

## Высокофункциональные бетоны для станкостроения с применением нано- и микромасштабных сырьевых компонентов

Виталий Александрович Береговой<sup>1\*</sup> , Евгений Валерьевич Снадин<sup>1</sup> , Александр Сергеевич Иноземцев<sup>2</sup> ,  
Антон Сергеевич Пилипенко<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: techbeton@pguas.ru

**АННОТАЦИЯ: Введение.** Уникальное сочетание реотехнологических свойств и механических показателей обуславливает перспективы применения самоуплотняющихся и высокопрочных бетонов для изготовления базовых элементов станков и промышленного оборудования. Исследованы процессы адсорбции современных пластификаторов на ряде минеральных и полимерных модификаторов бетонной смеси. Степень совместимости нано- и микромасштабных минеральных добавок в составах композиционных цементных вяжущих определялась методом калориметрии с использованием полуадиабатической установки усовершенствованной конструкции. **Материалы и методы.** Цементные вяжущие – портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н (ООО «Азия Цемент», Россия), Nanodur (Германия, Dyckerhoff GmbH); гиперпластификаторы – Melflux 1641F, 2651F, 5581F (Германия), PCE TR-6088 (КНР), Sika ViscoCrete 240 HE Plus и 226-P (ПФ); суперабсорбирующий полимер; нано- и микромасштабные минеральные добавки – микрокремнезем МК-85, метакаолин ВМК-45, микрокальцит ММ-315, маршалит Silverbond 15 EW, молотые кремнеземсодержащие породы. Использованы методы селективного растворения, дифференциально-термического анализа, лазерной гранулометрии и полуадиабатической калориметрии. **Результаты и обсуждение.** Качество ультрадисперсных минеральных добавок определяет их способность химически связывать портландит за счет проявления пуццолановых свойств. Из исследованного ряда максимальную пуццолановую активность проявляют микрокремнезем и опока. Термическая активация эффективна в отношении компонентов, состоящих из кристаллического кремнезема (маршалит, молотый кварцевый песок): в результате обработки рост показателей составил 25%. Установлено отсутствие избирательной адсорбции молекул гиперпластификатора суперабсорбирующими модификаторами составов на основе полиакрилата натрия. Из минеральных добавок высокую адсорбцию к гиперпластификаторам проявляют метакаолин и трепел. Экспресс-оценка влияния рецептурных факторов на твердение цементных композитов апробирована на усовершенствованном варианте полуадиабатического калориметра. **Выводы.** Установлено, что наличие в составе композиционного цементного вяжущего микромасштабных минеральных добавок на основе микрокремнезема обеспечивает возможность выработки на его основе высокофункциональных бетонов, адаптированных под станкостроение. Исследование пуццолановой активности, адсорбционной способности и характера кумулятивных кривых тепловыделения показало целесообразность замены микрокремнезема на метакаолин, а также перспективность его частичного микширования тонкомолотой природной опокой. Анализ тепловых эффектов, сопровождающих процессы гидратации системы «цемент – добавка – вода», с помощью термосных калориметров позволяет повысить оперативность исследований совместимости добавок в составах высокофункционального бетона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высокофункциональные бетоны, станкостроение, нано- и микромасштабные добавки, совместимость, калориметрия.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Исследование выполнено при финансовой поддержке НИУ МГСУ в рамках конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами организаций – членов и стратегических партнеров Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» (договор № ПГУАС/К-23 от 05.06.2023) в целях исполнения Программы развития НИУ МГСУ на 2021–2030 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Береговой В.А., Снадин Е.В., Иноземцев А.С., Пилипенко А.С. Высокофункциональные бетоны для станкостроения с применением нано- и микромасштабных сырьевых компонентов // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 3. С. 200–210. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-200-210>. – EDN: HGNZWR.

## ВВЕДЕНИЕ

При всех положительных качествах современных конструкционных материалов на основе металлических сплавов отличает высокая энергоёмкость получения и переработки. В этой связи поиск альтернатив сопоставимого конструкционного качества, технологии которых не предусматривают наличие горячих процессов (плавление, литье, сварка и т.п.), относится к актуальным задачам современного материаловедения. Уникальное сочетание реотехнологических свойств смесей и механических показателей затвердевшего бетона предопределяет большой потенциал самоуплотняющихся и высокопрочных видов высокофункциональных бетонов (ВФБ) как основы для холодного литья массивных частей станков и промышленного оборудования. Успешность предлагаемого подхода зависит от решения комплекса задач, связанных с адаптацией существующих рецептур применительно к особенностям технологии изготовления отливок и параметрам работы конструктивных элементов.

Основные различия рецептур составов ВФБ связаны с видом и количеством модифицирующих добавок, а также со спецификой подготовительных операций и процессов гомогенизации сырьевых смесей. Общим признаком ВФБ является широкое применение в составах высокодисперсных (нано- и микрометрических) минеральных компонентов. Структурообразующая функция таких добавок различается в зависимости от масштабного уровня [1]:

- микрометрические вводят совместно с подобранными химическими пластификаторами для увеличения физического объема реологически-активной (водоцементноминеральной) матрицы;
- наноразмерные непосредственно участвуют в формировании минерально-фазового состава твердеющего конгломерата, вступая во взаимодействие с гидрозольной известью  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , выделяемой при гидратации алитовой составляющей клинкера. В результате происходит уплотнение и упрочнение микроструктуры цементного камня путем замещения минеральной фазы портландита более прочными новообразованиями — гидросиликатами кальция (тоберморит, ксонотлит, тросит и т.д.).

Специфика участия в структурообразующих процессах приводит к различию в минеральном типе используемых высоко- и ультрадисперсных добавок. Первые усиливающие реологические показатели бетонной смеси представлены каменной мукой из кварцита, известняка, доломита [2], доменного шлака, кремнеземистых пород и др. Обладающие повышенной пуццолановой активностью нанораз-

мерные компоненты являются, как правило, нанокремнеземами техногенного генезиса (конденсированными, химически-осажденными, пирогенными), получаемыми при восстановлении высокочистого кварца углем в электрических дуговых печах при изготовлении кремния и ферросилиция.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Цементные вяжущие — портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н (ООО «Азия Цемент», Россия), Nanodur (Германия, Dyckerhoff GmbH); гиперпластификаторы — Melflux 1641F, 2651F, 5581F (Германия), PCE TR-6088 (КНР), Sika ViscoCrete 240 HE Plus и 226-P (РФ); суперабсорбирующий полимер; нано- и микромасштабные минеральные добавки — микрокремнезем МК-85, метакаолин ВМК-45, микроальцит ММ-315, маршалит Silverbond 15 EW, молотые кремнеземсодержащие породы. Использованы методы селективного растворения, дифференциально-термического анализа, лазерной гранулометрии и полуадиабатической калориметрии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В практике производства конструкций и базовых деталей обрабатывающего оборудования из цементного литья хорошо зарекомендовали себя составы на основе компаундов Nanodur Compound [3, 4]. При высоком удельном расходе вяжущего вещества ( $610 \text{ кг/м}^3$ ) их применение позволяет получать конструкционные фибробетоны с прочностью при сжатии 170...190 МПа.

