_{28}} = \frac{Q_t}{Q_{max}} = \exp \left( k \cdot \left( 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^d \right) \right),$$

где  $k, d$  – параметры уравнения.

Целью данной работы является исследование корреляции кинетики степени гидратации по данным тепловыделения и набора прочности композитов, модифицированных механической активацией цементно-песчаной композиции

## Кинетика набора прочности

Исследуемая механоактивированная композиция (ЦПК) состоит из цемента и песка с отношением по массе 1:2,14. Использовался портландцемент Евроцем, 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 см<sup>2</sup>/г

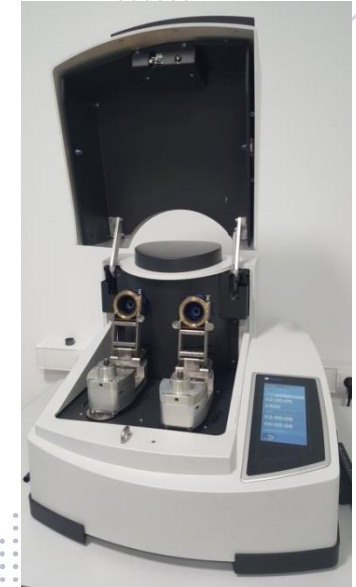


Рисунок 1. Мельница Retsch EMax



Рисунок 2. Механоактивированная Цементно-песчаная композиция

Исследование набора прочности проводилось на образцах-кубиках размерами 20x20x20 мм при соотношении компонентов активированная ЦПК:вода= 1:0,87.

Возраст образцов:

- начальная прочность – первые 0,5-1,5 часов твердения.
- Далее – 1, 3, 7 и 28 суток



Рисунок 3. Испытание образцов

## Кинетика тепловыделения

Был произведен калориметрический анализ механоактивированной ЦПК в соответствии с ГОСТ 310.5-88 «Цементы. Метод определения тепловыделения» с использованием калориметра TAM Air.



Рисунок 5. Подготовка образцов

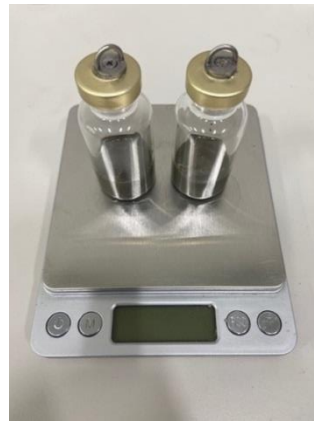


Рисунок 6. Ампулы с исследуемой смесью



Рисунок 4. Калориметр

Ампулы наполняются сухой смесью, затворяются водой в отношении активированная ЦПК:вода = 1:0,5, плотно закрываются и помещаются в калориметр для проведения исследований при 20°C.

Прибор регистрирует интенсивность теплового потока реакции, интегрированием полученных данных определяются значения суммарной тепловой энергии в любой рассматриваемый момент времени. Длительность эксперимента составляла 144 часа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В таблице 1 представлены данные по набору прочности образцов модифицированных композитов в первые 0,5-1,5 часа твердения, а также на более поздних сроках – 24, 72 и 168 часов, что соответствует 1, 3 и 7 суткам набора прочности. Получены значения прочности образцов в возрасте 28 суток, что составило  $R_{28}=37,42$  МПа. Посчитаны значения степени гидратации  $\alpha_t = R_t/R_{28}$  через кинетику набора прочности.

Таблица 1. Показатели кинетики набора прочности модифицированных композитов

t, ч	$R_t$ , МПа	$R_t/R_{28}$	t, ч	$R_t$ , МПа	$R_t/R_{28}$
0,5	0,25	0,008	1,5	0,59	0,423
0,75	0,32	0,024	24	13,17	0,509
1,00	0,42	0,059	72	22,67	0,568
1,25	0,46	0,112	168	27,92	0,610

В таблице 2 представлены значения интегрального тепловыделения механоактивированной ЦПК, пересчитанные значения тепловыделения на 1 г цемента и значения относительного тепловыделения, полученные делением значений тепловыделения в момент времени  $t$  на максимальное значение тепловыделения цемента в возрасте 28 суток.

Таблица 2. Показатели кинетики тепловыделения механоактивированной ЦПК

t, ч	$Q_t$ , Дж/г	$Q_{\text{отн.ЦЕМ}}$ , Дж/г	$Q_t/Q_{\text{max}}$	t, ч	$Q_t$ , Дж/г	$Q_{\text{отн.ЦЕМ}}$ , Дж/г	$Q_t/Q_{\text{max}}$
2	0,951	2,988	0,008	24	51,834	162,758	0,423
4	2,976	9,346	0,024	36	62,415	195,984	0,509
6	7,246	22,752	0,059	48	69,605	218,560	0,568
8	13,692	42,993	0,112	60	74,738	234,677	0,610
10	20,969	65,843	0,171	72	78,786	247,387	0,643
12	28,257	88,728	0,230	84	82,000	257,481	0,669
14	34,909	109,613	0,285	96	84,320	264,763	0,688
16	39,881	125,226	0,325	108	85,911	269,761	0,701
18	43,712	137,257	0,357	120	87,000	273,180	0,710
20	46,847	147,100	0,382	132	87,781	275,631	0,716
22	49,511	155,465	0,404	144	88,318	277,317	0,720

Значение максимального тепловыделения цемента ЦЕМ I 42,5 Н (М500) в соответствии с СП 41.13330.2012 составляет  $Q_{\text{max}}=385$  Дж/г (кДж/кг).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

