

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2>**ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАФИНА КАК ТЕРМОАККУМУЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА В ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТАХ**

Научная статья

Грачев И.А.^{1,*}, Черкасова Л.А.², Маркин А.В.³, Иноземцев А.С.⁴^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (grachev.ivan2018[at]yandex.ru)

Аннотация

Одним из способов снизить уровень энергопотребления систем отопления и охлаждения в зданиях является использование термоаккумулирующих материалов с функцией фазового перехода (МФФП). Актуальность использования бетона с МФФП подчеркивается мировой тенденцией к стремлению экономии ресурсов. Важнейшей задачей для технологии бетонов с пассивной теплоизоляцией является исследование влияния МФФП на свойства цементной каркасообразующей составляющей. В данной работе представлены результаты исследования влияния органического материала с функцией фазового перехода (парафина) на свойства цементных композиций. Установлено, что использование парафина в качестве МФФП в цементных системах не оказывает статистически значимого влияния на текучесть цементных паст, однако приводит к уменьшению средней плотности цементного камня. Введение МФФП в расплавленном виде вызывает трудности с распределением в объеме, что выражается худшими физико-механическими характеристиками по сравнению с введением в твердом виде. Перспектива использования тепла МФФП как средства для внутреннего ухода за формированием структуры в начальный период вызывает научный интерес и требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: термоаккумулирующий материал, материал с функцией фазового перехода, цементный композит, парафин, энергоэффективность.

PROBLEMS OF USING PARAFFIN AS THERMOACCUMULATING MATERIAL IN CEMENT COMPOSITES

Research article

Grachev I.A.^{1,*}, Cherkasova L.A.², Markin A.V.³, Inozemtcev A.S.⁴^{1, 2, 3, 4} National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (grachev.ivan2018[at]yandex.ru)

Abstract

One of the ways to reduce the energy consumption of heating and cooling systems in buildings is the use of thermoaccumulating materials with phase transition function (MPTF). The relevance of MPTF concrete is emphasised by the global tendency to strive for resource conservation. The most important task for the technology of concrete with passive thermal insulation is to study the influence of MPTFs on the properties of the cement frame-forming component. This work presents the results of the study of the influence of organic material with phase transition function (paraffin) on the properties of cement compositions. It was found that the use of paraffin as MPTF in cement systems does not have a statistically significant effect on the fluidity of cement pastes, but leads to a decrease in the average density of cement stone. Introduction of MPTF in molten form causes difficulties with distribution in volume, which is expressed by worse physical and mechanical characteristics in comparison with introduction in solid form. The prospect of using MPTF heat as a means for internal care of structure formation in the initial period is of scientific interest and requires further research.

Keywords: thermoaccumulating material, material with phase transition function, cement composite, paraffin, energy efficiency.

Введение

Системам отопления и охлаждения помещений, которые потребляют большое количество ресурсов и энергии, всегда уделялось особое внимание. Снизить расход энергии этих систем позволяет использование материалов с функцией фазового перехода (далее – МФФП) [1], [2]. МФФП представляют собой теплоаккумулирующие материалы, способные запастись тепловой энергией во время фазового перехода вещества.

В строительстве могут применяться как органические, так и неорганические [3], [4] МФФП. Среди неорганических материалов с функцией фазового перехода самыми распространенными являются гидратированные соли. Эти вещества обладают высокой теплоаккумулирующей способностью, негорючестью, доступностью в готовом виде, а также относительно невысокой стоимостью. Несмотря на свои преимущества, гидратированные соли достаточно редко применяются в цементных композитах из-за больших деформаций, интенсификации коррозии металлических элементов (арматуры в бетонах), переохлаждения при переходе из твердого состояния в жидкое и нестабильности фазовых переходов при циклическом воздействии.

Органические МФФП подразделяют на парафиновые и непарафиновые [3]. Преимуществами органических МФФП являются относительно низкая стоимость, подходящая температура плавления, аккумуляция скрытого тепла и незначительное изменение объема при фазовом переходе.