Технико-экономические показатели современных материалов, применяемых в производстве конструкций, включая базовые детали станков и оборудования, приведены в табл. 1.

Из табличных данных следует, что показатели конструкционных материалов на цементном компаунде Nanodur определяют современный уровень развития в этой области бетоноведения. Компонентный состав Nanodur определяли методами селективного растворения и дифференциально-термического анализа (ДТА). Результаты ДТА-исследований представлены на рис. 1. Отсутствие эндотермических эффектов в диапазоне 800...1000°C на кривой ДТА и потерь массы пробы в сочетании с данными химического анализа позволили установить отсутствие в составе Nanodur карбонатных компонентов.

Удельную поверхность ( $S_{\text{уд}}$ ) и средний размер частиц определяли по газопроонируемости анализируемой пробы на приборе ПСХ-10. Фактические величины  $S_{\text{уд}}$  составили 540...542  $\text{м}^2/\text{кг}$ , что существенно выше их средних значений для рядовых портландцементов.

Таблица 1

Показатели промышленных материалов

| Материал                           | $R_{сж}$ , МПа | $R_p$ , МПа | $E_{ст}$ , ГПа | $\rho$ , т/м <sup>3</sup> | Стоимость,<br>тыс. руб./тонна |
|------------------------------------|----------------|-------------|----------------|---------------------------|-------------------------------|
| Чугун                              | 550            | 170         | 115            | 7...7,8                   | 30                            |
| Сталь                              | 500            | 500         | 210            | 7,7...8,2                 | 50,5                          |
| Алюминиевые сплавы                 | 200            | 200         | 70             | 2,6...2,9                 | 140                           |
| Природный гранит                   | 230            | 10          | 49             | 2,34...2,78               | 10                            |
| Полимерный композит<br>«Синтегран» | 120            | 27          | 27             | 2,4                       | 150                           |
| Компаунд «Nanodur 5941»            | 135-150        | 15          | 46,5           | 2,45                      | н/д                           |
| ВФБ                                | 130            | 10          | 50             | 2,4...2,5                 | 10                            |

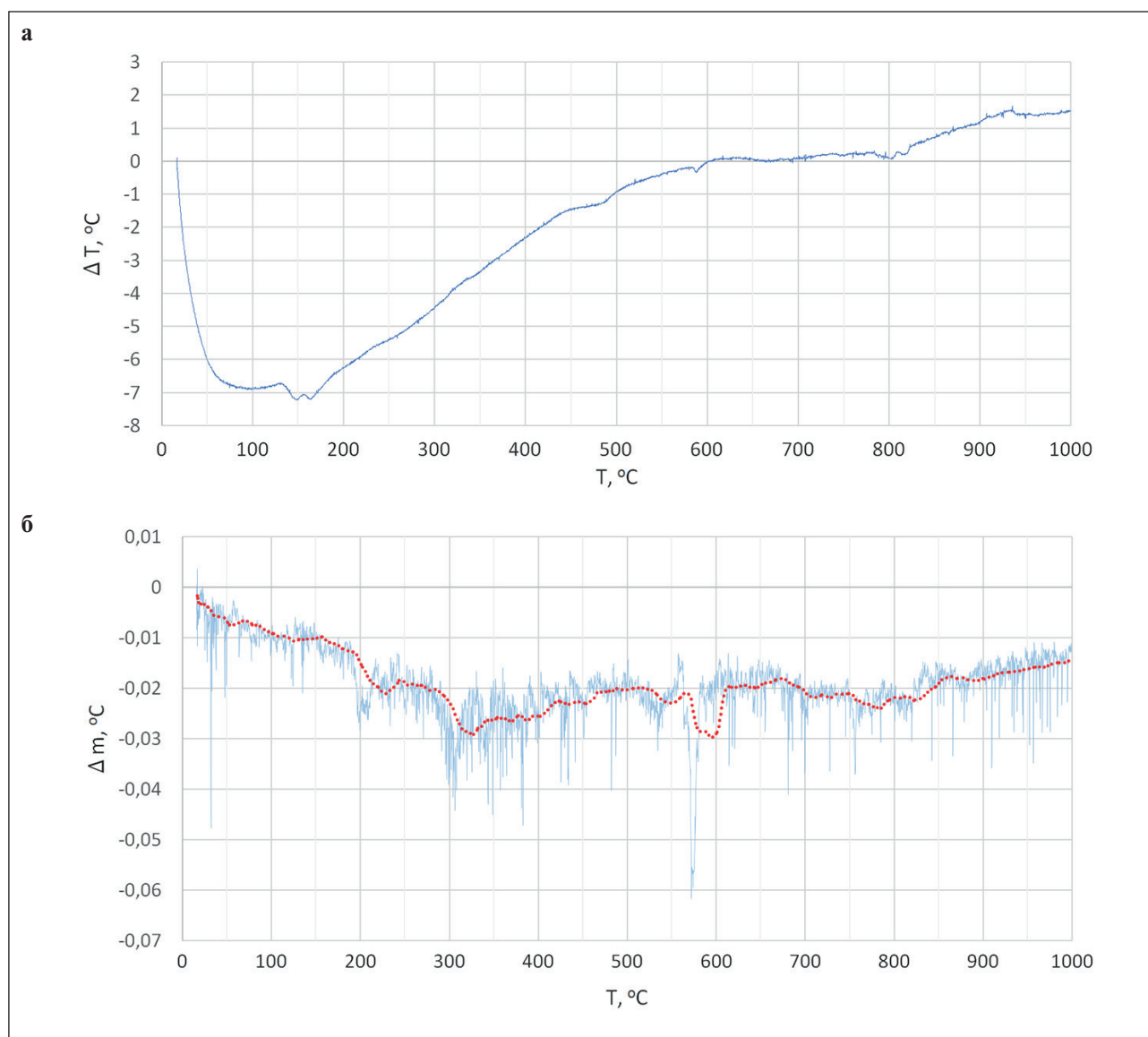


Рис. 1. Результаты термического анализа вяжущего Nanodur: а – дифференциальная термограмма; б – термогравиметрическая кривая

