06

Малослойный графен как добавка при создании композитов на основе мелкозернистого бетона

© Т.А. Коряковцева,[1] А.Е. Донцова,[1] А.А. Возняковский,[2] Е.И. Калашникова[2]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
194064 Санкт-Петербург, Россия
[2]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: tamusorina@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2025 г.
В окончательной редакции 16 мая 2025 г.
Принято к публикации 2 сентября 2025 г.

Исследование посвящено первичным оценкам возможности применения малослойного графена, синтезированного в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в качестве добавки к мелкозернистому бетону с целью улучшения теплоизолирующих свойств получаемого композита. Введение графеновой добавки повысило жесткость и снизило растекаемость бетонной смеси. По результатам испытаний и сравнения экспериментальных образцов с контрольными сериями без добавок было выявлено, что добавка малослойного графена в объеме 5 vol.% позволяет снизить коэффициент теплопроводности на 46.3 %, что позволяет повысить теплоаккумулирующую способность данного материала в 2 раза по сравнению с исходным образцом без ухудшения комплекса прочностных свойств.

Ключевые слова: строительные материалы, мелкозернистый бетон, графен, малослойный графен, трехточечный изгиб, изгиб, сжатие, теплопроводность.

DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62286.40-25

Введение

Бетон является одним из наиболее массовых современных строительных материалов. Однако современная строительная отрасль требует все новых, более совершенных, марок бетона. Для решения данной задачи исследователи активно используют принцип композиционных материалов. Сочетая свойства исходной матрицы (бетона) и различных наполнителей (например, микрокремнезем [1], аэрогель [2], кремний и глина в нанофракциях [3] и т.д.) исследователям удается значительно улучшать различные свойства бетонов: повысить механическую прочность, снизить хрупкость, повысить морозостойкость, уменьшить водопроницаемость или улучшить теплозащитные свойства конечного композита [4,5].

Одним из наиболее перспективных классов наполнителей при создании композитов на основе бетона являются графеновые наноструктуры (ГНС). Интерес к ГНС обусловлен их рекордными характеристиками. Например, модуль Юнга графена может достигать до 1 TPa [6], а его теплопроводность до 5000 W/(m·K) [7]. За счет таких свойств, добавление даже небольших объемов ГНС должно приводить к существенному росту свойств конечных композитов.

Так, в работе [8] было продемонстрировано, что добавка 0.0208 % графена в цемент повышает прочность цементного камня на 12 %. Но даже в случае этих, более простых по сравнению с бетоном, материалов существует множество проблем, требующих решения.

Одна из важных задач при введении добавки в смесь — обеспечение равномерного распределения наноматериала в цементной матрице [9]. Так, в работах [4,10] для достижения этой цели предлагается применение водно-диспергированного графена, растворенного в воде для затворения бетонной смеси. В работе [11] также была использована водная суспензия графена для изготовления бетона на крупном заполнителе. К применению в качестве добавки рассматриваются различные формы графена, например, оксид графена [12], графеновые нанопластинки [13], функционализованный графен [14]. Подбор оптимальной пропорции для добавления графена в бетон также является сложной задачей, стоящей перед исследователями. Одним из способов ее решения является создание базы экспериментальных данных с результатами испытаний бетона с добавкой графена, введенной в различных объемах и пропорциях в бетонную смесь. Подобные эксперименты были проведены в работах [10,15–19]. Наилучшие приращения механической прочности мелкозернистого бетона в работе [15] были получены при введении 0.03 % и 0.09 % оксида графена от массы цемента в совокупности с 5 % или 9 % микрокремнезема. В работе [11] наилучший результат показали составы, содержащие 0.07 % графена. Широкий обзор исследований изменений свойств бетона при введении графена представлен в [12,20]. В работе [21] проведена оценка совместного влияния оксида графена и стальной фибры на результирующую прочность бетона, а также была показана возможность сов-

мещения графена с иными, уже известными добавками к бетону. В целом, можно заключить, что, хотя графен и является дорогостоящей добавкой на сегодняшний день, введение его в бетонную смесь в различных формах оказывает положительное влияние на конечные свойства бетонного композита. Более того, возможность введения в бетон графена открывает перспективу создания бетона со встроенной функцией мониторинга технического состояния [22]. На сегодняшний день существует также ряд не изученных вопросов касаемо графеносодержащего бетона, а именно долгосрочное влияние добавки на бетон, характер взаимодействия между частицами графена и цементом в смеси, оптимальный объем вводимой добавки и перспективы применения графеносодержащего бетона в промышленных масштабах [23].

Однако несмотря на то, что использование ГНС позволяет значительно повышать наиболее важные с эксплуатационной точки зрения свойства бетонов, их применение на практике до сих пор не произошло по ряду причин. Ключевой причиной неиспользования ГНС в реальной промышленности является несовершенство методик их синтеза, как по подходу „сверху-вниз“ [24], так и по подходу „снизу-вверх“ [25], которые не позволяют синтезировать большие объемы материала высокого качества с приемлемой себестоимостью.

