УДК 691.327.3; 666.9.033
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-110-122

© *А. С. Иноземцев*, д-р техн. наук, доцент
© *С. Р. Сокольникова*, аспирант
© *Ю. А. Жидков*, аспирант
(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)
E-mail: InozemtsevAS@mgsu.ru, srsokolnikova@mail.ru, zhidkovyua@gmail.com
© *Т. К. Зыонг*, канд. техн. наук
(Вьетнамский институт строительных материалов, Ханой, Вьетнам)
E-mail: quiduongthanh@gmail.com

© *A. S. Inozemtsev*, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
© *S. R. Sokolnikova*, post-graduate student
© *Iu. A. Zhidkov*, post-graduate student
(National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)
E-mail: InozemtsevAS@mgsu.ru, srsokolnikova@mail.ru, zhidkovyua@gmail.com
© *T. Q. Duong*, PhD in Sci. Tech.
(Vietnam institute for building materials, Hanoi, Vietnam)
E-mail: quiduongthanh@gmail.com

УМНЫЕ БЕТОНЫ — ШАГ К ТЕХНОЛОГИИ 4D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ*

SMART CONCRETE: A STEP TOWARDS 4D PRINTING IN CONSTRUCTION

Технология 3D-печати бетоном ограничена отсутствием автоматизированного армирования, усадочными деформациями при интенсивном испарении воды в полевых условиях и неравномерным температурным градиентом при послойной экструзии. Концепция 4D-печати предполагает использование умных материалов, способных к адаптивному изменению свойств во времени в ответ на внешние стимулы (влажность, температура). В работе экспериментально обоснованы три направления модификации бетонных «чернил» для перехода к 4D-печати. Показано, что использование суперабсорбирующих полимеров на основе полиакрилата натрия позволяет управлять процессом структурообразования бетонов, адаптируясь к низкой влажности окружающей среды, при этом усадка снижается на 25 %. Приведены результаты испытаний бетонов с термоаккумулирующим материалом, стабилизированным в теплопроводном носителе — активированном угле. Прочность высокопрочного легкого бетона при использовании разработанной термоаккумулирующей добавки не подвергается снижению. Эксперименты по активации полимерных волокон с памятью формы в затвердевшей цементной матрице показали значительный рост прочности на изгиб, что доказывает возможность создания умных бетонов с самопреднапряженными волокнами, что позволит решить проблему армирования изделий и конструкций, напечатанных на 3D-принтере. Придание бетонным «чернилам» адаптивных свойств — внутреннего ухода, самопреднапряжения, пассивной терморегуляции — обеспечивает переход от 3D-печати к 4D-печати, где материал изменяет характеристики во времени на разных этапах жизненного цикла. Такая адаптивность на этапах твердения и эксплуатации позволяет рассматривать предложенные составы как умные чернила для 4D-печати, где временное изменение свойств становится управляемым параметром.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать, высокопрочный легкий бетон, внутренний уход, дисперсное армирование, полимеры с памятью формы, теплоаккумулирующие материалы, суперабсорбирующий полимер.

Three-dimensional (3D) concrete printing technology is limited by the lack of automated reinforcement, shrinkage deformations caused by intensive water evaporation under field conditions, and non-uniform temperature gradients during layer-by-layer extrusion. The concept of 4D printing involves the use of «smart» materials capable of adaptively changing their properties over time in response to external stimuli such as humidity and temperature. This study experimentally substantiates three approaches to modifying concrete inks for the transition to 4D printing. The use of sodium polyacrylate-based superabsorbent polymers is shown to control concrete structure formation under low ambient humidity conditions, reducing shrinkage by 25 %.

* Данная работа выполнена в рамках реализации Программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на 2025–2036 гг.

The results for concrete containing a phase change material stabilized in a thermally conductive activated carbon carrier are presented. The developed PCM admixture did not reduce the strength of high-strength lightweight concrete. Experiments on the activation of shape memory polymer fibers in a hardened cement matrix have shown a significant increase in bending strength, which proves the possibility of creating smart concretes with self-stressed fibers, which will solve the problem of reinforcing products and structures printed on a 3D printer. Imparting adaptive properties to concrete inks — such as internal curing, self-prestressing, and passive thermal regulation — enables the transition from 3D to 4D printing, where material properties evolve over time during different stages of the life cycle. Such adaptability during curing and service stages allows the proposed compositions to be considered smart inks for 4D printing, in which time-dependent changes in material properties become a controllable parameter.

Keywords: additive construction manufacturing, 3D printing, high-strength lightweight concrete, internal curing, fiber reinforcement, shape-memory polymers, phase change materials, superabsorbent polymer.

Введение

В настоящее время аддитивное строительное производство является технологией, которая, несмотря на существенное развитие с конца 1980-х годов, по-прежнему сталкивается с многочисленными проблемами. 3D-печать бетоном переживает бурный рост в теории и практике, демонстрируя впечатляющие возможности по возведению зданий сложной геометрии с высокой скоростью и сниженными трудозатратами. Однако широкое внедрение технологии сдерживается критическими недостатками [1], среди которых можно выделить отсутствие эффективных методов армирования, нерешенный вопрос с неблагоприятными условиями твердения цементного вяжущего в полевых условиях, проблемы с устройством теплоизоляции и т. д.

В последние годы значительно вырос интерес к так называемым умным материалам [2]. Несмотря на отсутствие единого определения, умными называют такие материалы, которые способны реагировать на внешние изменения эксплуатационной среды и изменять начальные свойства или характеристики [3]. Сочетание 3D-печати с умными материалами позволяет напечатанным конструкциям реагировать на различные внешние раздражители [4], что открывает возможности сочетания био- и геомиметики [5] для создания адаптивных 3D-конструкций. Использование времени в качестве дополнительного измерения в технологии 3D-печати при возведении зданий и сооружений формирует направление строительной 4D-печати.

Согласно [2], первое упоминание о 4D-печати датируется 2013 годом в выступлении профессора Массачусетского технологического института [6]. Сформулированная концепция 4D-печати вызвала значительный интерес, что отражается в растущем числе публикаций в международных базах данных (рис. 1) [7].

Общее количество таких трудов превышает 11 тыс., в том числе около 4,2 тыс. связаны с ключевыми словами «4D printing in construction». В российской электронной библиотеке количество публикаций значительно меньше, а в строительной тематике их практически нет.