Многие материалы с функцией фазового перехода, представляющие собой органические соединения, являются кислотами. Спектр применяемых веществ широк и постоянно расширяется. В числе наиболее распространенных непарафиновых МФФП можно назвать бутилстеарат ($T_{ф.п.} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$), додеканол ($T_{ф.п.} = 24...27\text{ }^{\circ}\text{C}$), полиэтиленгликоль ($T_{ф.п.} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$), тетрадеканол ($T_{ф.п.} = 35...39\text{ }^{\circ}\text{C}$) и диметилсульфоксид ($T_{ф.п.} = 18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) [12]. Парафины занимают особое место среди применяемых органических МФФП в бетоне. Их популярность объясняется неактивностью в щелочной среде, химической стабильностью, относительно невысокой стоимостью (парафин примерно в 3 раза дешевле непарафиновых МФФП) и широким диапазоном температуры плавления. Температура фазового перехода парафина зависит от количества углерода ($T_{ф.п.} = 20...70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Успешное применение парафина в качестве МФФП с температурой фазового перехода от 26 до 70 $^{\circ}\text{C}$ в бетоне было подтверждено экспериментальными исследованиями [13], [14], [15]. Для точного регулирования термоаккумулирующих свойств бетонных конструкций используют комплексные материалы с функцией фазового перехода. Они представляют собой смеси различных веществ с разной температурой и энтальпией плавления и кристаллизации [9].

Введение материалов с функцией фазового перехода в бетоны осуществляется различными методами [16]. Основные способы включают в себя смешивание МФФП с компонентами бетона, насыщение бетона с помощью погружения в раствор МФФП и введение МФФП в составе материала носителя – капсул. Вещество при введении может быть как в виде водной суспензии, так и в твердом виде. Теплофизические и механические свойства бетона напрямую зависят от метода введения МФФП. Среди основных проблем, которые могут проявиться при введении МФФП, выделяют неравномерное распределение материала по объему, снижение прочности, а также ухудшение удобоукладываемости и подвижности бетонных смесей [16], [17], [18].

Использование МФФП в бетонных конструкциях позволяет экономить энергию, затраченную на отопление помещения или кондиционирование воздуха, а также смещать пиковую температуру во времени [5], [6], [7], [8]. Данные свойства конструкций с использованием МФФП дают возможность рассматривать их в качестве пассивной теплоизоляции помещения [6]. Применение бетона с МФФП также может решить существующие проблемы с устройством теплоизоляции в зданиях, построенных с помощью 3D-печати [5], [9]. Актуальность использования бетона с МФФП подчеркивается мировой тенденцией к стремлению экономии ресурсов, оптимизации энергопотребления и снижению уровня загрязненности окружающей среды [10], при этом системы отопления и кондиционирования воздуха потребляют до 40% добываемого топлива [11].

Таким образом, важнейшей задачей для развития получения бетонов с пассивной теплоизоляцией является исследование влияния МФФП на свойства цементной каркасообразующей составляющей, так как от этого зависят качества композита. В настоящей работе выполнено исследование влияние парафинового МФФП различной концентрации на свойства цементного теста и цементного камня. Полученные результаты позволят оценить преимущества и недостатки органического термоаккумулирующего материала при прямом способе введения в цементные композиты и определить направление совершенствования технологии.

Материалы и методы исследования

В данной работе проведено исследование влияния материала с функцией фазового перехода на свойства цементного теста и цементного камня, приготовленного на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н при В/Ц = НГ = 0,3. В качестве МФФП использовался твердый Парафин П2, соответствующий ГОСТ 23683. Парафин вводили на этапе приготовления цементного теста зернами (размером до 1 мм) в твердом виде (Серия 1 – $T = 25,3 \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) и в жидком (Серия 2 – $T = 90 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) состоянии. Содержание варьировалось в диапазоне 0...1 % от массы портландцемента.

Приготовление цементного теста осуществлялось с помощью автоматического растворосмесителя Automix Controls в соответствии с EN 196-3. Изготавливались стандартные образцы-призмы 40×40×160 мм.

Оценка влияния МФФП на цементные композиции выполнялась по диаметру расплыва теста из конуса Хагермана после встряхивания (D_p , мм), средней плотности камня, его прочности на изгиб и на сжатие, определяемых согласно ГОСТ 30744.

Стандартное отклонение при испытании показано в таблице 1.

Таблица 1 - Стандартное отклонение при испытании

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2.1>

Серия	Диаметр расплыва, %	Средняя плотность, %	Прочность, %	
			на изгиб	на сжатие
Серия 1	< 1,3	< 3,8	< 13,6	< 4,4
Серия 2	< 0,9		< 11,5	< 4,0

Результаты и обсуждение

Введение в минеральную систему органического соединения (парафина), отличающегося по природе, влияет на свойства как в жидко-текучем состоянии, так и в затвердевшем. Результаты оценки этого влияния на цементные пасты представлены на рисунке 1.