В предыдущих работах нами была разработана новая методика синтеза малослойного графена (МГ, не более 5 слоев [ISO/TS 21356-1:2021]) в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), которая позволяет синтезировать большие объемы материала с низкой себестоимостью [26], не содержащего дефекты Стоуна–Уэльса [27]. Было установлено, что синтезированный МГ позволят значительно повышать комплекс прочностных и теплофизических свойств полимерных композитов на основе фотополимерных смол [28].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эффективности МГ, синтезированного в условиях СВС в качестве добавки для повышения теплоаккумулирующей способности композитов на основе мелкозернистых бетонов.

1. Материалы и методы

1.1. Синтез композиционных материалов на основе мелкозернистого бетона

Основу для приготовления композитов составлял мелкозернистый бетон. В качестве заполнителя использовался кварцевый песок фракции 0 – 0.63 mm.

В качестве модифицирующей добавки использовался МГ (не более 5 слоев в соответствии с международным стандартом [29]), синтезированный в условиях СВС из целлюлозы микрокристаллической (ч. д. а., Индия). Подробная методика синтеза и характеристики материала приведены в [30]. Суть разработанной методики заключается в формировании графеновых плоскостей из углеродных остовов, источником которых служат молекулы различных биополимеров (в данном случае целлюлозы микрокристаллической), под воздействием высокотемпературной волны СВС [26].

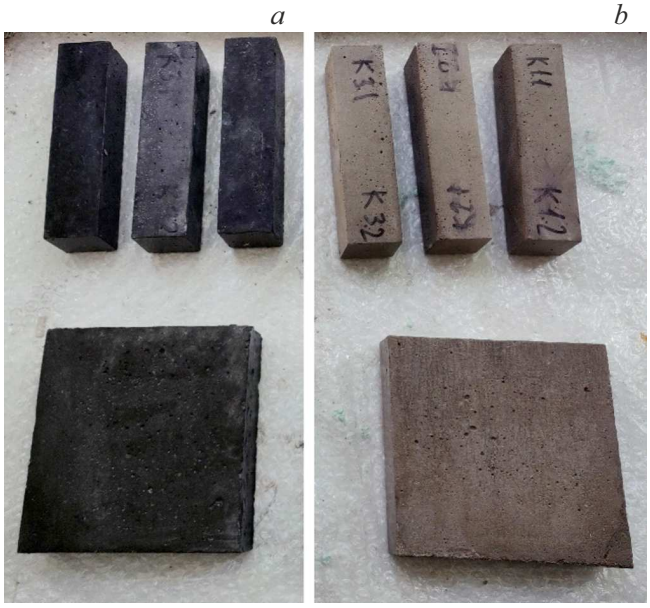

Рис. 1. Внешний вид образцов композитов на основе мелкозернистого бетона с 5 vol.% МГ (*a*) и контрольных (*b*) для испытаний на трехточечный изгиб (балочки) и для измерения коэффициента теплопроводности (плитки).

Создание образцов происходило путем поочередного добавления компонентов в миксер. Сначала смешивались все сыпучие компоненты: цемент, песок и добавка, далее постепенно добавлялась вода с пластификатором. Формы, заполненные смесью, подвергались вибрированию на вибростоле в течение 120 s для устранения воздушных пузырьков из смеси. После бетонирования образцы хранились во влажной среде в течение 28 дней для набора прочности. Образцы испытывались в возрасте 28 дней.

Из каждого вида смеси было изготовлено по 3 образца балочек габаритами $160 \times 40 \times 40$ mm для испытания на прочность на трехточечный изгиб и на сжатие, а также образцы с габаритами $15 \times 15 \times 3.5$ cm для измерений теплопроводности. Водоцементное отношение оставалось постоянным для всех образцов. Состав контрольного образца из мелкозернистого бетона и композитов на его основе приведены в табл. 1.

Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

1.2. Методы

Для определения средних линейных размеров частиц МГ использовался метод лазерной дифракции (Mastersizer 2000, Malverin, Великобритания). Для измерения дисперсности частиц были приготовлены водные суспензии МГ (концентрация 0.1 mass %) с помощью обработки в ультразвуковой ванне (частота 22 kHz).

Таблица 1. Состав 11 бетонной смеси

Вид смеси	Портландцемент М400, g	Кварцевый песок 0 – 0.63 mm, g	Пластификатор, g	Вода, g	Добавка, g
Контрольная	687.0 ± 0.2	1253.0 ± 0.2	7.00 ± 0.1	253.0 ± 0.1	0
МГ (5 vol. %) (G1–G3)	652.6 ± 0.2	1190.3 ± 0.2	6.65 ± 0.1	240.4 ± 0.1	51.2 ± 0.1
МГ (10 vol. %) (G4–G6)	618.2 ± 0.2	1127.6 ± 0.2	6.50 ± 0.1	227.7 ± 0.1	102.4 ± 0.1

Удельная поверхность и пористость МГ измерялись методом низкотемпературной сорбции азота с использованием метода Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) и метода статистической толщины (statistical thickness method – STSA) на приборе Сорби-МС (Россия). Перед измерением образец подвергался пробоподготовке путем отжига в вакууме при температуре 250° в течение 2 h.

Испытания бетонных образцов проводились на следующих установках: испытательная машина МИИ-100 (СССР) для испытания образцов на трехточечный изгиб, гидравлический пресс на 50 тонн (СССР) для испытаний на сжатие.

Твердость по Бринеллю синтезированных образцов измерялась на твердомере Бринелля ИТБ-3000-АМ (Россия). Диаметр отпечатка определялся с помощью цифровой камеры и специализированного ПО от производителя.