Благодаря доступности и широкому распространению технологии 3D-печати особое внимание для развития 4D-печати вызывают полимеры [8–10]. Наиболее часто используются полимеры с памятью формы, гидрогели и жидкокристаллические эластомеры [7]. Такие материалы могут быть использованы для решения существующих проблем и строительного аддитивного производства.

Печать конструкций в полевых условиях с использованием цементных бетонов сопряжена с необходимостью ухода за гидратацией вяжущего, чтобы обеспечить формирование структуры с заданными эксплуата-

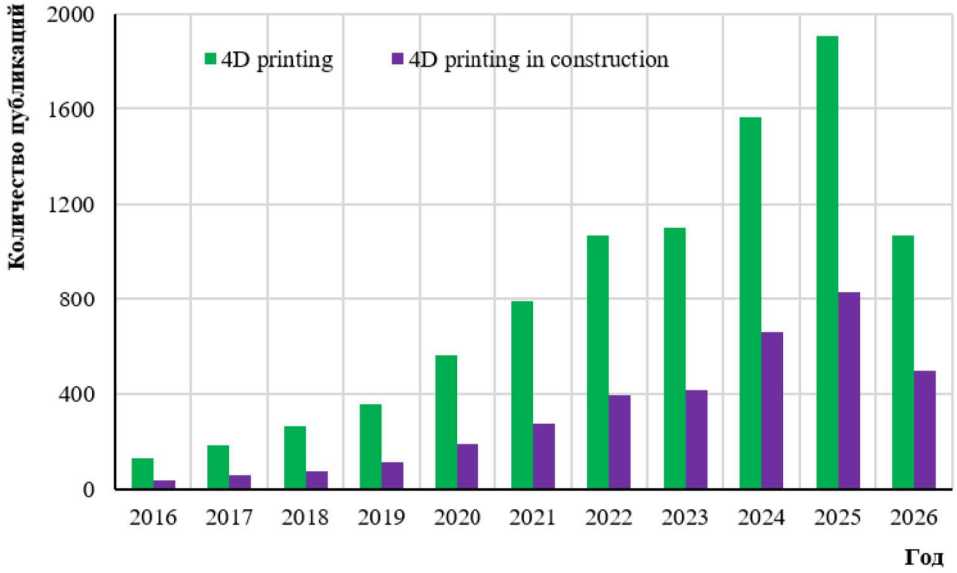

Рис. 1. Динамика публикаций по теме 4D-печати[1]

[1] По данным базы ScienceDirect.com.

ционными свойствами [11, 12]. Использование гидрогелей, способных удерживать и потом отдавать воду в количестве, в несколько раз превышающем собственный объем, является известным решением по внутреннему уходу за бетоном на этапе схватывания и твердения. Однако такие, как правило, гранулированные или волокнистые компоненты существенно ухудшают начальную структуру бетона, формируя избыточный объем пор, что приводит к снижению прочности бетона и повышению проницаемости напечатанных конструкций [13].

Введение в состав бетонных смесей для 3D-печати растворов полиакрилатов с рецептурно управляемым периодом полимеризации позволит распределить гидрогель тонкими пленками и реализовать абсорбирующую функцию после формования. В результате внутренний уход реализуется без негативного влияния на поровую структуру бетона, а удержание влаги в составе конструкции снизит интенсивность ее высыхания в полевых условиях печати, что положительно отразится на возникновении усадочных деформаций.

Как известно, устройство стальной арматуры традиционным способом невозможно в печатаемый слой без остановки процесса и ручного труда [14, 15]. Дисперсное армирование при этом повышает трещиностойкость, но не способно воспринимать основные растягивающие усилия в несущих конструкциях, а укладка стержней вручную нивелирует главное преимущество 3D-печати — автоматизацию. Преднапряжение тросами требует создания специальных каналов и сложно реализуемо в тонкостенных печатных элементах.

В условиях ограниченности применения традиционного армирования в процессе печати особый интерес представляют альтернативные методы формирования напряженного состояния материала. Одним из таких подходов является использование материалов с памятью формы [16]. Дисперсное армирование бетонной смеси для 3D-печати такими полимерными волокнами с запрограммированной формой после достижения требуемой прочности и при воздействии температурного импульса обеспечивает формирование внутренних сжимающих напряжений, аналогичных эффекту предвари-

тельного напряжения. При этом, в отличие от традиционных способов армирования, требующих вмешательства в процесс печати, использование активируемых волокон позволяет сохранить непрерывность аддитивного процесса.

Кроме того, в процессе твердения экструдированного во время печати бетона возникает проблема неравномерности теплообмена, который выражается наличием градиента в конструкции из-за совокупности факторов [17]. Так, временной разрыв между устройством слоев создает градиент температур в конструкции, который усугубляется из-за воздействия окружающей среды и большой открытой поверхности. В результате это может проявляться интенсивным трещинообразованием и ухудшением целостности напечатанных слоев.

Использование теплоаккумулирующих материалов в составе бетонных «чернил» позволит создать адаптивные условия для снижения градиента температур в объеме материала за счет накопления тепловой энергии от экзотермических физико-химических реакций гидратации портландцемента. При этом, находясь в составе затвердевшего камня, теплоаккумулирующий компонент реализует механизм пассивной терморегуляции конструкций, повышая теплоэффективность здания [18, 19].

Таким образом, подтверждение описанных выше гипотез позволит сформулировать решения некоторых проблем в технологии 3D-печати — усадки, автоматизации армирования и температурного градиента — за счет использования умных материалов, способных к адаптивной реакции на внешние стимулы, и представляет собой варианты технологического перехода к концепции 4D-печати.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является легкий бетон на полых микросферах, приготовленный из портландцемента ЦЕМ I 42,5 (Ц), керамических микросфер ForeSphere (МС), микрокремнезема МК-85 (МКМ), фракционного песка фракцией 0,16–0,63 мм ($П_ф$), кварцевой муки ($П_м$), суперпластификатора Melflux 2651F (Пл) и воды (В). Соотношение компонентов соответствует составу с проектной плотностью бетона 1400 кг/м^3 согласно [20].

В качестве суперабсорбирующего полимера (САП) использована акрилатная композиция «Реновир гидрогель». Гель приготавливался в виде водного раствора из трехкомпонентной полимерной части (ΣА) (компонент $А_1$ — полиакрилат натрия, компоненты $А_2$ и $А_3$ — инициаторы полимеризации), компонента Б — катализатора и воды (В).