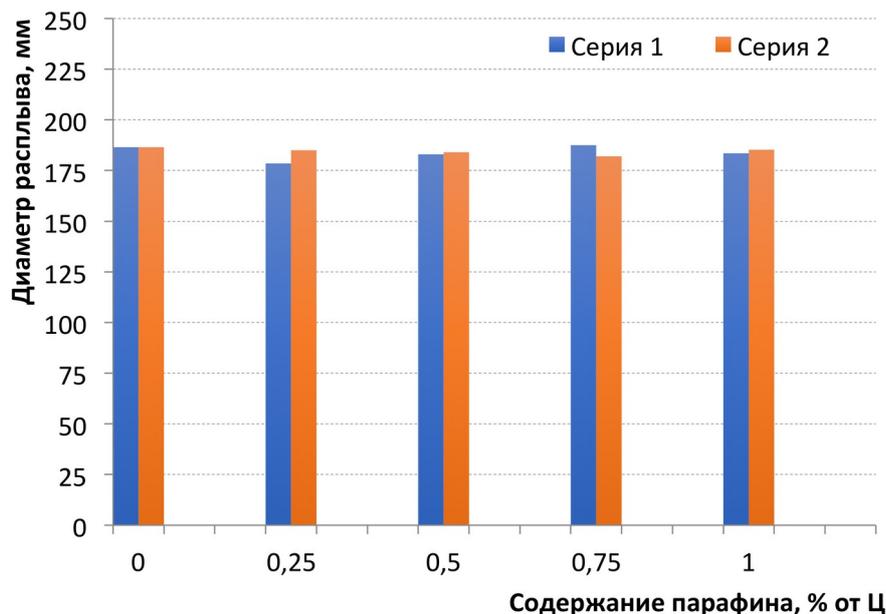


Рисунок 1 - Зависимость диаметра расплава цементного теста от содержания парафина
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2.2>

На графике (см. рисунок 1) видно, что добавленный парафин в растворную смесь не оказывает значительного влияния на его диаметр расплава: значение этого показателя меняется в пределах погрешности, не превышающей 5%, и составляет 178,5...186,5 мм для Серии 1 и 182,0...186,5 мм для Серии 2. Это можно объяснить тем, что парафин является гидрофобным веществом: парафин не смачивается водой и не оказывает сорбирующего действия. То есть парафин независимо от способа введения не вносит значимого влияния в распределении воды в системе и не оказывает существенного влияния на ее текучесть. Таким образом, такая паста способна с одинаковой способностью течь и заполнять форму, что позволяет сделать вывод о влиянии парафина на среднюю плотность цементного камня (рис. 2).

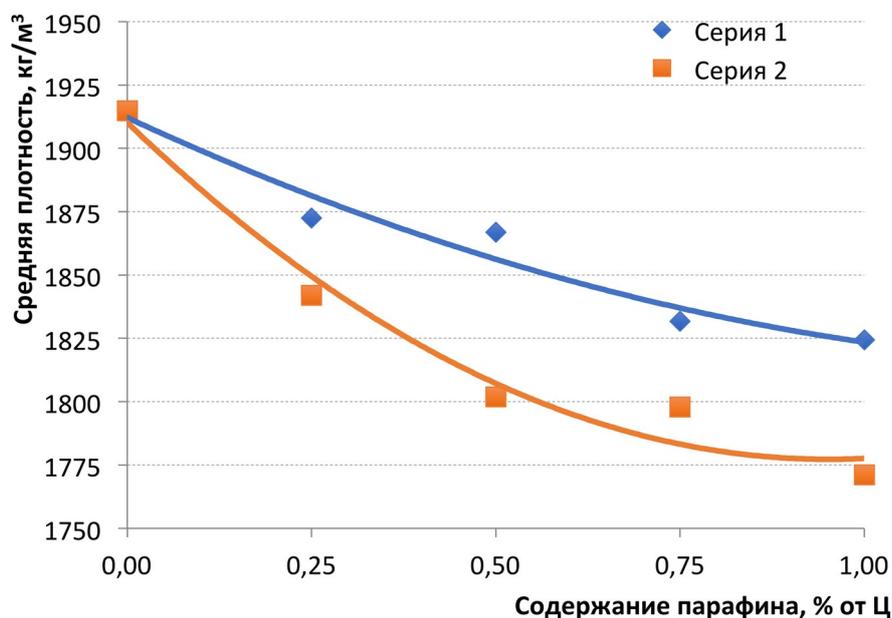


Рисунок 2 - Зависимость средней плотности цементного камня от содержания парафина
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2.3>