Исследование гранулометрического состава Nanodur проведено с помощью лазерного дифракционного анализатора Shimadzu SALD-3101. В результате получена гистограмма распределения размеров частиц и кумулятивная кривая гранулометрического состава (рис. 2). Анализ данных показал, что распределение размеров ограничено диапазоном 0,3...154 мкм. По среднему диаметру частицы на гистограмме распределены по трем пикам: первый – 0,41 мкм; второй – 1,3 мкм; третий – 39,0 мкм. Таким образом, помимо преобладания в составе частиц микрометрического размера выявлено присутствие значительной доли субмикрометрических частиц, обеспечивающих формирование более плотной реологически- и химически активной дисперсной структуры твердеющего компаунда. Однородная фракция с частицами 0,35...0,50 мкм указывает на наличие в составе техногенного микрокремнезема.

Для поиска альтернатив дорогостоящему микрокремнезему апробированы тонкодисперсные добавки: метакраолин марки ВМК-45, маршалит, опока, диатомит, трепел, бой оконного стекла и газосиликата, а также молотый кварцевый песок и гранитный отсев.

Качество ультрадисперсных минеральных добавок во многом определяется их способностью химически связывать портландит за счет проявления своих пуццоланических свойств [5, 6]. Коэффициент пуццолановой активности ( $K$ ) определяли способом растворения исследуемой навески в 10 %-ом растворе NaOH. Результаты экспериментов показаны на рис. 3.

По величине  $K$  исследованные добавки составляют следующий групповой ряд: микрокремнезем, опока (max) → диатомит, трепел (med) → маршалит, стекло, газосиликат, кварцевый песок гранитный отсев (min).

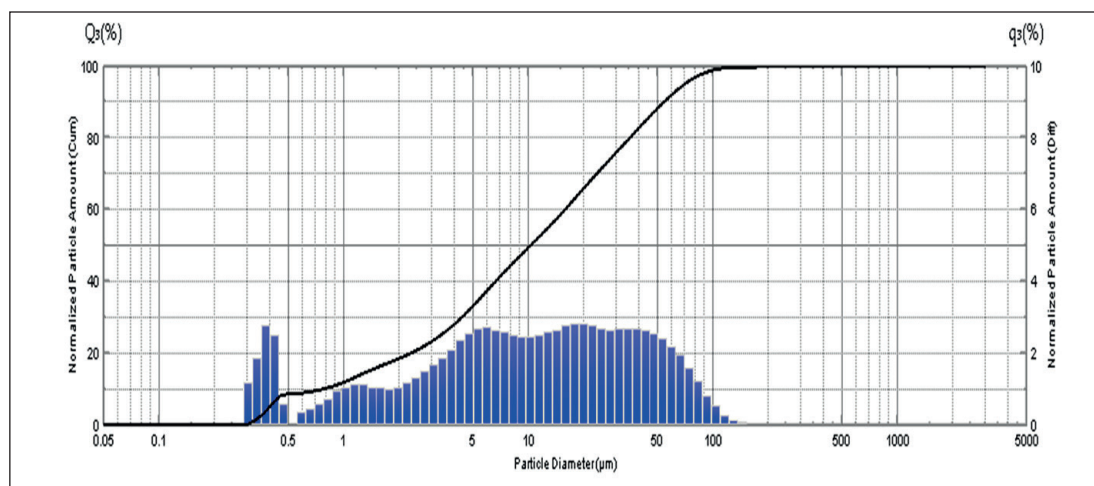


Рис. 2. Результаты гранулометрического анализа

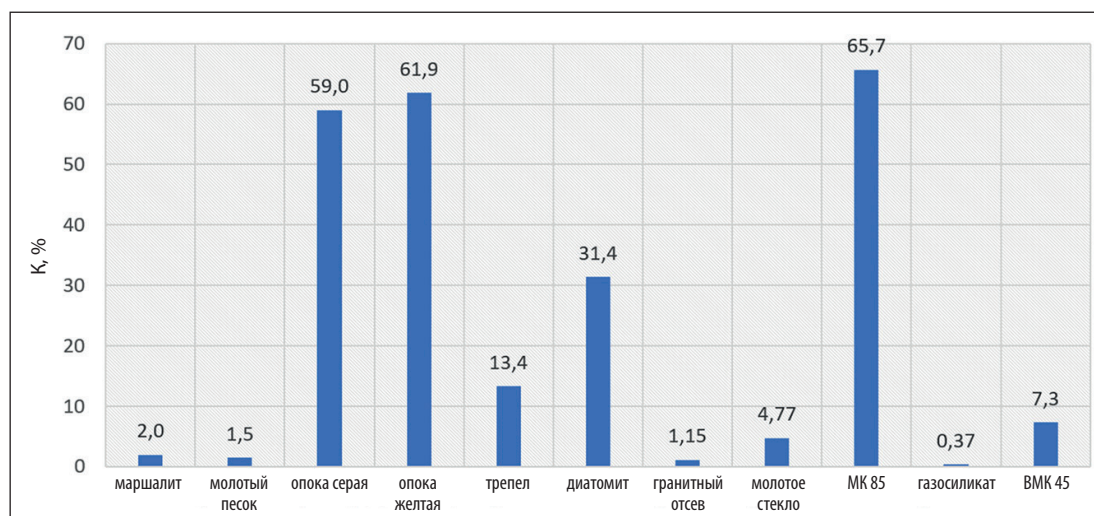


Рис. 3. Результаты определения пуццолановой активности



Термическая активация относится к эффективному способу повышения активности минеральных добавок [7]. Термоактивацию природных наполнителей осуществляли по двум режимам термической обработки (ТО): № 1 – нагрев в течение 20 минут до  $t = 620^{\circ}\text{C}$ ; изотермическая выдержка – 30 минут; охлаждение – 120 минут; № 2 – нагрев в течение 20 минут до  $t = 620^{\circ}\text{C}$ ; изотермическая выдержка – 30 минут и быстрое охлаждение воздушным потоком. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.