В качестве преднапрягающей армирующей фибры использовались плоские полимерные волокна на основе поливинилхлорида размерами 0,15×1,5×15 мм.

Исследование эффекта преднапряжения осуществлялось на серии образцов в возрасте 10 сут согласно табл. 1.

Тепловая обработка образцов бетона и температурная активация волокон проводились в испытательной камере тепла и холода WK3-180/70 при температуре +80 °С.

Для оценки физико-механических свойств исследуемых бетонов изготавливались стандартные образцы-балочки 40×40×160 мм. Испытания образцов осуществлялись на испытательном прессе Controls 50-C8422 по схеме трехточечного изгиба по методике п. 8.2.3 ГОСТ 30744–2001.

Таблица 1

Условия испытания легких бетонов на полых микросферах для оценки эффекта преднапряжения

Наименование	Содержание волокон, %	Тепловая обработка	Термо-активация волокон
Серия 1	–	–	–
Серия 2	–	+	–
Серия 3	1,0	–	–
Серия 4	1,0	–	+

В качестве термоаккумулирующего материала (ТАМ) использована смесь жирных кислот (кокосовое масло) с температурой фазового перехода 20…26 °С.

Авторами осуществлен подбор состава легкого бетона на полых микросферах с применением ТАМ на основе смеси жирных кислот, стабилизированной в активированном угле. Концентрация активированного угля варьировалась от 1,0 до 7,5 % от массы цемента. Содержание ТАМ при этом составляло 50 % от массы носителя, что является максимальной концентрацией используемого ТАМ, надежно удерживаемой в составе выбранного носителя (отделение от носителя при нагревании до 75 °С в течение 5 ч — менее 0,5 %).

Деформации усадки оценивались с помощью компаратора после экспозиции в течение 28 сут в условиях интенсивной потери влаги в вентилируемой климатической камере при температуре 30±1 °С и влажности 5...10 %. Содержание САП варьировали в количестве 0,4; 0,8; 1,5 и 2,3 % от массы портландцемента.

Результаты и обсуждение

Отличительной особенностью бетонных смесей, используемых в качестве чернил для 3D-печати, является сочетание достаточной текучести и густоты, обеспечивающее одновременно прокачиваемость, экструдируемость и сохранение формы. Разработанные составы легких бетонов на полых микросферах представляют собой мелкозернистый бетон, управление подвижностью которого обеспечивается использованием поликарбоксилатного пластификатора. Варьирование его количества позволит уставить паритетное сочетание текучести и вязкости для обеспечения пригодности для печати. При этом также регулируется способность к сохранению формы. На рис. 2 показан внешний вид образцов, экструдированных из формы круглого и прямоугольного сечения.

Видно, что варьирование концентрации пластификатора позволяет управлять способностью бетонной смеси к сохранению объема после экструзии. Величина деформаций бетонной смеси, позволяющая количественно оценить стойкость к оплыванию, представлена в табл. 2.

Как видно из табл. 2, увеличение диаметра расплыва бетонной смеси за счет увеличения концентрации пластификатора сопровождается снижением сохраняемости формы. При этом более 90 % формы цилиндра сохраняется при содержании пластификатора не более 1,1 % от массы портландцемента. Это соответствует подвижности смеси по стандартизированной методике 135 мм.

Такое сочетание свойств объясняется особенностью структуры легкой бетонной смеси, наполненной более чем на 30 % замкнутыми воздушными порами, представляющими собой отдельные газовые пузырьки,

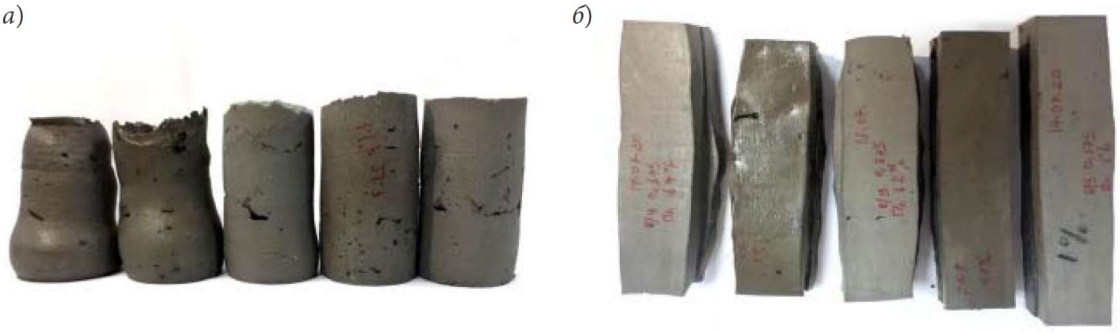

Рис. 2. Внешний вид образцов легкого бетона на полых микросферах, экструдированных из формы круглого (*а*) и прямоугольного (*б*) сечения

Таблица 2

Деформативные свойства бетонных смесей на полых микросферах*

№	$C_д$, % от Ц	$Д_р$, мм	H/H_0	V_1/V_2, %
1	1,0	128,8	0,95	97,1
2	1,1	135,0	0,93	93,9
3	1,2	160,3	0,90	88,3
4	1,3	165,0	0,84	83,1
5	1,4	181,8	0,78	61,8

* $C_д$ — расход пластификатора; $Д_р$ — диаметр расплыва из конуса Хагермана при встряхивании; H/H_0 — относительная деформация по высоте цилиндра; V_1/V_2 — относительное изменение объема.



Рис. 3. Пример послойной укладки бетонной смеси на полых микросферах

окруженные твердой алюмосиликатной оболочкой, — полые микросферы. То есть снижение средней плотности бетонной смеси представляет собой эффективное техническое решение для уменьшения ее склонности к оплыванию, так как интенсивность этого процесса связана с действием силы притяжения, а значит, пропорциональна массе в единице объема. На рис. 3 показана возможность экструдирования бетонных смесей на полых микросферах для устройства послойных конструкций.

Для повышения функциональности напечатанных на 3D-принтере конструкций важнейшим показателем качества сформированного камня является прочность. На рис. 4 показано, что при варьировании содержания полых микросфер для достижения требуемой средней плотности бетона обеспечивается возможность получения высокой прочности, которая может достигать 70 МПа. При этом одним из ключевых условий достижения таких физико-механических свойств является получение высокой прочности цементного камня, связывающего плотные и полые заполнители в составе.