Рисунок 2 показывает, что введение парафина приводит к уменьшению средней плотности образцов цементного камня обеих серий. Так, плотность уменьшается на 2,2...4,8% у образцов Серии 1 и на 3,8...7,5% у образцов серии 2 по сравнению с контрольным составом. Учитывая величину стандартного отклонения (4%), снижение средней плотности с 1915 кг/м³ до 1825 кг/м³ и 1770 кг/м³ для Серии 1 и Серии 2 соответственно можно считать значимым. Такой характер влияния объясняется, с одной стороны, плотностью самого парафина, введение большего количества которого закономерно приводит к снижению средней плотности композита. При этом на среднюю плотность

значительнее оказывает влияние парафин Серии 2, то есть вводимый в жидком виде. Это можно объяснить дополнительным воздухововлечением МФФП, разогретого до 90 °С.

Влияние парафина на механические свойства цементного камня представлено на рисунке 3 и 6. На графике зависимости предела прочности на изгиб цементного камня от содержания парафина (см. рисунок 3) видно, что влияние введенного МФФП различно для разных способов его введения.

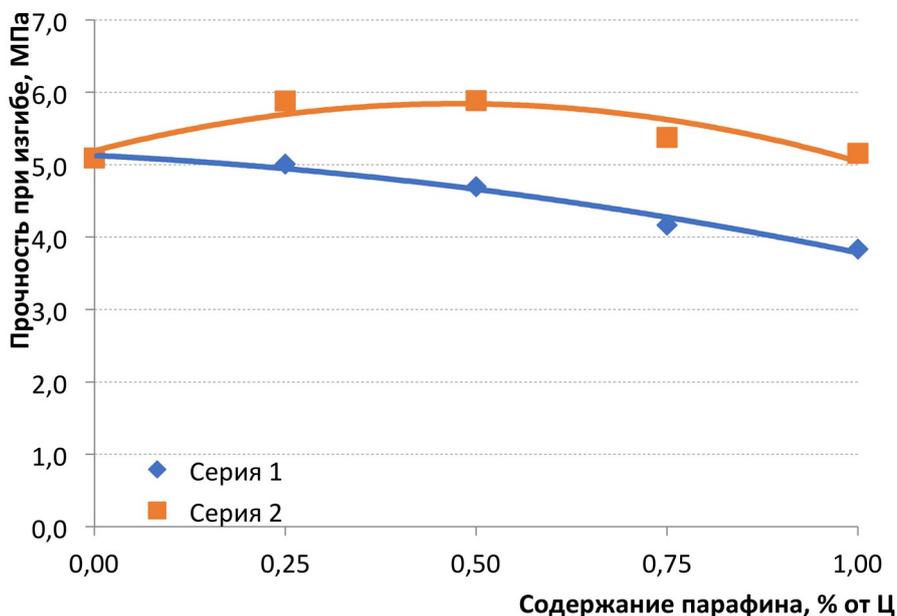


Рисунок 3 - Зависимость предела прочности на изгиб цементного камня от содержания парафина
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2.4>

На рисунке 3 видно, что для Серии 1 увеличение концентрации парафина до 1% приводит к уменьшению прочности на изгиб цементного камня с 5,1 до 3,8 МПа. Такое влияние согласуется с изменением средней плотности цементного камня, представленным на рис. 2. То есть распределение твердого парафина в объеме цементного камня, приводящее к снижению средней плотности, связано с наличием более слабых составных компонентов в структуре. В результате непрочные зерна парафина ослабляют цементный камень, снижая прочность камня до 24,8% по сравнению с контрольным составом. Отметим высокое значение стандартного отклонения, которое составляет менее 15%. Это свидетельствует о неоднородности сформированной структуры (см. рисунок 4, 5), которое наиболее показательно при испытании на изгиб.

