

DOI: 10.18721/JEST.26208
УДК 54.061

Р. Д. Слдоэян, З.А. Михалева, А. Г. Ткачев

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

Создание высококачественных композитов строительного назначения с комплексом улучшенных характеристик имеет большое значение для расширения области их практического применения. Нанотехнологии являются одним из перспективных направлений в совершенствовании структуры и свойств строительных материалов. Представлены результаты экспериментального исследования по применению углеродных наноматериалов в качестве модифицирующего агента композитов строительного назначения с целью оценки влияния углеродных наноструктур на физико-механические характеристики легкого бетона. Предлагается решение проблемы равномерного распределения углеродных нанотрубок в матрице композита за счет введения дисперсии углеродных нанотрубок в воду затворения, после ультразвуковой обработки. Результаты испытаний физико-механических свойств композита показали увеличение прочности легкого бетона на сжатие на 68%, а также снижение водопоглощения и пористости. Обнаружено, что диспергированные УНТ улучшают пористую структуру цементной матрицы, обеспечивая дополнительные центры зародышеобразования для формирования кристаллогидратов силиката кальция, что приводит к более плотной микроструктуре. Наблюдается различие в размере пор и распределении пор в немодифицированном и модифицированном легком бетоне, в котором структура более организована. Выявлено, что даже незначительное содержание УНТ (Таунит) (0.0004–0.0012%) от массы цемента может влиять на микроструктуру пор и свойства композита и, соответственно, значительно улучшает физико-механические характеристики легкого бетона.

Ключевые слова: нанотрубки, поливинилпирролидон, пористость, водопоглощение, плотность, легкий бетон.

Ссылка при цитировании:

Слдоэян Р.Д., Михалева З.А., Ткачев А.Г. Физико-механические свойства композитов строительного назначения с углеродными наноструктурами // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 2. С. 103–113. DOI: 10.18721/JEST.26208

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

R.J. Sldozian, Z.A. Mikhaleva, A.G. Tkachev

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF BUILDING COMPOSITES WITH CARBON NANOSTRUCTURES

Nanotechnology is one of the promising directions in improving the structure and properties of building materials. The paper presents the results of an experimental study on the use of carbon nanomaterials as a modifying agent for building composites with the aim of assessing the effect of carbon nanostructures on the physicomachanical characteristics of lightweight concrete. We propose a solution for the uniform distribution of carbon nanotubes in the composite matrix by introducing a dispersion of carbon nanotubes into the mixing water after ultrasonic treatment.

The test results of the physico-mechanical properties of the composite showed an increase in compressive strength of lightweight concrete by 68%, as well as a decrease in water absorption and porosity. The dispersed CNTs were found to improve the porous structure of the cement matrix, providing additional nucleation centers for the formation of calcium silicate crystalline hydrates, which leads to a denser microstructure. There is a difference in pore size and pore distribution in unmodified and modified lightweight concrete, in which the structure is more organized. It was revealed that even an insignificant concentration of CNTs (Taunit) (0.0004–0.0012%) in proportion to the total weight of cement can affect the pore microstructure and the properties of the composite and, accordingly, significantly improve the physico-mechanical characteristics of lightweight concrete.

Keywords: carbon nanotubes, polyvinylpyrrolidone, porosity, water absorption, density, lightweight concrete.

Citation:

R.J. Sldozian, Z.A. Mikhaleva, A.G. Tkachev, Physico-mechanical properties of building composites with carbon nanostructures, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (02) (2020) 103–113, DOI: 10.18721/JEST.26208