В условиях интенсивного испарения воды из бетонной смеси, вызванного большой площадью открытой поверхности в процессе 3D-печати, структурообразование цементного камня протекает в неблагоприятных условиях. Возникающий недостаток воды для гидратации портландцемента и формирующаяся при испарении дополнительная пористость ухудшают структуру, увеличивают усадку и снижают прочность цементного камня. Адаптировать твердеющие бетонные чернила к изменяющимся условиям позволяет введение раствора суперабсорбирующего полимера на основе полиакрилата натрия. В отличие от гранулированных САП полимеризацией такого гидрогеля можно управлять на этапе проектирования состава и в соответствии с режимом печати. Кроме того, сформированная в результате форма САП представляет собой тонкие пленки, которые наряду с гранулированными и волокнисты-

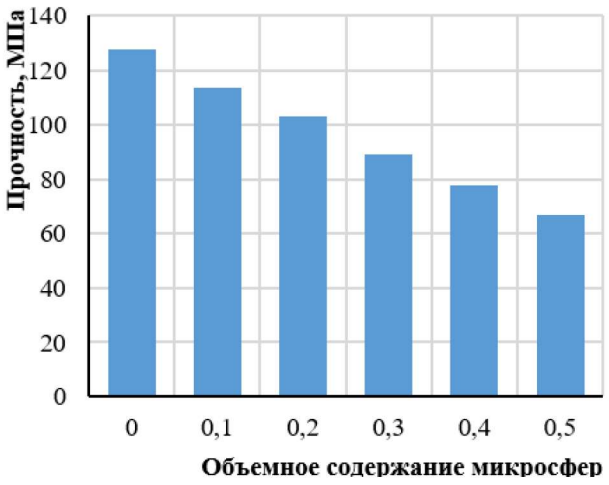

Рис. 4. Зависимость прочности высокопрочного легкого бетона от объемного содержания микросфер [21]

ми аналогами не образуют дополнительной пористости, снижающей прочность.

Использование САП обусловлено необходимостью снижения усадочных деформаций бетонов для 3D-печати. На рис. 5 показано влияние содержания гидрогеля на деформации усадки высокопрочных легких бетонов на полых микросферах. Видно, что составы без САП характеризуются величиной деформаций более $12 \cdot 10^{-2}$ мм/м, а введение гидрогеля приводит к снижению значений усадки на 25 %, до $9 \cdot 10^{-2}$ мм/м.

Анализ термограмм (рис. 6) цементного камня (ЦК) с САП подтверждает положительное влияние последнего на структурообразование. Суммарная площадь аномалии для эндотермического эффекта Q для ЦК в диапазоне температур 470…510 °С пропорциональна количеству портландита, что позволяет сделать вывод о количестве продуктов гидратации или степени гидратации вяжущего. Видно, что с увеличением содержания САП площадь аномалии для эндотермического эффекта увеличивается, достигая максимума при содержании САП 1,0 % от массы портландцемента. Дальнейшее увеличение САП приводит к уменьшению Q. Однако площадь аномалии для эндотермического эффекта при 1,5 % САП от массы портландцемента превышает значение S для контрольного состава. Так, исследование образцов ЦК после длительного периода твердения (28 сут.), проведенное методом дифференциального термического анализа по энтальпии разложения портландита, показывает, что твердение в присутствии САП сопровождается увеличением содержания образующегося портландита.

В возрасте 28 сут. твердения в неблагоприятных условиях (температура +25...27 °С и влажность 50...60 %) прочность при изгибе легких бетонов на полых микросферах с САП изменяется в диапазоне 5,5...5,8 МПа, а прочность при сжатии — 45,3...47,8 МПа (рис. 7). Использование гидрогеля в количестве 0,5...1,0 % от массы портландцемента приводит к наименьшему снижению прочности бетона.

Отметим, что увеличение содержания акрилатной части до 2,3 % в растворе САП от массы портландцемента способствует увеличению предела прочности при изгибе до 17 % (рис. 7, *а*) за счет формирования полимерных пленок и волокон, выполняющих после десорбции воды функцию армирующей добавки. При этом увеличение ее содержания более 1,5 % от массы портландцемента характеризуется снижением предела прочности при сжатии до 8,5 % (рис. 7, *б*).