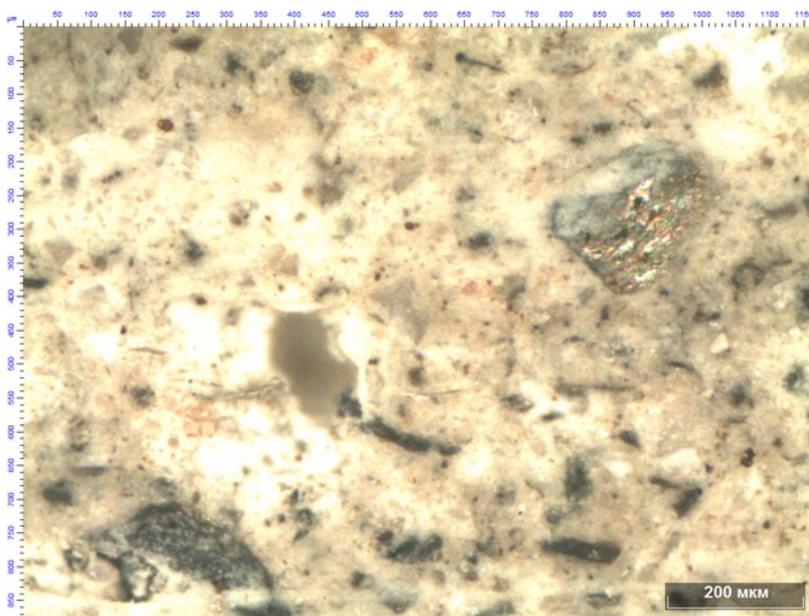


Рисунок 4 - Микрофотографии структуры цементного камня с МФФП (×50) Серии 1
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2.5>

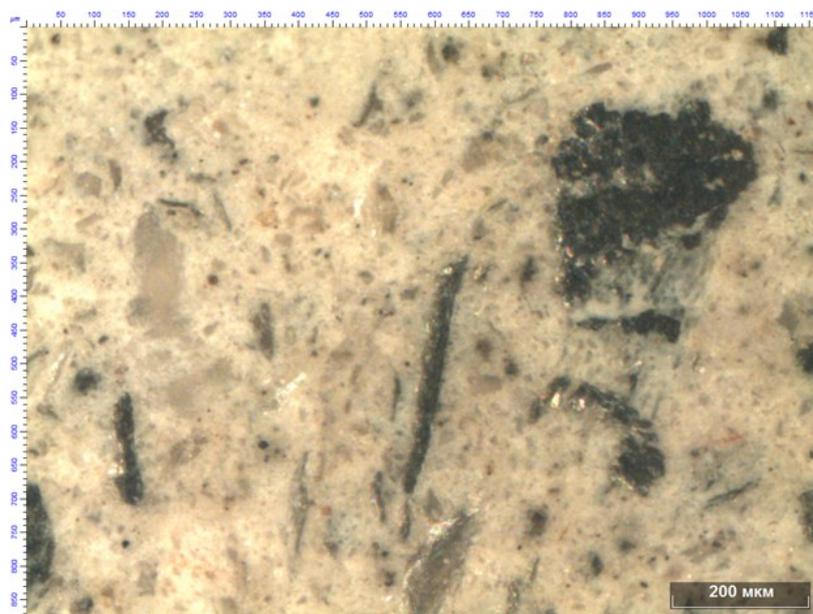


Рисунок 5 - Микрофотографии структуры цементного камня с МФФП (×50) Серии 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2.6>

Для Серии 2 отмечается экстремальная зависимость, характеризующаяся увеличением прочности на 15,6% при содержании МФФП 0,5%. Наибольшее значение прочности при изгибе при этом составляет 5,9 МПа. Дальнейшее увеличение количества парафина до 1% приводит к снижению прочности на изгиб до 5,2 МПа, что на 1,4% больше, чем у контрольного состава. Указанное объясняется неоднородностью распределения парафина, усугубившаяся способом введения. То есть МФФП, добавляемый в жидком виде, претерпевает интенсивное охлаждение при попадании в цементное тесто, не успевая распределиться в процессе перемешивания. В результате увеличивается стандартное отклонение при испытании на изгиб, вызванное формированием больших скоплений парафина. При этом тепло, которое выделяется парафином при остывании, создает локальные участки с интенсивным структурообразованием, что может объяснять увеличение прочности при изгибе. Однако на пределе прочности на сжатии это сказывается в меньшей степени (см. рисунок 6).