Коэффициент теплопроводности и термическое сопротивление образцов измерялись методом стационарного теплового потока на приборе ИТС-1 (Россия). Предел допускаемой относительной погрешности прибора ИТС-1 составляет 5 %.

2. Результаты и обсуждение

Изображение частиц МГ, полученное с помощью электронного микроскопа, представлено на рис. 2.

Как видно на рис. 2, в порошке частицы МГ существуют в виде агрегатов, размер которых может достигать до нескольких десятков микрон. Для оценки истинного линейного размера были проведены исследования дисперсности методом лазерной дифракции, представленные на рис. 3.

Как видно на рис. 3, несмотря на то, что в образце присутствуют частицы МГ, линейные размеры которых достигают десятков и сотен микрон (рис. 3, *a*), доля таких мала, и большая часть частиц МГ ($\sim 50\,\%$) имеет линейные размеры в пределах $1.2 - 1.4\,\mu$m.

В табл. 2 представлены результаты измерения удельной поверхности частиц МГ.

Удельная поверхность МГ, определенная методом STSA, относительно невелика, и составила $86\,\mathrm{m}^2/\mathrm{g}$. Однако полная удельная поверхность образца значительно больше и составляет $320\,\mathrm{m}^2/\mathrm{g}$ за счет парциального вклада микропор, объем которых был оценен с использованием метода БЭТ.

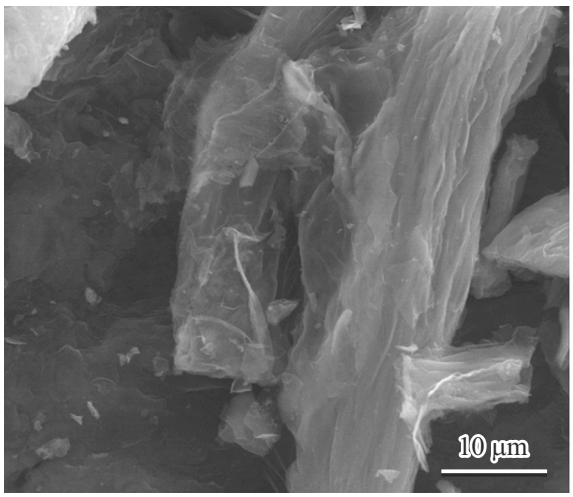

Рис. 2. Электронное изображение частиц МГ.

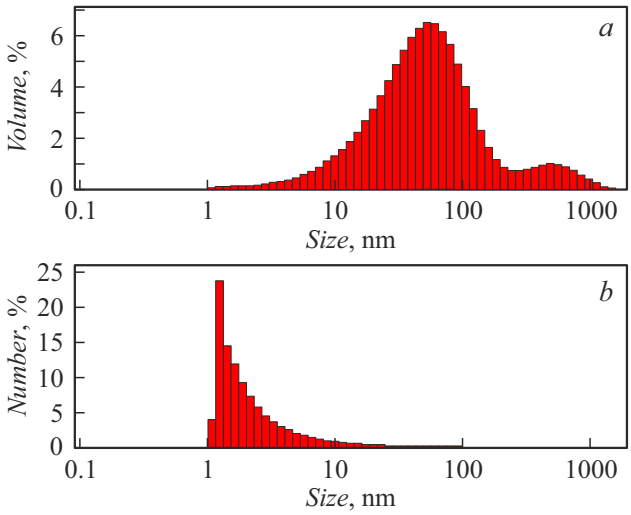

Рис. 3. Результаты измерения частиц МГ: *a* — распределение объема частиц МГ по размерам; *b* — распределение количества частиц МГ по размерам.

Добавка МГ в бетонную смесь повысила жесткость смеси, снизила ее растекаемость. Бетонная смесь с

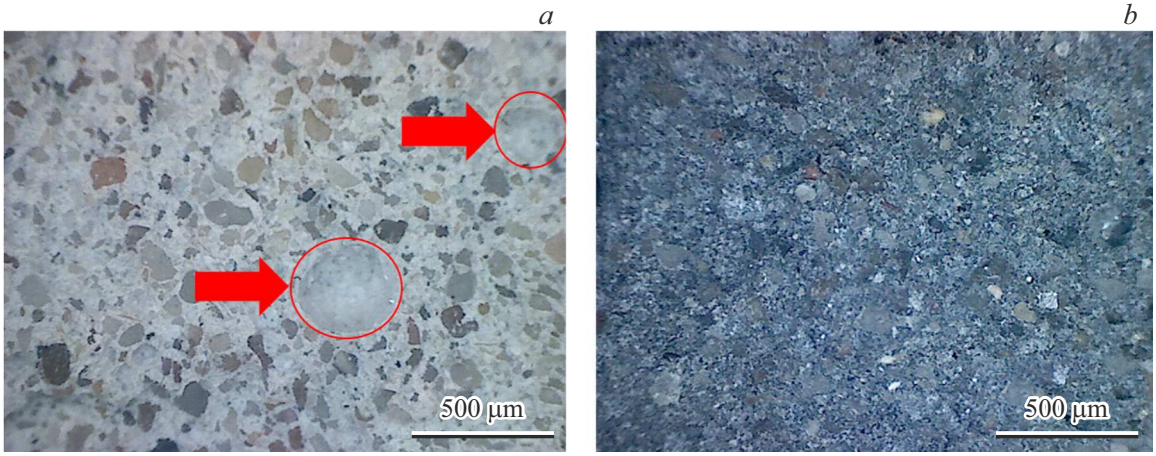

Рис. 4. Сколы из исходного бетона (*a*) и с 10 vol. % МГ (*b*). Красными стрелками указаны пустоты.