Очевидно, что сопутствующий армирующий эффект от использования САП не мо-

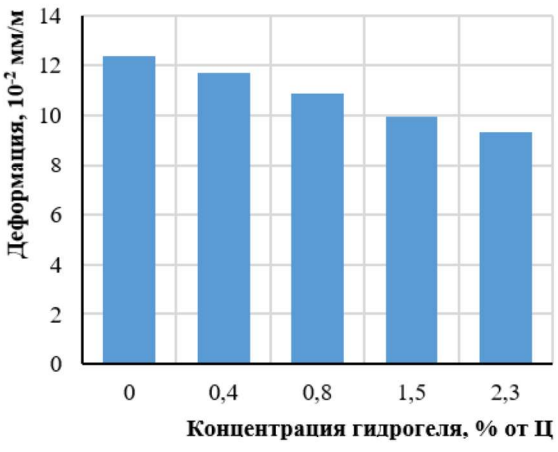

Рис. 5. Влияние гидрогеля на усадку бетона

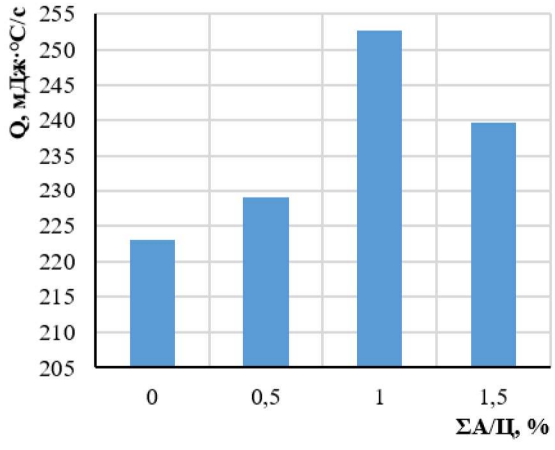

Рис. 6. Термограмма цементного камня в диапазоне температур 450…530 °С

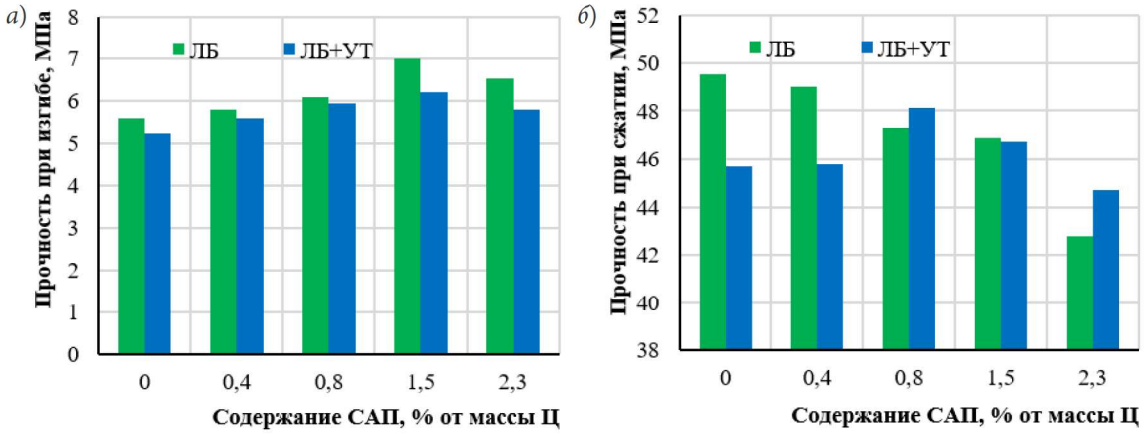

Рис. 7. Зависимость предела прочности при изгибе (*а*) и при сжатии (*б*) высокопрочного легкого бетона от содержания гидрогеля

жет решить проблему низкой прочности напечатанных конструкций из-за сложности армирования. Однако одним из возможных альтернативных способов может выступать самопреднапряжение напечатанных изделий и конструкций, реализуемое применением умной фибры. Принцип основывается на использовании в «чернилах» волокон, которые на этапе печати находятся в запрограммированном пассивном (вытянутом) состоянии. Бетонная смесь экструдируется послойно, формируя изделие заданной геометрии. На этапе твердения происходит набор прочности, волокна сохраняют временную форму, после чего осуществляется активация, заключающаяся в тепловом воздействии на готовое изделие. В результате этого воздействия волокна, нагреваясь выше температуры стеклования, стремятся вернуться к исходной (укороченной) форме. Поскольку волокна жестко сцеплены с затвердевшей матрицей, их усадка создает в цементном камне поле сжимающих напряжений. Это явление аналогично классическому преднапряжению железобетона, но реализовано на микроуровне без использования механических натяжных устройств. В табл. 3 представлены результаты испытания легкого бетона на полых микросферах с умной фиброй в количестве 1 % от массы портландцемента на прочность при изгибе (как наиболее чувствительное к армированию свойство).

Проведенные испытания бетонов по оценке описанного механизма преднапряжения показывают следующее: сравнение серий 1 и 2 демонстрирует, что нагрев до 80 °С, необходимый для активации волокон, не оказывает деструктивного влияния на цементную матрицу. Наблюдается незначи-

Таблица 3

Влияние преднапряжения фибры на прочность при изгибе легкого бетона на полых микросферах

Серия	Описание образца	Прочность при изгибе	
		$R_{изг,i}$, МПа	$R_{изг,i} / R_0$
1	Легкий бетон (контрольный состав)	1,80	1,00
2	Легкий бетон с тепловой обработкой при T = +80 °С	1,83	1,02
3	Легкий бетон, армированный неактивированными волокнами	1,97	1,09
4	Легкий бетон, армированный активированными волокнами	**3,25**	**1,81**

Примечание. R_0 — прочность контрольного состава.

тельное повышение прочности в пределах статистической погрешности. Это доказывает, что последующий прирост прочности в серии 4 обусловлен влиянием волокон, а не преобразованием структуры камня под действием температуры. Видно, что введение 1,0 % полимерных волокон без их активации (серия 3) приводит к увеличению прочности при изгибе на 9,4 %, с 1,80 до 1,97 МПа. Прочность образцов с активированными волокнами составляет 3,25 МПа, что соответствует приросту 80,6 % относительно контрольного состава или 65 % по сравнению с составом с неактивированной фиброй.

Таким образом, результаты исследования подтверждают гипотезу о возможности получения легкого бетона с предварительно напряженной фиброй, что позволяет реализовывать распределенное самопреднапряжение в объеме материала экструдированных изделий.

Эффективность использования легких бетонов на полых микросферах в технологии аддитивного строительного производства объясняется многофункциональностью их свойств. Обладая низкой средней плотностью и высокой прочностью, такие чернила позволяют печатать конструкции с высокой несущей способностью, повышенными теплотехническими характеристиками, высокой морозостойкостью и водонепроницаемостью благодаря замкнутой пористости. В результате технология 3D-печати может быть ориентирована на печать не конструкций несъемной опалубки, а функциональных частей зданий. Дополнительную функциональность, связанную с адаптивностью таких конструкций к температуре окружающей среды, может придать теплоаккумулирующая способность. Эта способность бетона реализуется механизмом накопления / высвобождения энергии в результате фазового перехода (плавление и кристаллизация) компонентов-теплоаккумуляторов.

Важно, что осложняющим фактором является способ введения ТАМ в бетон, так как прямое его добавление в состав смеси приводит к снижению прочности бетона [22]. Поэтому требуется стабилизация ТАМ, которая осуществляется пропиткой в мелкопористых тонких порошковых материалах [23, 24] или микрокапсуляцией, например в полимерных капсулах [25]. В работе в качестве минерального носителя исследован порошковый активированный уголь, являющийся материалом с высокой теплопроводностью и доступным на территории России. Важное свойство выбранного носителя — высокая сорбционная способность (на 30…40 % выше других широко используемых носителей) [26–28]. Влияние описанной теплоаккумулирующей добавки на свойства легких бетонов на полых микросферах представлено на рис. 8 и 9.