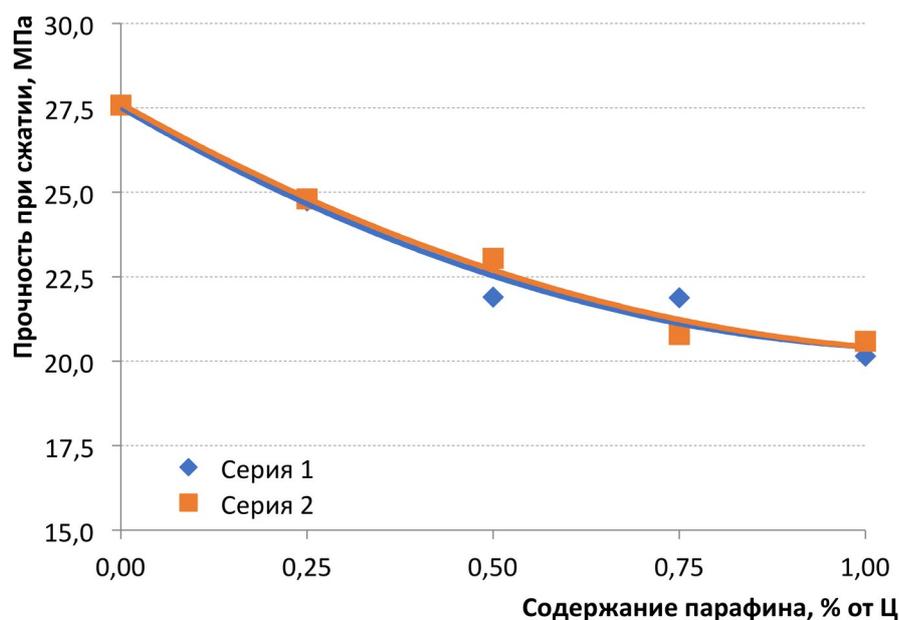


Рисунок 6 - Зависимость предела прочности на сжатие цементного камня от содержания парафина
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.2.7>

Зависимость прочности на сжатие цементного камня от содержания парафина описывается нисходящим графиком (см. рисунок 6), идентичными по характеру изменения для различных способов введения. Прочность на сжатие образцов Серии 1 и Серии 2 уменьшается на 10,3...26,9% и на 10,1...25,3% по сравнению с контрольным составом

соответственно при увеличении содержания парафина на 0,25...1,0%. Видно, что введение парафина, как органического материала, в цементную систему, закономерно снижает ее прочность. При этом негативный эффект является статистически значимым и согласуется с изменением средней плотности. Дополнительным фактором, влияющим на снижение прочности цементного камня, может быть блокирование парафином процесса гидратации вяжущего за счет формирования органической пленки на поверхности частиц портландцемента. Однако доказательство этого тезиса требует дополнительных исследований. При этом перспективой развития темы использования МФФП в цементных системах является разработка альтернативных способов их введения.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают, что использование парафина в качестве термоаккумулирующего материала в цементных системах не оказывает статистически значимого влияния на текучесть цементных паст, что может быть связано с его гидрофобностью. Введение парафина приводит к уменьшению средней плотности цементного камня. При этом, введение МФФП в расплавленном виде, усиливает негативный эффект за счет повышения неоднородности структуры.