Таблица 2. Результаты исследования удельной поверхности и пористости МГ

Удельная поверхность по методу STSA, m^2/g	Удельная поверхность по методу БЭТ, m^2/g	Объем пор, cm^3/g	Объем микропор, cm^3/g
86 ± 4	320 ± 4	0.190 ± 0.005	0.107 ± 0.003

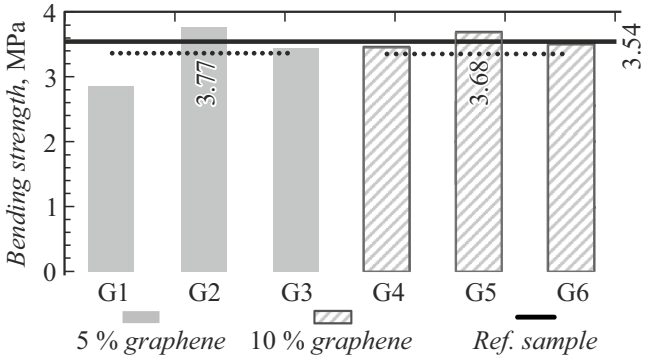

Рис. 5. Результаты измерений прочности на трехточечный изгиб образцов композита в зависимости от концентрации МГ.

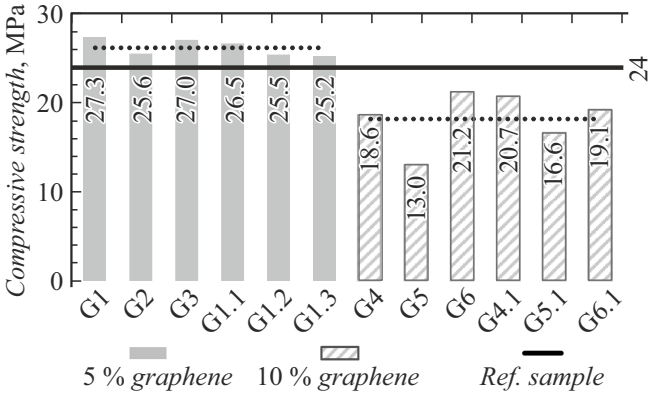

Рис. 6. Результаты измерений прочности на сжатие образцов композита в зависимости от концентрации МГ.

добавкой МГ была наименее удобоукладываемой из всех смесей, обладала низкой текучестью. Подобные эффекты при добавке графена в бетонную смесь были отмечены и другими исследователями [12]. На рис. 4 представлены изображения сколов образцов исходного бетона и с добавлением МГ.

Как видно на рис. 4, *a*, на сколе исходного образа бетона присутствуют каверны с размерами $100 - 200\,\mu$m, в то время в образце с МГ такие каверны отсутствуют.

Прочностные свойства бетонов являются определяющими при их практическом использовании. На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений прочности на трехточечный изгиб и на сжатие соответственно.

Как видно из рис. 5, введение МГ не приводит к значительному изменению (изменение в пределах погрешности метода) прочности на изгиб. Однако при 10 vol. % МГ происходит падение прочности на сжатие на 18 % по сравнению с контрольным образцом (рис. 6).

На рис. 7 представлены результаты измерения твердости синтезированных образцов.

Как видно на рис. 7, в отличие от прочности на сжатие и прочности на трехточечный изгиб, введение 5 vol. % МГ позволило повысить твердость композита на 44 %. Однако дальнейшее увеличение концентрации МГ (до 10 vol. %) не привело к дальнейшему росту твердости.

Резюмируя данные по прочностным свойствам образцов исходного бетона и композитов с МГ с данными по исследованию их сколов, можно выдвинуть предположение, что при добавлении МГ происходит снижение

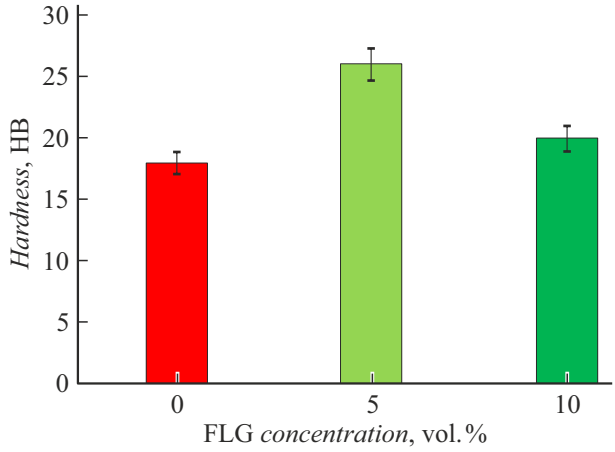

Рис. 7. Результаты измерений твердости по Бринеллю образцов композита в зависимости от концентрации МГ.