Анализ данных рис. 8 показывает, что средняя плотность образцов незначительно снижается с увеличением концентрации носителя с 1405 до 1338 кг/м^3. В то же время примечательно, что теплопроводность образцов увеличивается с 0,57 до 0,6 Вт/(м · °С) при использовании носителя в количестве 1,0 и 2,5 % несмотря на снижение средней плотности, что доказывает высокую теплопроводность выбранного носителя при стабилизации ТАМ. Таким образом, целесообразно использовать выбранный носитель при его содержании до 2,5 %. При этом для повыше-

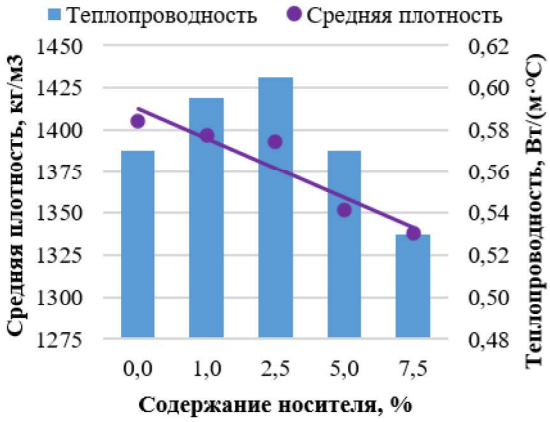

Рис. 8. Влияние ТАМ на среднюю плотность и теплопроводность легкого бетона

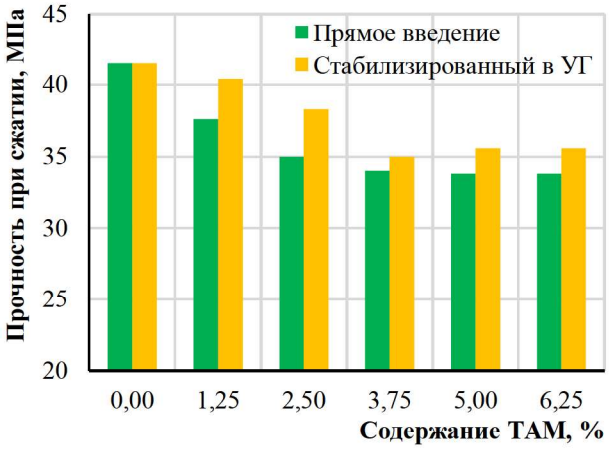

Рис. 9. Влияние способа введения ТАМ на прочность легкого бетона

ния теплоэффективности разрабатываемого материала возможно превышение концентрации ТАМ более 50 % от массы носителя, допуская небольшое отделение ТАМ от носителя. Как видно из рис. 9, прямое добавление ТАМ в состав смеси приводит к значительному снижению прочности, начиная с минимальной концентрации ТАМ 1,25 %, — с 41,5 до 37,6 МПа, а при концентрациях 5% и более — до 33,8 МПа. Прочность при сжатии образцов при стабилизации ТАМ в носителе не подвергается снижению при использовании концентраций до 2,5 %, при повышении концентрации более 5,0 % наблюдается снижение прочности до 35 МПа.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют возможности совершенствования технологии бетонов за счет использования полимерных функциональных модификаторов. Показано, что такие модификаторы обеспечивают адаптивность материала к внешним условиям как на этапе формирования структуры, так и в готовых изделиях.

Использование суперабсорбирующих полимеров позволяет управлять процессом структурообразования бетонов, адаптируя его к низкой влажности окружающей среды, что особенно актуально в технологии аддитивного строительного производства при экструзии конструкций с большой открытой поверхностью, способствующей интенсивному испарению воды из структуры материала. Экспериментально доказано, что активация полимерных волокон с памятью формы в затвердевшей цементной матрице приводит к значительному росту прочности на изгиб. Показана возможность создания умных бетонов с самопреднапряженными волокнами, что позволит решить проблему армирования изделий и конструкций, напечатанных на 3D-принтере.

Адаптация зданий, ограждающие конструкции которых напечатаны из легкого бетона, к эксплуатационным условиям путем накопления и высвобождения избыточной тепловой энергии за счет распределенного в структуре органического теплоаккумулирующего материала придает технологии аддитивного строительного производства конкурентное преимущество.

Пассивное энергосбережение, самопреднапряжение и «внутренний уход» за формированием структуры бетонов являются примерами применения умных строительных «чернил», демонстрирующими новый взгляд на технологию 3D-печати. Придание адаптивных свойств напечатанным материалам позволяет перейти от концепции экструзии опалубки или печати аналогов существующих изделий, изготовленных традиционными способами, к концепции технологии 4D-печати, основанной не на особенности формирования готового продукта в трехмерном пространстве, а на его уникальности и адаптивности во времени на разных этапах жизненного цикла.

Библиографический список

1. *Иноземцев А. С.* Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 2. С. 216–245. DOI 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245.

2. *Sajjad R., Chauhdary S. T., Wei G., Zahid A., Khosa A., Imran M., Sajjad M.* A review of 4D printing — technologies, shape shifting, smart materials, and biomedical applications // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2024. Vol. 7 (1). Pp. 20–36. DOI 10.1016/j.aiepr.2023.08.002.

3. *Khoo Z. X., Teoh J. E. M., Liu Y., Chua C. K., Yang S., An J., Leong K. F., Yeong W. Y.* 3D printing of smart materials: a review on recent progresses in 4D printing // Virtual and Physical Prototyping. 2015. Vol. 10 (3). Pp. 103–122. DOI 10.1080/17452759.2015.1097054.

4. *Tamay D. G., Dursun Usual T., Alagoz A. S., Yucel D., Hasirci N., Hasirci V.* 3D and 4D printing of polymers for tissue engineering applications // Frontiers in bioengineering and biotechnology. 2019. Vol. 7. 00164. DOI 10.3389/fbioe.2019.00164.

5. *Лесовик В. С., Перькова М. В., Бабаев В. Б.* Архитектурная геоника как междисциплинарное направление в архитектурной науке и практике // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2015. № 6. С. 74–79.

6. *Tibbits S.* The emergence of «4D printing»: [video] // TED conference. February 2013. URL: https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing

7. *Qiu W., Xu X., Dong K., Wang Y., Xiong Y.* Recent advances in 4D printing of fiber-reinforced polymer composites: A review and outlook // Composites Part B: Engineering. 2024. Vol. 283. 111645. DOI 10.1016/j.compositesb.2024.111645.

8. *Ge Q., Sakhaei A. H., Lee H., Dunn C. K., Fang N. X., Dunn M. L.* Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. 31110. DOI 10.1038/srep31110.

9. *Wu J. J., Huang L. M., Zhao Q., Xie T.* 4D printing: history and recent progress // Chinese Journal of Polymer Science. 2018. Vol. 36 (5). Pp. 563–575. DOI 10.1007/S10118-018-2089-8/METRICS.