Введение органического термоаккумулирующего материала в расплавленном виде вызывает большие трудности с распределением в объеме, что выражается худшими физико-механическими характеристиками по сравнению с введением МФФП в твердом виде. Однако температура введения парафина может оказывать положительное влияние на структурообразование цементного камня при условии обеспечения однородности. Перспектива использования тепла МФФП как средства для внутреннего ухода за формированием структуры в начальный период вызывает научный интерес и требует дальнейших исследований, направленных, в том числе, на уменьшение негативного воздействия на физико-механические свойства цементного камня.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность Рахматуллиной Эльвине Ринатовне за помощь в подготовке образцов для испытаний.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The team of authors expresses gratitude to Rakhmatullina Elvina Rinatovna for her assistance in preparation of samples for testing.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Liu X. Study on thermal storage effectiveness of a novel PCM concrete applied in buildings located at four cities / X. Liu, Y. Yang, Zh. Sheng [et al.] // *Renewable Energy*. — 2023. — № 218. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.119262.
2. Erdogmus E. Thermal performance analysis of novel foam concrete composites with PCM for energy storage and environmental benefits in buildings / E. Erdogmus, A. Yaras, A. Ustaoglu [et al.] // *Energy and Buildings*. — 2023. — № 296. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113413.
3. Hunger M. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials / M. Hunger, A.G. Entrop, I. Mandilaras [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. — 2009. — № 30. — P. 731–743. — DOI: 10.1016/j.cemconcom.2009.08.002.
4. Shanmuganathan M. Improving the cooling performance of the straight finned heat sink (SHS) for computer processor using an inorganic PCM / M. Shanmuganathan, K.S. Sandeep, P.C. Hosanna [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. — 2022. — № 69. — P. 749–753. — DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.156.
5. Mu'ath I.A.Q. Use of 3D printed concrete components for thermal energy storage / I.A.Q. Mu'ath, Y. Emad, W. Xingjian [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2024. — № 411. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134240.
6. Aghoei M.M. Phase Change Materials (PCM) as a Passive System in the Opaque Building Envelope: A Simulation-Based Analysis / M.M. Aghoei, A. Astanbous, R.Y. Khaksar [et al.] // *Journal of Energy Storage*. — 2024. — № 101. — DOI: 10.1016/j.est.2024.113625.
7. Ismail K. PCM thermal insulation in buildings / K. Ismail, J. Castro // *International Journal of Energy Research*. — 1997. — № 21. — P. 1281–1296.
8. Thiele A. Annual energy analysis of concrete containing phase change materials for building envelopes / A. Thiele, A. Jamet, G. Sant [et al.] // *Energy Conversion and Management*. — 2015. — № 103. — P. 374–386. — DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.068.
9. Сокольникова С.Р. Выбор термоаккумулирующего материала для разработки «умных чернил» для 3D-печати в строительстве / С.Р. Сокольникова, А.С. Иноземцев // *Строительство: наука и образование*. — 2024. — № 14 (1). — С. 123–134. — DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.8.
10. Гуцин С.В. Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий / С.В. Гуцин, А.С. Семенов, С. Shen // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. — 2020. — № 5. — С. 31–43. — DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-31-43.
11. Sumeru K. Energy Savings in Air Conditioning System Using Ejector: An Overview / K. Sumeru, L. Martin, F. Ani [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014. — № 493. — P. 93–98. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.493.93.