**Кинетика набора прочности**

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

**Кинетика тепловыделения**

$$\frac{Q_{\tau}}{Q_{max}} = \exp\left(k \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{\tau}\right)^d\right)\right) \quad (2)$$

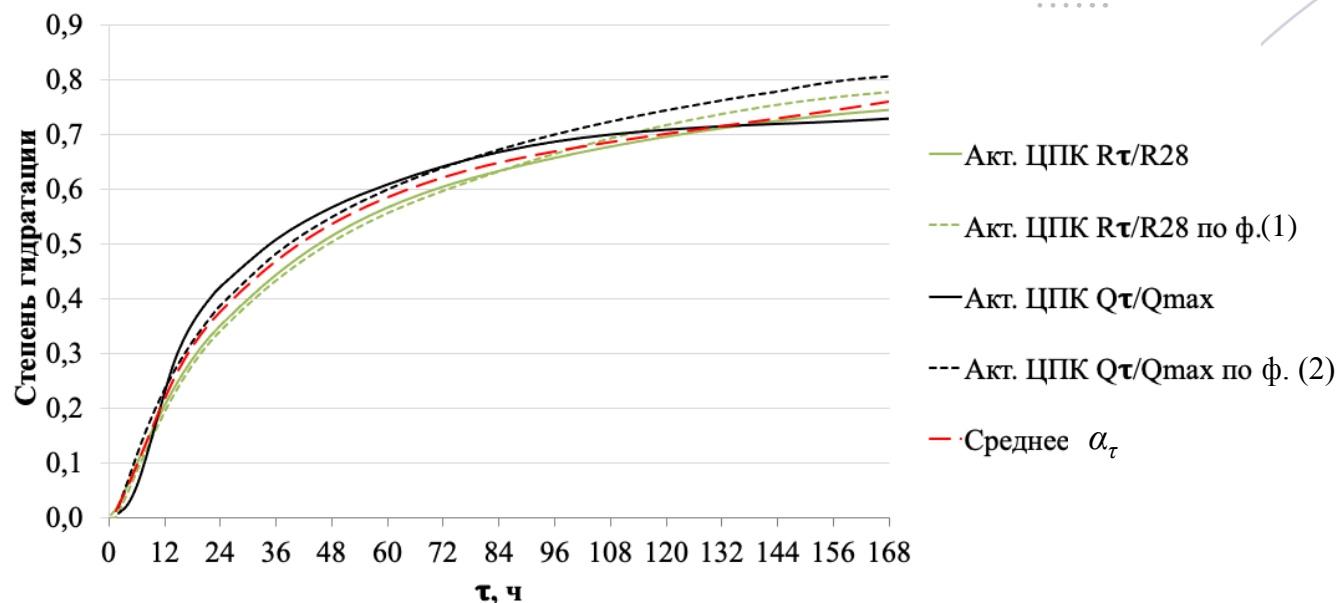


Рисунок 7. Экспериментальные и расчетные значения кинетики степени гидратации по данным тепловыделения и набора прочности

Таблица 3. Параметры уравнений кинетики степени гидратации

Уравнение кинетики	ф. (1)		ф. (2)		Среднее $\alpha$	
Обозначение	$R_{\tau}/R_{28}$		$Q_{\tau}/Q_{max}$		$\bar{\alpha}_{\tau}$	
Параметр	$k$	$d$	$k$	$d$	$k$	$d$
Расч. для акт. ЦПК	0,25	0,50	0,20	0,52	0,23	0,51
По данным <sup>1,2</sup> для ЦЕМ I 42,5 Н	0,25-0,43	0,50	0,16-0,21	0,46-0,51	-	-

Коэффициент корреляции между  $R_{\tau}/R_{28}$  и  $Q_{\tau}/Q_{max}$   
 **$r=0,9920$**

1. Nesvetaev, G. Autogenous shrinkage and early cracking of massive foundation slabs / G. Nesvetaev, Yu. Koryanova, B. Yazyev // Magazine of Civil Engineering. – 2024. – Vol. 17, No. 6(130). – P. 13005.

2. Несветаев, Г. В. Учет влияния добавок на тепловыделение бетона с целью предотвращения раннего трещинообразования массивных монолитных конструкций / Г. В. Несветаев, Ю. И. Корянова, В. В. Шуть // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № 6.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **В ходе проведенного исследования:**

- Получены значения степени гидратации по данным кинетики набора прочности и интегрального тепловыделения для механоактивированной цементно-песчаной композиции;
- Получены параметры уравнений, описывающих кинетику набора прочности и кинетику тепловыделения, а также кинетику усредненной степени гидратации;
- Коэффициент корреляции для экспериментальных значений степени гидратации по данным тепловыделения и набора прочности составляет 0,9920.

*Можно сделать вывод о высокой корреляции между тепловыделением и набором прочности цементных композитов, модифицированных механической активацией цементно-песчаной композиции*



**БАЛТИЙСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ИММАНУИЛА КАНТА**

**Международная научно-практическая конференция  
«Материаловедение, формообразующие  
технологии и оборудование 2025» (ICMSSTE 2025)  
27-30 мая 2025 г**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

**Пузатова Анастасия Вячеславовна**  
ст. преподаватель, зав. лаб. Строительных материалов  
ОНК «Институт высоких технологий»  
Балтийский федеральный университет им. И. Канта

**Ялта 2025**