Максимальный эффект термообработка оказывает на материалы, состоящие из кристаллического кремнезема (маршалит, молотый кварцевый песок). Это обусловлено развитием дефектов структуры

в результате термических напряжений и фазового ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) перехода кварца, повышающих поверхностную энергию частиц. Закономерно, что данный эффект усиливается после термической обработки, включающей резкое охлаждение зерен материала (ТО-2). Породы, образованные аморфным кремнеземом, показали малую восприимчивость к термоактивации.

Влияние минеральных и суперабсорбирующих добавок на поверхностную активность поликарбонатных гиперпластификаторов цементных систем (ГП Melflux, Sika, PCE TR) оценивали по величине поверхностного натяжения водных растворов ( $\sigma$ , Дж/м<sup>2</sup>) (рис. 5).

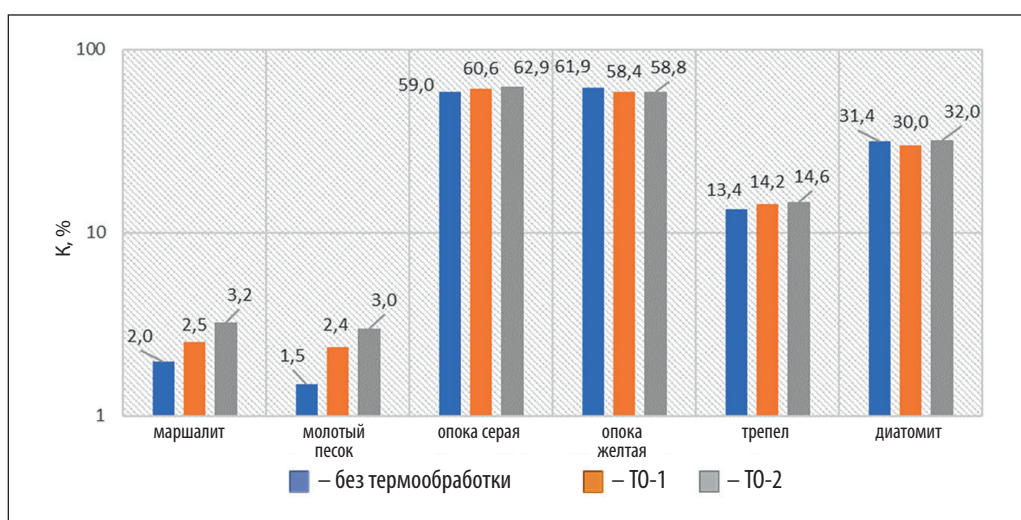


Рис. 4. Влияние термической обработки на пуццолановую активность

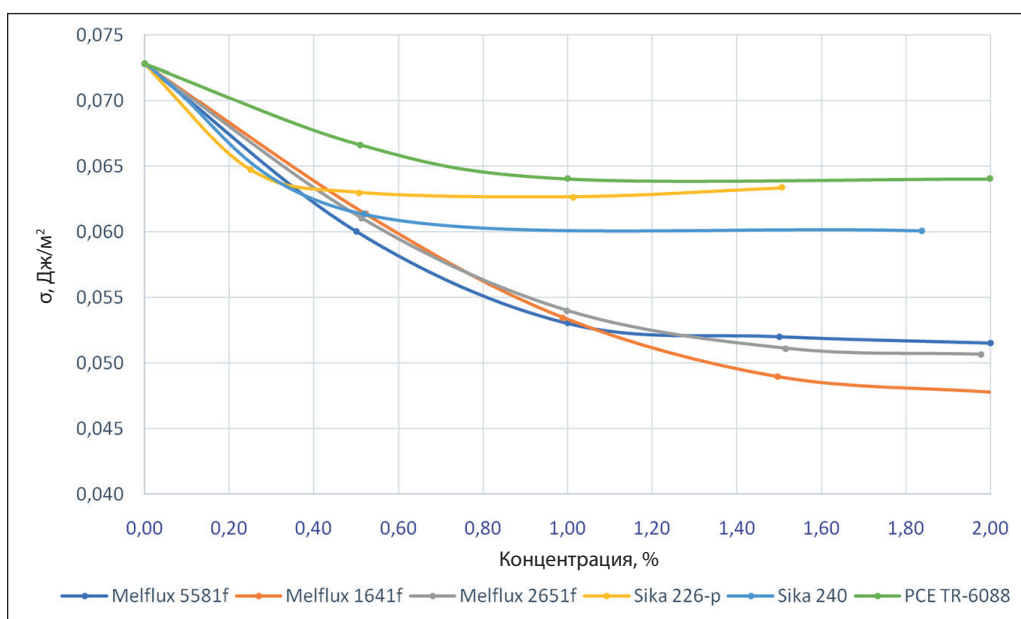


Рис. 5. Влияние гиперпластификаторов на поверхностное натяжение

Согласно полученным данным, добавки Melflux (1641f, 2651f, 5581f) демонстрируют близкое к линейному уменьшение поверхностного натяжения при росте концентрации до 1...1,5% с последующим выходом на плато. Гиперпластификаторы Sika (226-р, 240), а также PCE TR-6088 показывают более умеренное снижение коэффициента поверхностного натяжения при оптимальной концентрации 0,5%.

Инновационный способ снижения усадки и внутреннего ухода твердеющего бетона заключается в применении суперабсорбирующих полимеров (САП), эффективно аккумулирующих избыток технологической воды на начальном этапе изготовления монолитных конструкций [8–10]. Для исследования взаимодействия растворов гиперпластификаторов и САП использовали модельную систему, состоящую из 1%-ого раствора ГП Melflux 5581F и насыщенных водой гранул полиакрилата натрия. Соотношение между компонентами соответствует их дозировкам, применяемым в составах ВФБ (ГП:САП = 1:1) [11]. Исследовано изменение величины  $\sigma$  дистиллированной воды и раствора ГП после добавления водонасыщенного САП. Результаты экспериментов приведены на рис. 6.

Из диаграммы видно, что введение САП не оказывает влияния на величину  $\sigma$  водного раствора. Механизм повышения поверхностного натяжения раствора ГП при добавлении САП может обуславливаться как снижением концентрации раствора ГП вследствие замещения части раствора водой, ранее абсорбционно связанной САП, так и сорбцией ГП

гранулами полиакрилата натрия. Проверочный эксперимент для выявления механизма взаимодействия между рассматриваемыми компонентами предусматривал добавление сухого САП к растворам ГП (0,5 и 1%).