12. Zhang D. Development of thermal energy storage concrete / D. Zhang, Z. Li, J. Zhou [et al.] // *Cement and Concrete Research*. — 2004. — № 34. — P. 927–934. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.10.022.
13. Ling T.-C. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview / T.-C. Ling, C.-S. Poon // *Construction and Building Materials*. — 2013. — № 46. — P. 55–62. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031.
14. Khanna S. Ultra-stable silica/exfoliated graphite encapsulated n-hexacosane phase change nanocomposite: A promising material for thermal energy storage applications / S. Khanna, S. Paneliya, P. Prajapati [et al.] // *Energy*. — 2022. — № 250. — DOI: 10.1016/j.energy.2022.123729.
15. Baetens R. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review / R. Baetens, B. Jelle, A. Gustavsen // *Energy and Buildings*. — 2010. — № 42. — P. 1361–1368. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
16. Hongzhi C. Thermal-mechanical behaviors of concrete with innovative salt hydrate PCM-based thermal energy storage aggregate / C. Hongzhi, Z. Yang, Y. Haibin [et al.] // *Energy Conversion and Management*. — 2023. — № 293. — DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117477.
17. Zhiyou J. Study on phase change materials integration in concrete: Form-stable PCM and direct addition / J. Zhiyou, C. Sandra, A. Jose // *Process Safety and Environmental Protection*. — 2024. — № 189. — P. 1293–1302. — DOI: 10.1016/j.pseC.2024.07.012.
18. Грачев И.А. Проблемы и перспективы применения материалов с функцией фазового перехода в бетонах / И.А. Грачев, Э.Р. Рахматулина, А.В. Маркин // *Дни студенческой науки : Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института промышленного и гражданского строительства*. — Москва: Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет), 2024. — С. 440–442.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Liu X. Study on thermal storage effectiveness of a novel PCM concrete applied in buildings located at four cities / X. Liu, Y. Yang, Zh. Sheng [et al.] // *Renewable Energy*. — 2023. — № 218. — DOI: 10.1016/j.renene.2023.119262.
2. Erdogmus E. Thermal performance analysis of novel foam concrete composites with PCM for energy storage and environmental benefits in buildings / E. Erdogmus, A. Yaras, A. Ustaoglu [et al.] // *Energy and Buildings*. — 2023. — № 296. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113413.
3. Hunger M. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials / M. Hunger, A.G. Entrop, I. Mandilaras [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. — 2009. — № 30. — P. 731–743. — DOI: 10.1016/j.cemconcomC.2009.08.002.
4. Shanmuganathan M. Improving the cooling performance of the straight finned heat sink (SHS) for computer processor using an inorganic PCM / M. Shanmuganathan, K.S. Sandeep, P.C. Hosanna [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. — 2022. — № 69. — P. 749–753. — DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.156.
5. Mu'ath I.A.Q. Use of 3D printed concrete components for thermal energy storage / I.A.Q. Mu'ath, Y. Emad, W. Xingjian [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2024. — № 411. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134240.
6. Aghoei M.M. Phase Change Materials (PCM) as a Passive System in the Opaque Building Envelope: A Simulation-Based Analysis / M.M. Aghoei, A. Astanbous, R.Y. Khaksar [et al.] // *Journal of Energy Storage*. — 2024. — № 101. — DOI: 10.1016/j.est.2024.113625.
7. Ismail K. PCM thermal insulation in buildings / K. Ismail, J. Castro // *International Journal of Energy Research*. — 1997. — № 21. — P. 1281–1296.
8. Thiele A. Annual energy analysis of concrete containing phase change materials for building envelopes / A. Thiele, A. Jamet, G. Sant [et al.] // *Energy Conversion and Management*. — 2015. — № 103. — P. 374–386. — DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.068.
9. Sokol'nikova S.R. Vybór termoakkumulirujuschego materiala dlja razrabotki «umnyh chernil» dlja 3D-pechati v stroitel'stve [Selection of thermal accumulative material to develop “smart ink” for 3D printing in the construction industry] / S.R. Sokol'nikova, A.S. Inozemtsev // *Construction: Science and Education*. — 2024. — № 14 (1). — P. 123–134. — DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.8. [in Russian]
10. Guschin S.V. Mirovye tendentsii razvitiya energosberegajuschih tehnologij [Global trends in the development of energy-saving technologies] / S.V. Guschin, A.S. Seminenko, C. Shen // *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. — 2020. — № 5. — P. 31–43. — DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-31-43. [in Russian]
11. Sumeru K. Energy Savings in Air Conditioning System Using Ejector: An Overview / K. Sumeru, L. Martin, F. Ani [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014. — № 493. — P. 93–98. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.493.93.
12. Zhang D. Development of thermal energy storage concrete / D. Zhang, Z. Li, J. Zhou [et al.] // *Cement and Concrete Research*. — 2004. — № 34. — P. 927–934. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.10.022.
13. Ling T.-C. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview / T.-C. Ling, C.-S. Poon // *Construction and Building Materials*. — 2013. — № 46. — P. 55–62. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031.
14. Khanna S. Ultra-stable silica/exfoliated graphite encapsulated n-hexacosane phase change nanocomposite: A promising material for thermal energy storage applications / S. Khanna, S. Paneliya, P. Prajapati [et al.] // *Energy*. — 2022. — № 250. — DOI: 10.1016/j.energy.2022.123729.
15. Baetens R. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review / R. Baetens, B. Jelle, A. Gustavsen // *Energy and Buildings*. — 2010. — № 42. — P. 1361–1368. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
16. Hongzhi C. Thermal-mechanical behaviors of concrete with innovative salt hydrate PCM-based thermal energy storage aggregate / C. Hongzhi, Z. Yang, Y. Haibin [et al.] // *Energy Conversion and Management*. — 2023. — № 293. — DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117477.

17. Zhiyou J. Study on phase change materials integration in concrete: Form-stable PCM and direct addition / J. Zhiyou, C. Sandra, A. Jose // *Process Safety and Environmental Protection*. — 2024. — № 189. — P. 1293–1302. — DOI: 10.1016/j.pseC.2024.07.012.

18. Grachev I.A. Problemy i perspektivy primeneniya materialov s funktsiej fazovogo perehoda v betonah [Problems and prospects of using phase-change materials] / I.A. Grachev, E.R. Rahmatullina, A.V. Markin // *Days of Student Science : A collection of reports of a Scientific and Technical Conference based on the results of research works by students of the Institute of Industrial and Civil Engineering*. — Moscow: Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 2024. — P. 440–442. [in Russian]