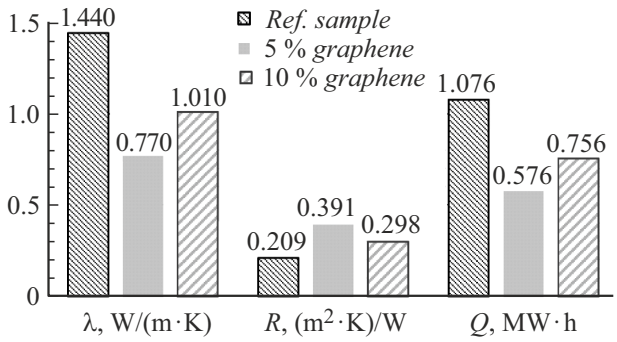

Рис. 8. Результаты измерения теплофизических свойств образцов в зависимости от концентрации МГ.

концентрации структурных дефектов в композите (поры, каверны и т. д.), что и обусловливает рост прочностных свойств.

На рис. 8 представлены результаты измерения теплопроводности и термического сопротивления синтезированных образцов при 25 °C.

Как видно на рис. 8, введение 5 vol. % МГ приводит к снижению теплопроводности примерно в 2 раза по сравнению с контрольным образцом. Однако при увеличении доли МГ до 10 % разрыв в теплопроводности по сравнению с контрольным образцом снижается и составляет уже 30 %.

Для интерпретации полученных результатов были проведены расчеты по нескольким математическим моделям.

Существует ряд моделей для прогнозирования проводимости композитов, основанных на значении свойств наночастиц (NPS) и базового компонента, что позволяет учитывать их долю в составе [31].

Модель Максвелла [32], представленная уравнением (1), является эмпирической и отличается хорошей точностью и простотой для сферических частиц при низких концентрациях. Будучи одной из первых в своем роде, она широко используется как основа для других моделей, в которых добавляются дополнительные параметры или корректировки.

$$KnfMaxwell = Kbf\left(\frac{Knp + 2Kbf + 2\varphi(Knp - Kbf)}{Knp + 2Kbf - 2\varphi(Knp - Kbf)}\right). \quad (1)$$

В этом уравнении, а также в следующих уравнениях, Knf — соответствует теплопроводности композита, Knp — теплопроводности NPs, Kbf — теплопроводности базового компонента (цемента), φ — концентрация NPs. Представленное Гамильтоном и Кроссером [33] уравнение (2) основано на том же принципе, однако оно также учитывает параметр, относящийся к форме частицы. Таким образом, коэффициент формы n определяется с учетом сферичности частицы таким образом, как показано в уравнении (3), сферичность частицы зависит от ее формы, например, для сферы $\omega = 3$, а для цилиндра $\omega = 0.5$.

$$KnfH\&C = Kbf \times \left(\frac{Knp+(n-1)Kbf-\varphi(n-1)(Kbf-Knp)}{Knp+(n-1)Kbf+\varphi(Kbf-Knp)}\right), \quad (2)$$

$$n = \frac{3}{\omega}. \quad (3)$$

Модель Хашина–Штрикмана, представленная уравнением (4), была использована для дальнейшего подтверждения достоверности экспериментальных значений Knf, которые обычно предполагают, что нанолисты хорошо диспергированы в матрице [34]:

$$KnfH\&S = Knp\left(1 + \frac{3 + (1-\varphi)(Knp - Kbf)}{3Knp - (Knp - Kbf)}\right). \quad (4)$$

Следует отметить, что если теплопроводность базового компонента (цемента), а также объемные доли базового компонента и наночастиц (NP) являются известными параметрами, то реальная теплопроводность наночастиц заранее неизвестна, поскольку она зависит от многих параметров: степени агрегации, дефекты и т. д. На рис. 9 сравнивается экспериментальное значение теплопроводности композита с МГ 5 vol. % при 20 °C с расчетами, используя модели Максвелла, Гамильтона–Кроссера и Хашина–Штрикмана, в зависимости от ожидаемой теплопроводности NPs.

На рис. 9 видно, что модель Максвелла, в которой форма наночастиц принята за сферическую, и модель Гамильтона–Кроссера, в которой форма наночастиц принята за цилиндрическую, практически совпадают друг с другом и обеспечивают неудовлетворительное соответствие между расчетным значением теплопроводности композита и экспериментальными данными. В то время как модель Хашина–Штрикмана, в которой форма частиц принята близкой к листу, демонстрирует иной характер зависимости по сравнению с двумя предыдущими моделями и обеспечивает удовлетворительное

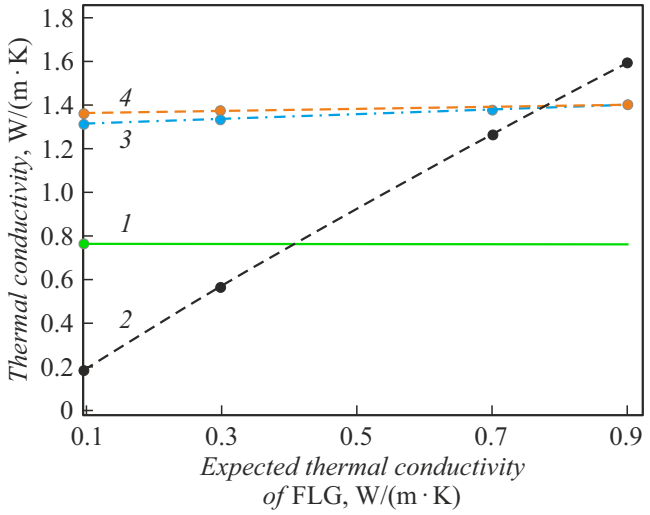

Рис. 9. Результаты расчета теплопроводности композита (цемента) с содержанием МГ 5 vol.% при 20 °C с использованием различных моделей в зависимости от ожидаемой теплопроводности NPs. *1* — экспериментально измеренная теплопроводность; *2* — расчет с использованием модели Хашина–Штрикмана; *3* — расчет с использованием модели Максвелла; *4* — расчет с использованием модели Гамильтона и Кроссера.