Графики на рис. 7 показывают, что введение сухого САП не сопровождается изменением  $\sigma$  растворов, а значит концентрация ГП остается постоянной. Это указывает на отсутствие процесса избирательной адсорбции молекул гиперпластификатора, таким образом, раствор абсорбируется гранулами САП без разделения.

Адсорбционную способность к молекулам гиперпластификатора определяли по изменению величины поверхностного натяжения фильтрата применительно к минеральным добавкам, различающимся пуццоланическими свойствами (рис. 8 и 9).

Полученные данные указывают, что введение всех исследованных добавок сопровождается повышением коэффициента поверхностного натяжения раствора. Наибольший адсорбционный эффект наблюдается для добавок метакеолина и трепела.

Эффективным методом для оперативной оценки влияния рецептурно-технологических факторов на твердение цементных композитов является калориметрия [12–14]. Анализ результирующей величины тепловых эффектов, сопровождающих процессы гидратации системы «цемент – добавка – вода», позволяет определять совместимость добавки на ранних этапах проектирования составов ВФБ. С учетом положительного опыта применения термических калориметров для выполнения предстоящих

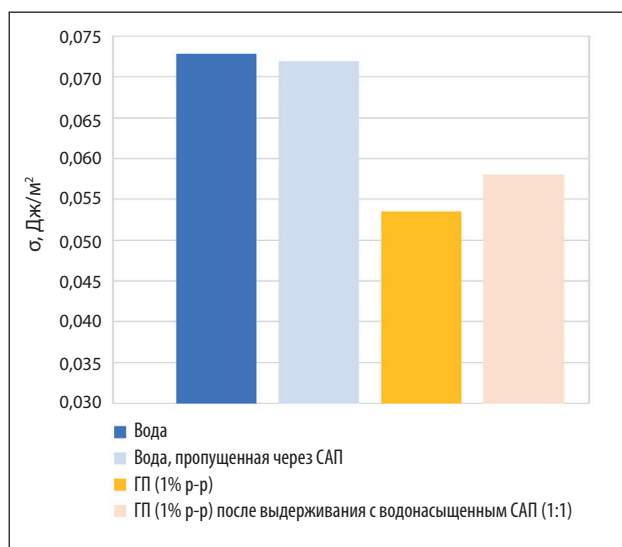


Рис. 6. Влияние добавок САП и ГП на поверхностное натяжение растворов

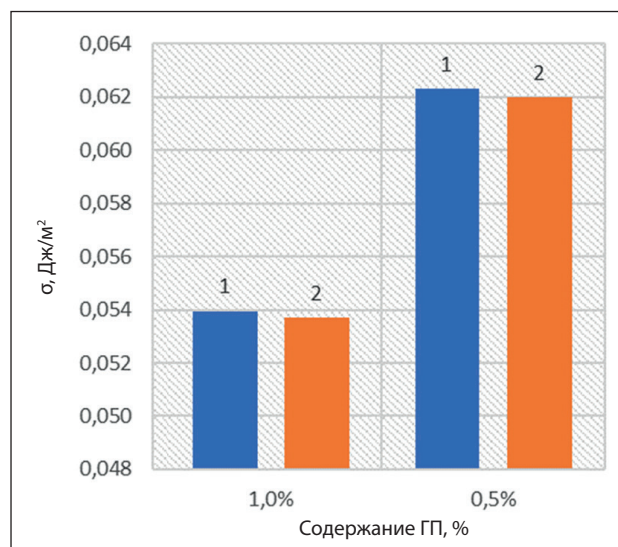


Рис. 7. Влияние добавки САП на поверхностное натяжение растворов ГП: 1 – без добавок; 2 – с добавлением



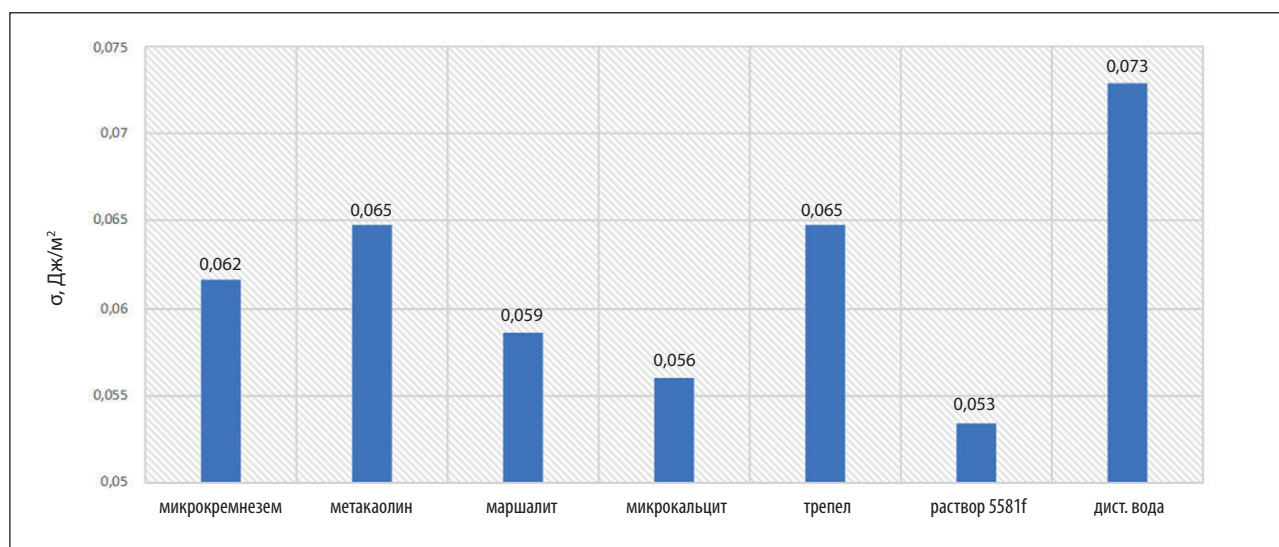


Рис. 8. Влияние минеральных добавок на величину поверхностного натяжения 1%-ого раствора ГП (Melflux 5581f)