10. *Subash A., Kandasubramanian B.* 4D printing of shape memory polymers // European Polymer Journal. 2020. Vol. 134. 109771. DOI 10.1016/J.EURPOLYMJ.2020.109771.

11. *Филипенко П. В., Солонина В. А., Суровцев И. А.* Оптимизация структуры мелкозернистого бетона для строительной 3D-печати // Современное строительство и архитектура. 2022. № 6 (30). С. 10–14. URL: https://doi.org/10.18454/mca.2022.30.6.002

12. *Мухаметрахимов Р. Х., Лукманова Л. В.* Основные направления оптимизации структуры и свойств мелкозернистых бетонов, формуемых методом послойного экструдирования (3D-печати) / Деп. в ВИНИТИ 27.06.2019, № 44-В2019. Казань: Казанский гос. архит.-строит. ун-т, 2019. 63 с.

13. *Рахимов Р. З., Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р., Зиганшина Л. В.* Структура и свойства мелкозернистых бетонов для 3D-печати на основе гипсоцементно-пуццолановых сухих строительных смесей // Строительные материалы. 2024. № 7. С. 33–40. DOI 10.31659/0585-430X-2024-826-7-33-40.

14. *Miri Z. S., Baaj H., Polak M. A.* 3D-Printed Concrete Bridges: Material, Design, Construction, and Reinforcement // Applied Sciences. 2025. Vol. 15 (6). 3054. DOI 10.3390/app15063054.1.

15. *Парфиевич А. Н., Черкасов Н. Н.* Методы армирования строительных конструкций при их возведении с применением 3D-принтера // Вестник Брестского государственного технического университета. 2025. № 2 (137). С. 73–77. DOI 10.36773/1818-1112-2025-137-2-73-77.

16. *Chernykh T. N., Komelkova M. V., Wu C., Gorbachevskikh K. A., Gilevich A. A., Orlov A. A.* Shape Memory Polymer Rods for Improving Crack Resistance in Reinforced Concrete Beams // Construction of Unique Buildings and Structures. 2026. Vol. 1 (121). 12102. DOI 10.4123/CUBS.121.2.

17. *Мухаметрахимов Р. Х., Рахимов Р. З., Бурьянов А. Ф., Зиганшина Л. В.* Исследование прочности сцепления слоев в технологии 3D-печати бетоном // Строительные материалы. 2025. № 7. С. 32–37. DOI 10.31659/0585-430X-2025-837-7-32-37.

18. *Jahangir M. H., Ziyaei M., Kargarzadeh A.* Evaluation of thermal behavior and life cycle cost analysis of greenhouses with bio-phase change materials in multiple locations // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 54. 105176. DOI 10.1016/j.est.2022.105176.

19. *Papadaki D., Foteinis S., Binas V., Assimakopoulos M. N., Tsoutsos T., Kiriakidis G.* A life cycle assessment of PCM and VIP in warm Mediterranean climates and their introduction as a strategy to promote energy savings and mitigate carbon emissions // AIMS Materials Science. 2019. Vol. 6 (6). Pp. 944–959. DOI 10.3934/matersci.2019.6.944.

20. *Иноземцев А. С., Королев Е. В.* Модель высокопрочного легкого бетона // Строительные материалы. 2024. № 12. С. 34–41. DOI 10.31659/0585-430X-2024-831-12-34-41. EDN OUKKND.

21. *Иноземцев А. С., Королев Е. В.* Высокопрочные лёгкие бетоны. СПб.: СПбГАСУ, 2022. 192 с.

22. *Soares N., Costa J. J., Gaspar A. R., Santos P.* Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency // Energy and Buildings. 2013. Vol. 59. Pp. 82–103. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.

23. *Chen Y., Ding H., Wang B., Shi Q., Gao J., Cui Z., Wan Y.* Dopamine functionalization for improving crystallization behaviour of polyethylene glycol in shape-

stable phase change material with silica fume as the matrix // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 208. Pp. 951–959. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.207.

24. *Illampas R., Rigopoulos I., Ioannou I.* Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 40. 102328. DOI 10.1016/j.jobe.2021.102328.

25. *Sarı A., Hekimoğlu G., Tyagi V. V., Sharma R. K.* Evaluation of pumice for development of low-cost and energy-efficient composite phase change materials and lab-scale thermoregulation performances of its cementitious plasters // Energy. 2020. Vol. 207. 118242. DOI 10.1016/j.energy.2020.118242.

26. *Peng W., Sadaghiani O. K.* Thermal function improvement of phase-change material (PCM) using alumina nanoparticles in a circular-rectangular cavity using Lattice Boltzmann method // Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 37. 102493. DOI 10.1016/j.est.2021.102493.

27. *Karaman S., Karaipekli A., Sarı A., Biçer A.* Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. Vol. 95 (7). Pp. 1647–1653. DOI 10.1016/J.SOLMAT.2011.01.022.

28. *Sarı A.* Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 117. Pp. 132–141. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.078.

References

1. Inozemtsev A. S. *Sovremennaya teoriya i praktika tekhnologii betonov dlya 3D-pechati v stroitel'stve* [Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction]. *Vestnik MGSU – MGSU Bulletin*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 216–245. DOI 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245.

2. *Sajjad R., Chauhdary S. T., Wei G., Zahid A., Khosa A., Imran M., Sajjad M.* A review of 4D printing — technologies, shape shifting, smart materials, and biomedical applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2024, vol. 7 (1), pp. 20–36. DOI 10.1016/j.aiepr.2023.08.002.

3. *Khoo Z. X., Teoh J. E. M., Liu Y., Chua C. K., Yang S., An J., Leong K. F., Yeong W. Y.* 3D printing of smart materials: a review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015, vol. 10 (3), pp. 103–122. DOI 10.1080/17452759.2015.1097054.

4. *Tamay D. G., Dursun Usual T., Alagoz A. S., Yucel D., Hasirci N., Hasirci V.* 3D and 4D printing of polymers for tissue engineering applications. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2019, vol. 7. 00164. DOI 10.3389/fbioe.2019.00164.

5. Lesovik V. S., Per'kova M. V., Babaev V. B. *Arkhitekturnaya geonika kak mezhdistsiplinarnoe napravlenie v arkhitekturnoy nauke i praktike* [Architectural geonics as an interdisciplinary direction in architectural science and practice]. *Vestnik Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V. G. Shukhova – Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,* 2015, no. 6, pp. 74–79.