соответствие между расчетным значением теплопроводности композита и экспериментальными данными с теплопроводностью наночастиц всего 0.35 W/(m·K).

Удовлетворительное соответствие результатов расчетов с использованием модели Хашина–Штрикмана свидетельствует о том, что частицы МГ распределены в объеме воды в виде агрегатов, а их форма близка к листу. Теплопроводность заполнителей МГ может быть оценена как 0.4 W/(m·K).

На рис. 10 сравнивается экспериментальное значение теплопроводности композита с МГ vol. 10 % при 20 °C с расчетами модели Хашина–Штрикмана, в зависимости от ожидаемой теплопроводности NPs.

На рис. 10 видно, что модель Хашина–Штрикмана обеспечивает удовлетворительное соответствие между расчетным значением теплопроводности композита и экспериментальными данными с теплопроводностью наночастиц всего 0.55 W/(m·K). Следует отметить, что такая теплопроводность МГ (0.4 – 0.55 W/(m·K)) значительно меньше, чем теплопроводность отдельных графеновых листов (5000 W/(m·K)) [6].

Поскольку при добавлении МГ теплопроводность конечного композита значительно снижается, что свидетельствует о распределении МГ не в виде отдельных частиц, а в виде агрегатов. Учитывая, что экспериментально измеренная теплопроводность композита с 5 vol.% МГ сходится только с расчетами по модели Хашина–Штрикмана, в которой принимается, что частицы наполнителя имеют цилиндрическую структуру, можно сделать вывод, что агрегаты МГ в композитах также имеют цилиндрическую структуру. Результаты расчетов теплопроводности для композита с 10 vol.% МГ показывают, что теплопроводность агрегатов МГ возрастает с ростом объемной доли МГ в мелкозернистом бетоне. Можно предположить, что при увеличении доли МГ, агрегаты МГ образуют цепочки в матрице бетона, которые служат мостами для более эффективной передачи тепла.

Резюмируя данные по комплексу прочностных и теплофизических свойств синтезированных композитов, была предложена структура данных композитов, представленная на рис. 11.

Для создания энергоэффективных материалов необходимо исследовать теплотехнические свойства. Современный дизайн и передовые технологии позволяют ин-

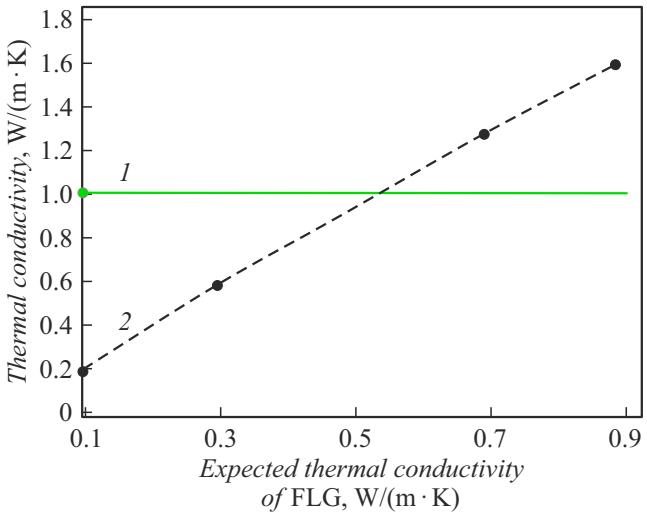

Рис. 10. Результаты расчета теплопроводности композита (цемента) с содержанием МГ 10 vol.% при 20 °C с использованием различных моделей в зависимости от ожидаемой теплопроводности NPs. *1* — экспериментально измеренная теплопроводность; *2* — расчет с использованием модели Хашина–Штрикмана.

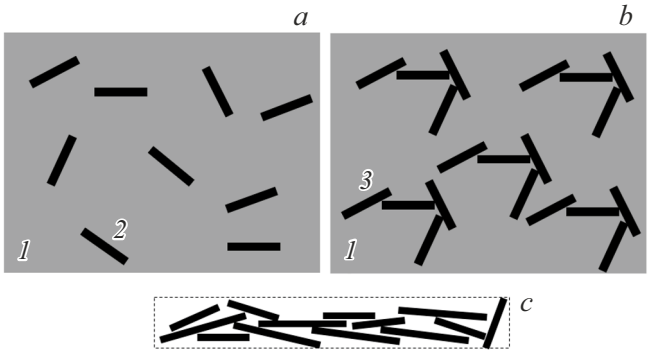

Рис. 11. Модель структуры синтезированных композитов: *a* — 5 vol.% МГ; *b* — 10 vol.% МГ; *c* — структура агрегата из частиц МГ. *1* — бетонная матрица; *2* — агрегат из частиц МГ; *3* — агрегаты МГ 2-го порядка (тепловые мосты).