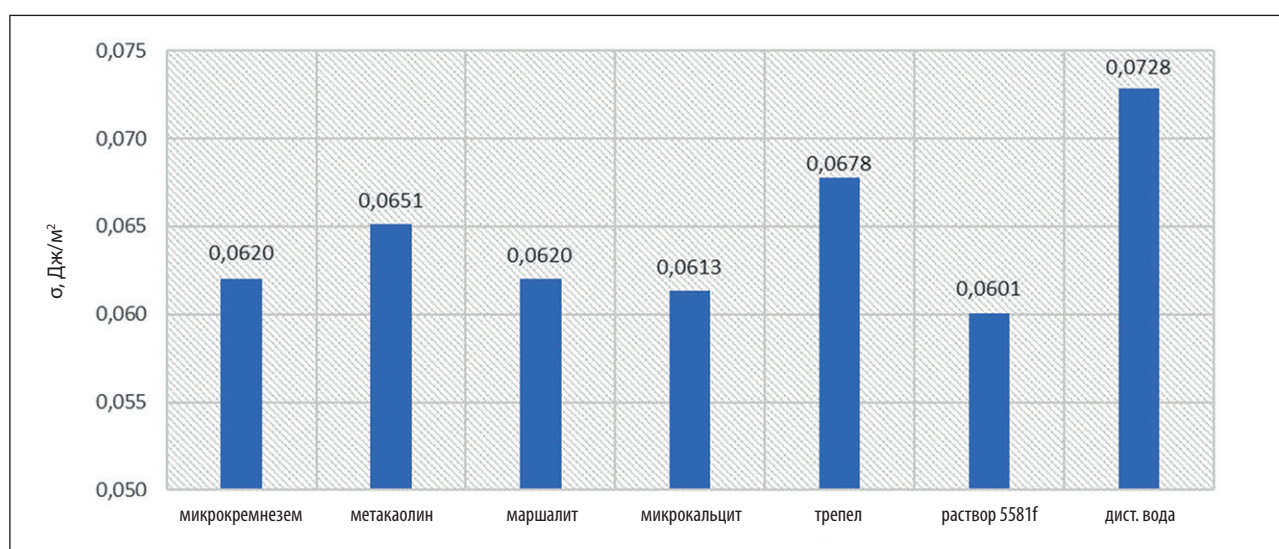


Рис. 9. Влияние минеральных добавок на величину поверхностного натяжения 0,5%-ого раствора ГП (Melflux 5581f)

исследований были разработаны усовершенствованные прототипы таких устройств [15].

Тепловыделение за период (Дж/мин) рассчитывалось по следующей формуле:

$$Q = c_{\text{см}} \cdot m_{\text{см}} \cdot (T_2 - T_1) + W \cdot t_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $c_{\text{см}}$  — удельная теплоемкость смеси, Дж/(кг·°C);  $m_{\text{см}}$  — масса смеси, кг;  $T_2, T_1$  — средняя температура смеси в конце периода и в начале соответственно,  $W$  — мощность теплопотерь при определенной разности температур соответствующего периода, Вт;  $t_{\text{п}}$  — продолжительность периода, с.

Удельная теплоемкость смеси определялась в соответствии с правилом аддитивности по следующей формуле:

$$c_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \left( \frac{m_i}{m_{\text{см}}} \right), \quad (2)$$

где  $n$  — количество компонентов в смеси;  $c_i$  — удельная теплоемкость  $i$ -ого компонента Дж/(кг·°C);  $m_i$  — масса  $i$ -ого компонента, кг.

Затем строилась кумулятивная кривая тепловыделения, по которой определялись продолжительности основных периодов: прединдукционного, индукционного и постиндукционного. Примеры

термометрических кривых, построенных по данным, полученным на экспериментальной установке, приведены на рис. 10.

Общие закономерности процессов твердения выражаются термокинетическими зависимостями скорости  $dQ/d\tau = f(\tau)$ , степени тепловыделения  $Q = f(\tau)$