6. *Tibbits S.* The emergence of «4D printing»: [video]. *Proceedings of the TED conference. February 2013.* Available at: https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing.

7. *Qiu W., Xu X., Dong K., Wang Y., Xiong Y.* Recent advances in 4D printing of fiber-reinforced polymer composites: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 2024, vol. 283. 111645. DOI 10.1016/j.compositesb.2024.111645.

8. *Ge Q., Sakhaei A. H., Lee H., Dunn C. K., Fang N. X., Dunn M. L.* Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, 31110. DOI 10.1038/srep31110.

9. *Wu J. J., Huang L. M., Zhao Q., Xie T.* 4D printing: history and recent progress. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2018, vol. 36 (5), pp. 563–575. DOI 10.1007/S10118-018-2089-8/METRICS.

10. *Subash A., Kandasubramanian B.* 4D printing of shape memory polymers. *European Polymer Journal*, 2020, vol. 134. 109771. DOI 10.1016/J.EURPOLYMJ.2020.109771.

11. Filipenko P. V., Solonina V. A., Surovtsev I. A. *Optimizatsiya struktury melkozernistogo betona dlya stroitel'noy 3D-pechati* [Optimization of fine-grained concrete structure for 3D construction printing]. *Sovremennoe stroitel'stvo i arkhitektura – Modern Construction and Architecture*, 2022, no. 6 (30), pp. 10–14. Available at: https://doi.org/10.18454/mca.2022.30.6.002.

12. Mukhametrakhimov R. Kh., Lukmanova L. V. *Osnovnye napravleniya optimizatsii struktury i svoystv melkozernistykh betonov, formuemykh metodom posloynogo ekstrudirovaniya (3D-pechati)* [The main directions for optimizing the structure and properties of fine-grained concretes formed by layer-by-layer extrusion (3D printing)]. VINITI 27.06.2019, no. 44-V, 2019. Kazan, Kazan State University of Architecture and Construction Publ., 2019, 63 p.

13. Rakhimov R. Z., Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Ziganshina L. V. *Struktura i svoystva melkozernistykh betonov dlya 3D-pechati na osnove gipsotsementno-putstsolanovykh sukhikh stroitel'nykh smesey* [Structure and properties of fine-grained concrete

for 3D printing based on gypsum-cement-pozzolanic dry building mixtures]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2024, no. 7, pp. 33–40. DOI 10.31659/0585-430X-2024-826-7-33-40.

14. *Miri Z. S., Baaj H., Polak M. A.* 3D-Printed Concrete Bridges: Material, Design, Construction, and Reinforcement. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15 (6), 3054. DOI 10.3390/app15063054.1.

15. Parfievich A. N., Cherkasov N. N. *Metody armirovaniya stroitel'nykh konstruktsiy pri ikh vozvedenii s primeneniem 3D-printera* [Methods of reinforcing building structures during their construction using a 3D printer]. *Vestnik Brestskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Brest State Tech. University*, 2025, no. 2 (137), pp. 73–77. DOI 10.36773/1818-1112-2025-137-2-73-77.

16. *Chernykh T. N., Komelkova M. V., Wu C., Gorbachevskikh K. A., Gilevich A. A., Orlov A. A.* Shape Memory Polymer Rods for Improving Crack Resistance in Reinforced Concrete Beams. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2026, vol. 1 (121), 12102. DOI 10.4123/CUBS.121.2.

17. Mukhametrakhimov R. Kh., Rakhimov R. Z., Bur'yanov A. F., Ziganshina L. V. *Issledovanie prochnosti stsepleniya sloev v tekhnologii 3D-pechati betonom* [Study of the adhesion strength of layers in 3D concrete printing technology]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2025, no. 7, pp. 32–37. DOI 10.31659/0585-430X-2025-837-7-32-37.

18. *Jahangir M. H., Ziyaei M., Kargarzadeh A.* Evaluation of thermal behavior and life cycle cost analysis of greenhouses with bio-phase change materials in multiple locations []. Journal of Energy Storage, 2022, vol. 54. 105176. DOI 10.1016/j.est.2022.105176.

19. *Papadaki D., Foteinis S., Binas V., Assimakopoulos M. N., Tsoutsos T., Kiriakidis G.* A life cycle assessment of PCM and VIP in warm Mediterranean climates and their introduction as a strategy to promote energy savings and mitigate carbon emissions. *AIMS Materials Science*, 2019, vol. 6 (6), pp. 944–959. DOI 10.3934/matersci.2019.6.944.

20. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. *Model' vysokoprochnogo legkogo betona* [Model of high-strength lightweight concrete]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2024, no. 12, pp. 34–41. DOI 10.31659/0585-430X-2024-831-12-34-41.

21. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. *Vysokoprochnye legkie betony* [High-strength light concretes]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2022, 192 p.

22. *Soares N., Costa J. J., Gaspar A. R., Santos P.* Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 2013, vol. 59, pp. 82–103. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.

23. *Chen Y., Ding H., Wang B., Shi Q., Gao J., Cui Z., Wan Y.* Dopamine functionalization for improving crystallization behaviour of polyethylene glycol in shape-stable phase change material with silica fume as the matrix. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 208, pp. 951–959. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.207.

24. *Illampas R., Rigopoulos I., Ioannou I.* Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cement repair mortar. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 40. 102328. DOI 10.1016/j.jobe.2021.102328.

25. *Sarı A., Hekimoğlu G., Tyagi V. V., Sharma R. K.* Evaluation of pumice for development of low-cost and energy-efficient composite phase change materials and lab-scale thermoregulation performances of its cement plasters. *Energy*, 2020, vol. 207. 118242. DOI 10.1016/j.energy.2020.118242.

26. *Peng W., Sadaghiani O. K.* Thermal function improvement of phase-change material (PCM) using alumina nanoparticles in a circular-rectangular cavity using Lattice Boltzmann method. *Journal of Energy Storage*, 2021, vol. 37. 102493. DOI 10.1016/j.est.2021.102493.

27. *Karaman S., Karaipekli A., Sarı A., Biçer A.* Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, vol. 95 (7), pp. 1647–1653. DOI 10.1016/J.SOLMAT.2011.01.022.

28. *Sarı A.* Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 117, pp. 132–141. DOI 10.1016/j.enconman.2016.02.078.