женерам выполнять все требования тепловой защиты здания и обеспечивать энергоэффективность [35].

Существуют различные решения для повышения энергоэффективности зданий: это могут быть различные конфигурации вентилируемых фасадов [36], разработка методов расчета толщины утеплителя стен зданий с учетом температурно-влажностного режима [37,38].

Эффект повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций обеспечивается благодаря снижению потерь теплоты через фасады и теплозащитную оболочку здания в целом, что позволяет уменьшить количество потребляемой тепловой энергии; повышению теплового комфорта внутри помещений вследствие уменьшения интенсивности лучистого и конвективного теплообмена на внутренней поверхности ограждений; снижению загрязненности окружающей среды из-за сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу [39].

Для выявления энергоэффективности синтезированных образцов были проведены расчеты количества тепла (Q, [MW·h]), теряемое зданием через ограждающую конструкцию из бетона толщиной 300 mm в течение всего отопительного периода по следующей формуле:

$$Q = \frac{S \cdot \Delta t \cdot z_{heating\,season}}{R_o}, \tag{5}$$

где S — это площадь стены, принимается равной $1\,\mathrm{m}^2$; Δt — разность температур в помещении и на улице,

$$\Delta t = 20 - (-24) = 44\,\mathrm{K}, \tag{6}$$

$z_{heating\,season} = 5112\,\mathrm{h}$ — длительность отопительного периода, R_o — термическое сопротивление, $[(\mathrm{m}^2{\cdot}\mathrm{K})/\mathrm{W}]$.

Результаты расчетов представлены на рис. 8. Как видно из рисунка, использование 5 vol. % МГ позволяет снизить потери тепловой энергии в окружающую среду строительной конструкции в 2 раза.

Заключение

Использование МГ, синтезированного в условиях СВС процесса в концентрации до 10 vol. %, показало значительную перспективность данного материала при использовании в качестве добавки для создания композитов на основе бетона. Использование МГ позволило значительно (до 2 раз) снизить теплопроводность синтезированных образцов, а также повысить твердость по Бринеллю на 44 % по сравнению с контрольным образцом без ухудшения комплекса прочностных свойств (прочность на сжатие и прочность на трехточечный изгиб). Исходя из сравнения результатов измерения теплопроводности композитов с модельными расчетами, было установлено, частицы МГ (при 5 vol. %) распределяются в виде агрегатов, что приводит к снижению теплопроводности конечного изделия. Однако при дальнейшем увеличении доли наполнителя агрегаты МГ формируют тепловые мосты, что приводит к росту теплопроводности. Расчеты энергоэффективности показали, что за счет низкой теплопроводности композитов, их теплоаккумулирующая способность должна быть примерно в 2 раза выше, чем у контрольного образца. Результаты расчетов по математическим моделям теплопроводности показали, что с увеличением доли МГ в объеме композитов теплопроводность агрегатов МГ возрастает с 0.35 до 0.55 W/(m·K). Можно предположить, что с увеличением доли МГ происходит увеличение размера агрегатов МГ, которые выступают в роли теплопроводящих цепей в матрице бетона.

Исходя из полученных данных, в дальнейших работах будет исследовано влияние низких (< 5 vol. %) концентраций МГ на свойства композитов на основе бетона с целью повышения комплекса прочностных свойств.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе (проект FFUG-2024-0019 „Функциональные углеродные наноструктурированные материалы“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Beskopylny, S.A. Stel'makh, E.M. Shcherban', L.R. Mailyan, B. Meskhi. J. Build. Eng., **51**, 104235 (2022). doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104235

[2] T.A. Koriakovtseva, A.E. Dontsova, D.V. Nemova. Buildings, **14** (4), 1034 (2024). doi.org/10.3390/buildings14041034

[3] M.M. Mokhtar, M. Morsy, N.A. Taha, E.M. Ahmed. Constr. Build. Mater., **320**, 125537 (2022). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125537

[4] D. Dimov, I. Amit, O. Gorrie, M.D. Barnes, N.J. Townsend, A.I.S. Neves, F. Withers, S. Russo, M.F. Craciun. Adv. Funct. Mater., **28** (23), 1705183 (2018). doi.org/10.1002/adfm.201705183

[5] J.-J. Park, S. Kim, W. Shin, H.-J. Choi, G.-J. Park, D.-Y. Yoo. Materials (Basel), **13** (8), 1828 (2020). doi.org/10.3390/ma13081828

[6] A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, Ch. Ning Lau. Nano Lett., **8** (3), 902 (2008). doi.org/10.1021/nl0731872

[7] Ch. Lee, X. Wei, J.W. Kysar, J. Honeи. Science, **321** (5887), 385 (2008). doi.org/10.1126/science.1157996

[8] M. Ucak-Astarlioglu. *Graphene in cementitious materials* (Engineer Research and Development Center (U.S.), 2023), doi.org/10.21079/11681/48033

[9] M. Гойсис. Цемент и его применение, **1**, 108 (2020).

[10] S.P. Dalal, P. Dalal. Constr. Build. Mater., **276**, 122236 (2021). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122236.