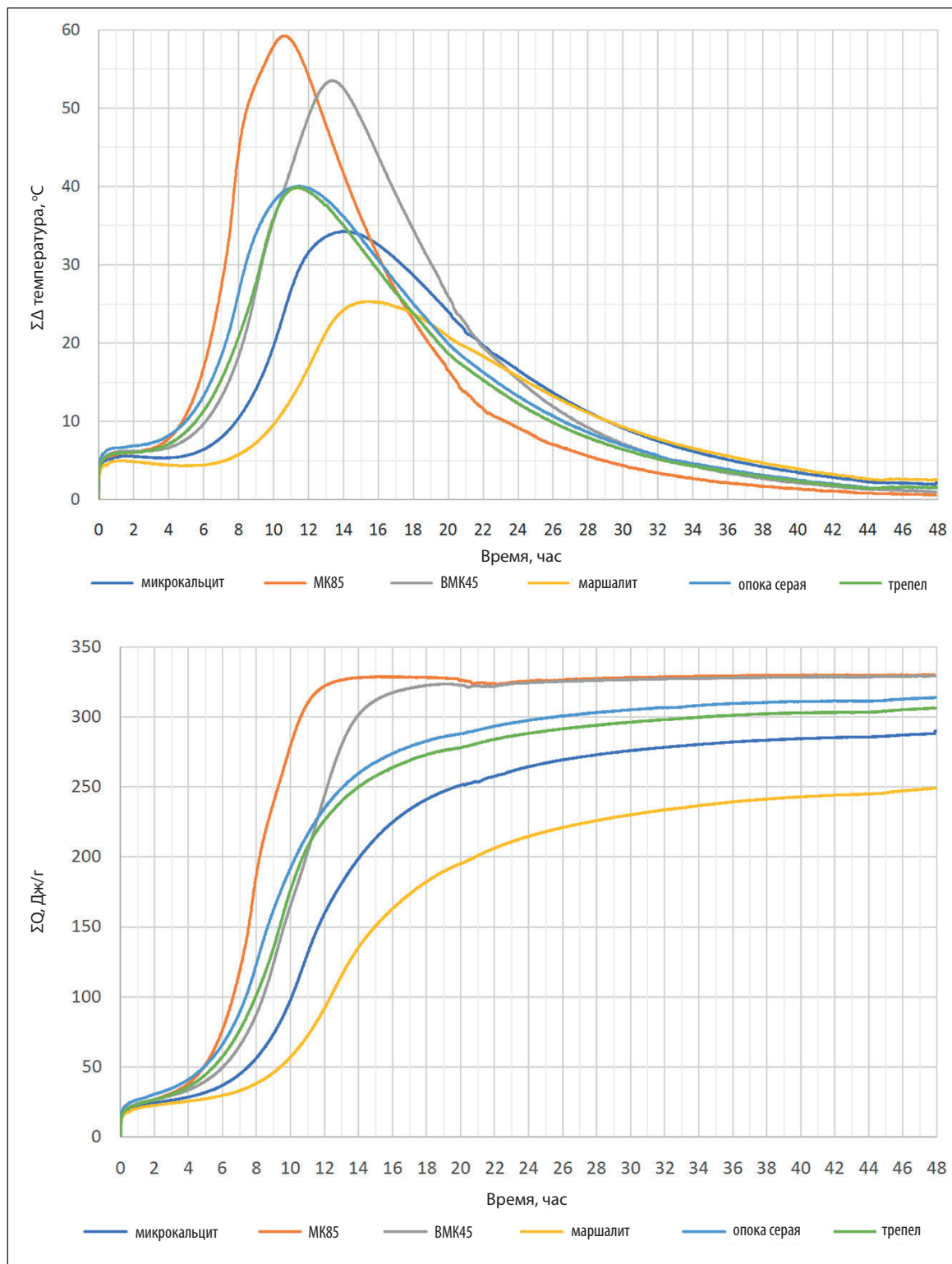


Рис. 10. Термометрические кривые: влияние минеральных добавок на тепловыделение цементного раствора с ГП Sika226p



или гидратации цемента  $\alpha = f(\tau)$  [16, 17]. Кинетика тепловыделения при твердении согласуется с процессом гидратации цемента, обусловленного нуклеацией и последующим ростом гидратных новообразований [18–20]:

$$\alpha = 1 - e^{-kt^n}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – степень гидратации вяжущего;  $t$  – время;  $k$  и  $n$  – постоянные, зависящие от типа цемента и преобладающего механизма реакции.

Расчетные величины тепловыделения исследуемых цементных систем, содержащих различные виды микро- и нанодобавок, приведены на рис. 11.

Влияние суперабсорбирующей добавки на кинетику тепловыделения цементного раствора с гиперпластификатором показано на рис. 12.

Из анализа графиков тепловыделения следует, что пластифицирующая добавка Sika226p растягивает индукционный период на 35%. Добавка САП в дозировке 0,1% от массы цемента не влияет на кинетику тепловыделения исследуемых составов.

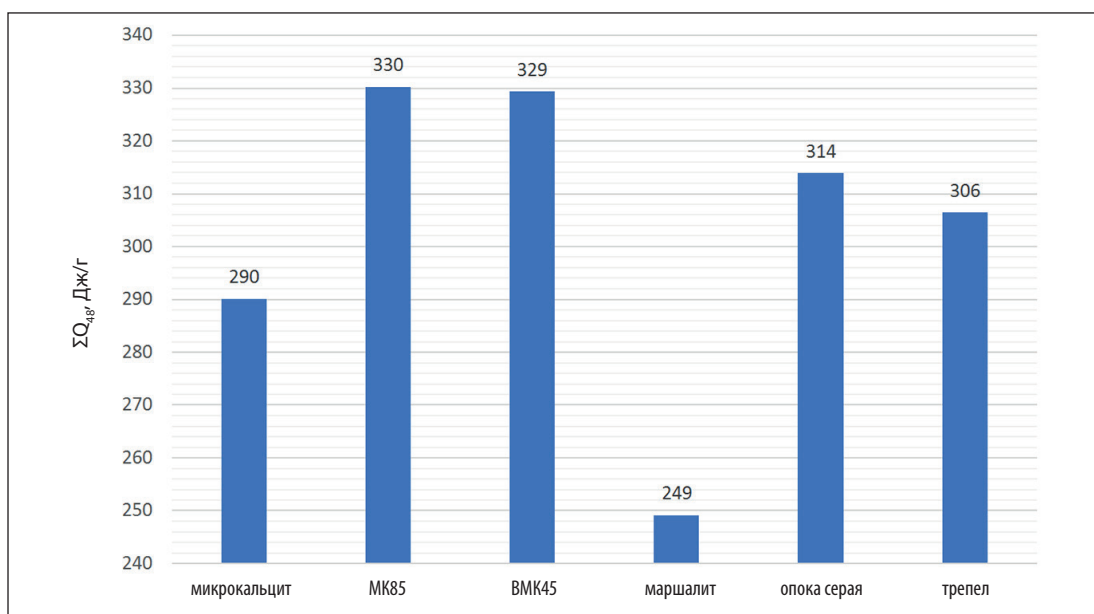


Рис. 11. Общее тепловыделение цементных растворов (48 часов)

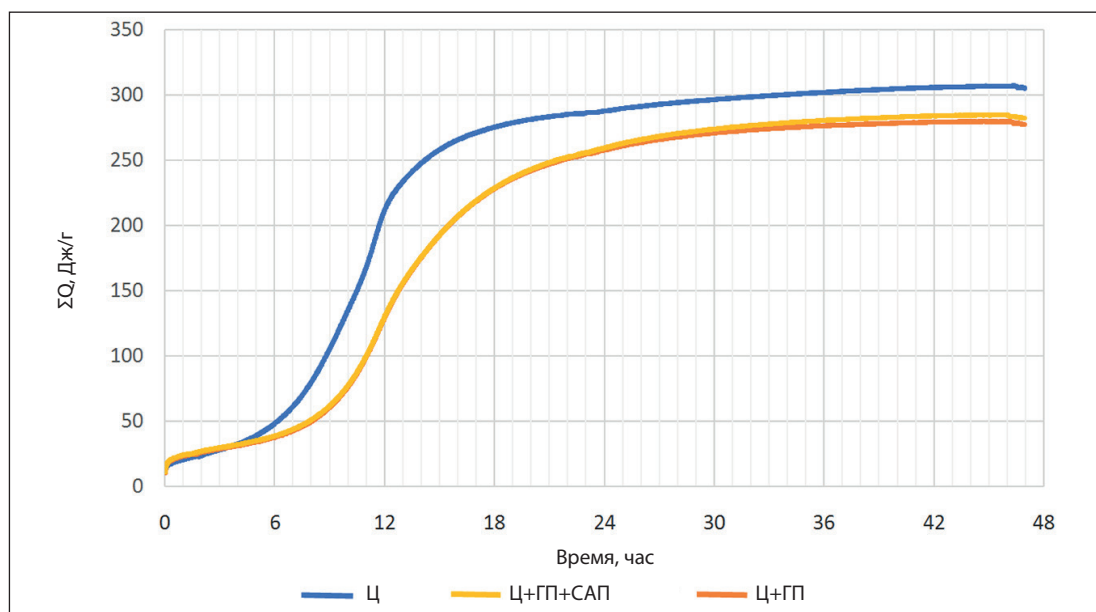


Рис. 12. Кинетика тепловыделения экспериментальных составов

Таким образом, метод калориметрии с использованием усовершенствованных полуадиабатических калориметров обладает достаточной информативностью и точностью для оценки тепловых эффектов, сопровождающих процесс твердения композиционного цементного вяжущего. Анализ тепловых эффектов, сопровождающих процессы гидратации системы «цемент—добавка—вода», показал возможность замены микрокремнезема на метакраолин, а также перспективность его частичного микширования тонкомолотой природной опокой.

## ВЫВОДЫ

Качество ультрадисперсных минеральных добавок определяет их способность химически связывать портландит за счет проявления пуццоланических свойств. Из исследованного ряда высокую пуццолановую активность проявляют микрокремнезем и опока. Термическая активация эффективна в отношении добавок, состоящих из кристаллического кремнезема (маршалит, молотый кварцевый песок): в результате обработки рост показателя составил 25%.

Установлено отсутствие избирательной адсорбции молекул гиперпластификаторов добавками суперабсорбирующего полимера на основе полиакрилата натрия. Из минеральных добавок наибольшую адсорбцию по отношению к гиперпластификаторам проявляют метакраолин и трепел.

Исследование пуццолановой активности, адсорбционной способности и характера кумулятивных кривых тепловыделения показало возможность замены микрокремнезема на метакраолин, а также перспективность его частичного микширования тонкомолотой природной опокой.

Метод калориметрии с использованием полуадиабатических калориметров обладает достаточной информативностью и точностью для оценки эффекта и характера влияния вводимых тонкодисперсных добавок на процесс структурообразования цементного камня. При достаточной чувствительности метод полуадиабатической калориметрии является экспрессным, что предопределяет эффективность его использования на начальных этапах процесса адаптации компонентного состава высокофункциональных бетонов под цели станкостроения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калашников В.И. Бетоны: макро-, нано- и пикомасштабные сырьевые компоненты / В.И. Калашников, Д.А. Абрамов, В.М. Володин // Дороги. 2013. № 33. С. 88–92.
2. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3 (40). С. 24–34.
3. Применение сверхвысокотехнологичного бетона на основе специального вяжущего Nanodur® Compound 5941 [Electronic resource]. URL: <https://www.cpi-worldwide.com/ru/journals/artikel/23781> (accessed: 19.03.2023).
4. Калашников В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 103–106.
5. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41: 113–122.
6. Lin R.-S., Wang X.-Y., Yi-Han. Effects of cement types and addition of quartz and limestone on the normal and carbonation curing of cement paste. *Construction and Building Materials*. 2021; 305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124799>
7. Балыков А.С., Низина Т.А., Володин С.В. Оптимизация технологических параметров получения минеральных добавок на основе прокаленных глин и карбонатных пород для цементных систем // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 2. С. 145–155. — <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-145-155>
8. Justs J., Wyrzykowski M., Bajareb D., Lura P. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 2015; 76: 82–90.
9. Lura P., Durand F., Jensen O.M. Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers. *International RILEM Conference on Vol. Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, RILEM Publications SARL. 2006; 57–65.
10. Попов Д.Ю., Лесовик В.С., Мещерин В.С. Влияние суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку цементного камня // БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 6–11. — <https://doi.org/10.12737/22455>
11. Береговой В.А. Исследование влияния суперабсорбирующих и минеральных добавок на поверхностное натяжение растворов гиперпластификаторов / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, И.С. Шурыгин // Вестник ПГУАС: Строительство, наука и образование. 2022. № 2 (15). — С. 3–8.

12. Иванов И.М. Влияние водоцементного отношения и суперпластификаторов на процессы тепловыделения, гидратации и твердения цемента / И.М. Иванов, Д.В. Матвеев, А.А. Орлов, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 2. С. 42–49.
13. Usharov-Marshak A., Zlatkovskyy O., Ciak M. Estimation of Influence of New Generation Admixtures of Early Hydration of Cements. *Intern. Conf. on Durability of High-Performance Concrete "Conlife"*. Freiburg. 2004; 63–69.
14. Баранник Н.В. Определение тепловыделения бетона при его твердении в изотермических условиях / Н.В. Баранник, С.В. Котов, Е.С. Потапова, С.С. Малахин // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. № 2. С. 44–62.
15. Береговой В.А. Переносной калориметр для решения рецептурных задач в области практического бетоноведения / В.А. Береговой, И. Ю. Лавров, И. С. Шурыгин, М.Г. Махмудов // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2023. № 1. С. 4–8.
16. Костойа, Бишнои Ш., Галлуччи Э., Скривенер К.Л. Синтез и гидратация трехкальциевого силиката // Цемент и его применение. 2010. № 5. С. 18–22
17. Tennis P.D., Jennings H.M. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 2000. Vol. 30(6): 855–863
18. Brown P.W., Pommersheim J., Frohnsdorff G. A kinetic model for the hydration of tricalcium silicate. *Cem. Concr. Res.* 1985; 15(1): 35–41.
19. Bezjak A., Jelenic I. On the determination of rate constants for hydration processes in cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 1980; 10 (4): 553–563.
20. Garrault S., Behr T., Nonat A. Formation of the C-S-H layer during early hydration of tricalcium silicate grains with different sizes. *J. Phys. Chem.* 2006; 110: 270–275.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Береговой Виталий Александрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии строительных материалов и деревообработки» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия, techbeton@pguas.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0501-886X>

**Снадин Евгений Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и архитектура» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия, bexobo123@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5174-9802>

**Иноземцев Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, Москва, Россия, inozemcevas@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7807-688X>

**Пилипенко Антон Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, Москва, Россия, pilipenkoas@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7525-0117>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Береговой В.А.** – постановка задачи и целей исследований, анализ и обработка полученных результатов, написание статьи.

**Снадин Е.В.** – подготовка образцов, подготовка и проведение экспериментальной части исследований, математическая обработка результатов.

**Иноземцев А.С.** – написание статьи, редактирование текста.

**Пилипенко А.С.** – научное редактирование текста, выявление закономерностей.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 13.06.2023; принята к публикации 14.06.2023.