[11] Т.А. Потес, С.Н. Леонович. *Бетон, модифицированный графеном*. Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей III Международной научной конференции (Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2021), с. 147–150. https://elib.psu.by/handle/123456789/28187

[12] P.K. Akarsh, D. Shrinidhi, Sh. Marathe, A.K. Bhat. Mater. Today Proc., **60**. 234 (2022). doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.510
[13] Z. Jiang, O. Sevim, O.E. Ozbulut. Constr. Build. Mater., **30**, 124472 (2021). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124472
[14] B.A. Salami, F. Mukhtar, S.A. Ganiyu, S. Adekunle, T.A. Saleh. Constr. Build. Mater., **396**, 132296 (2023). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132296
[15] M.M. Rashwan, M.F.M. Fahmy, A. Abdullah, M. Hesham. JES. J. Eng. Sci., **48** (1), 32 (2020). doi.org/10.21608/jesaun.2020.109052
[16] S.C. Devi, R.A. Khan. J. Build. Eng., **27**, 101007 (2020). doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101007
[17] G.D. Fedorova, A.P. Scryabin, G.N. Alexandrov. Stroit. Mater., **767** (1–2), 16 (2019). doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-16-22
[18] A. Mashhadani, V. Pershin. Adv. Mater. Technol., **2** (18), 046 (2020). doi.org/10.17277/amt.2020.02.pp.046-056
[19] K.A. Al-Shiblavi, V.F. Pershin, T.V. Pasko. Vektor Nauk. Tol'yattinskogo Gos. Univ., **4**, 6 (2018). doi.org/10.18323/2073-5073-2018-4-6-11
[20] A.H. Alateah. Case Stud. Constr. Mater., **19**, e02653 (2023). doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02653
[21] O. Zaid, S.R.Z. Hashmi, F. Aslam, Z. Ul Abedin, A. Ullah. Diam. Relat. Mater., **124**, 108883 (2022). doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108883
[22] W. Li, F. Qu, W. Dong, G. Mishra, S.P. Shah. Constr. Build. Mater., **331**, 127284 (2022). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127284
[23] H. Zeng, Sh. Qu, Y. Tian, Y. Hu, Y. Li. J. Build. Eng., **69**, 106192 (2023). doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106192
[24] N. Kumar, R. Salehiyan, V. Chauke, O.J Botlhoko, K. Setshedi, M. Scriba, M. Masukume, S.S. Ray. Flat Chem., **27**, 100224 (2021). doi.org/10.1016/j.flatc.2021.100224
[25] A. Gutiérrez-Cruz, A.R. Ruiz-Hernández, J.F. Vega-Clemente, D.G. Luna-Gazcón, J. Campos-Delgado. J. Mater. Sci., **57** (31), 14543 (2022). doi.org/10.1007/s10853-022-07514-z
[26] A. Voznyakovskii, A. Vozniakovskii, S. Kidalov. Fullerenes, Nanotub. Carbon Nanostructures, **30** (1), 59 (2022). doi.org/10.1080/1536383X.2021.1993831
[27] A. Voznyakovskii, A. Neverovskaya, A. Vozniakovskii, S. Kidalov. Nanomaterials, **12** (5), 883 (2022). doi.org/10.3390/nano12050883
[28] S. Kidalov, A. Voznyakovskii, A. Voznyakovskii, S. Titova, Y. Auchynnikau. Materials (Basel), **16** (3), 1157 (2023). doi.org/10.3390/ma16031157
[29] ISO/TS 21356-1:2021 *Nanotechnologies — Structural characterization of graphene. Part 1: Graphene from powders and dispersions* [*Нанотехнологии. Определение структурных характеристик графена. Часть 1. Наноматериалы в форме порошков и суспензий, содержащие графен*]
[30] A. Voznyakovskii, A. Vozniakovskii, S. Kidalov. Nanomaterials, **12** (4), 657 (2022). doi.org/10.3390/nano12040657
[31] P.K. Das. J. Mol. Liq., **240**, 420 (2017). doi.org/10.1016/j.molliq.2017.05.071
[32] J.C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Cambridge University Press, Cambridge: 2010), 484 p.
[33] B. Lamas, B. Abreu, A. Fonseca, N. Martins, M. Oliveira. Int. J. Therm. Sci., **78**, 65 (2014). doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.017
[34] Choi S.U.S. и др. Appl. Phys. Lett., **79** (14), 2252 (2001). doi.org/10.1063/1.1408272.
[35] E. Gumerova, O. Gamayunova, L. Shilova. MATEC Web Conf., **106**, 06020 (2017). doi.org/10.1051/matecconf/201710606020
[36] M. Petrichenko, S.A. Subbotina, F.F. Khairutdinova, E. Reich, D.V. Nemova, V.Ya. Olshevskiy, V. Sergeev. Mag. Civ. Eng., **73** (5), 40 (2017). doi.org/10.18720/MCE.73.4
[37] К.П. Зубарев, М.И. Рынковская. Перспективы науки, **1**, 99 (2023).
[38] V.G. Gagarin, V.K. Akhmetov, K.P. Zubarev. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., **918** (1), 012113 (2020). doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012113
[39] С.В. Корниенко. Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия Строительство и архитектура, **49** (68),167 (2017).