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Создание и использование легких материалов строительного назначения обосновано их физическими свойствами и эксплуатационными характеристиками. Использование легких конструкций позволяет снизить затраты на строительство за счет экономии материалов, шумоизоляции, низкой теплопроводности [1]. Легкий бетон является строительным материалом, в котором поры занимают от 60% до 90% его объема. Преимущества легкого бетона заключаются в более высоком соотношении прочности и веса по сравнению с обычным бетоном, улучшенным по тепло-, звукоизоляции и огнестойкости. Пустоты в легком бетоне образуются за счет использования крупных и легких заполнителей. С другой стороны, образование пустот происходит путем включения или стабилизации воздушных пор внутри связующей пасты, следовательно, могут быть достигнуты плотности ниже 2000 кг/м³ и до 150 кг/м³ [2]. Поры подразделяются на микро-, макрокапилляры и искусственные воздушные пустоты диаметром от 100 нм до 4 мм [3]. Размер пор и микроскопическая структура влияют на прочность, долговечность, теплообмен и влагоперенос. Очень пористый материал обладает повышенными звукоизоляционными и теплозащитными характеристиками, однако, с увеличением объема пор прочность уменьшается, поэтому характеристики пористости и ее влияние на механическую прочность легкого бетона является чрезвычайно важным фактором. На пористость и абсорбционную способность бетона влияет влага, которая остается в бетоне, что также необходимо учитывать при испытаниях [4]. В ряде исследований приводятся методы для оценки пористости путем сушки в печи и повторного насыщения после сушки. Кроме того, неполная сушка приводит к удержанию остаточной влаги в системе пор, особенно в порах меньшего диаметра. Приводятся данные по характеристикам структуры пор цементного раствора, содержащего золу уноса. Установлено, что пуццолановая реакция с золой уноса может привести к значительному снижению пористости, поэтому метод сушки в печи является предпочтительным процессом для оценки пористости. Структура пор оказывает значительное влияние на физико-механические свойства при общем распределении пор по размерам в диапазоне от 5 до 47 нм. Пористость пенобетона в большей степени обусловлена заменой цемента золой уноса до 75%, как классифицированной так и неклассифицированной. Отмечено, что пористость в основном зависит от плотности газобетона, а не от содержания или типа золы уноса. Объем воды, поглощенной газобетоном, в два раза превышал размер цементной пасты [5]. Изучено влияние алюминиевой пудры (0.2–0.8%) на пористость, плотность и прочность на сжатие ячеистых бетонов. Составы с высоким содержанием алюминиевого порошка включали неоднородные

по форме поры, которые были крупнее, чем в составах с низким содержанием алюминиевой пудры. Напротив, плотность и прочность на сжатие немного снизились до 0,4%, а затем увеличились с уменьшением пористости. При большом количестве алюминиевого порошка часть газообразного водорода была неэффективна в порообразовании при взаимодействии гидроксидов и алюминиевого порошка [6, 7].

Исследования в области цемента и нанотехнологий показали, что некоторые добавки к наночастицам цемента допускают значительные изменения в их микроскопической структуре, обеспечивая менее пористые и более долговечные материалы. Среди ряда возможных наноматериалов существуют углеродные нанотрубки. Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой углеродные структуры, которые после синтеза имеют тенденцию образовывать цилиндры в нанометровом масштабе и имеют размеры около 3 нм в диаметре и 1000 нм в длину. По структуре разделяют два типа углеродных нанотрубок: одностенная, состоящая из одного листа графена, свернутого в цилиндрическую трубку, и многостенная, включающая сборку углеродных коаксиальных нанотрубок с несколькими листами графена. Одностенные углеродные нанотрубки трудно синтезировать, что увеличивает их стоимость и практически исключает их применение в больших масштабах [8, 9].

В последнее время все большее внимание уделяется включению наночастиц в строительные материалы для улучшения их механических и электрических характеристик, а также для придания многофункциональности структуре. В соответствующих исследованиях изучалось использование в материалах на основе цемента таких nanoармирующих элементов, как nano- CaCO_3 , nano- SiO_2 , а также углеродных нановолокон, nano-графена и углеродных нанотрубок (УНТ). Сообщалось, что однородно диспергированные наночастицы могут заполнять внутренние пустоты в цементных структурах, что снижает пористость и увеличивает их прочность и долговечность [10, 11].

Целью данной работы является оценка влияния добавок на основе углеродных нанотрубок в строительные композиты на их физико-механические свойства и структуру композита.

Экспериментальная часть

В экспериментальных исследованиях с наномодификаторами для строительных композитов на основе УНТ использовались следующие материалы: портландцемент (М500, Евроцемент, Белгород, Россия), градиентный песок в качестве мелкого заполнителя (Тамбов, Россия), а также вода (водоцементное отношение составляло 0,4); кроме того, для получения легкого бетона был использован пенообразователь, MAXPEN (Воронеж, Россия). УНТ Таунит-24 были изготовлены в ООО «НаноТехЦентр» (Тамбов, Россия) представлена на рис. 1. В работе [12] представлены изображения УНТ, полученные на сканирующем электронном микроскопе. Наружный диаметр УНТ составляет 20-50 нанометров, внутренний диаметр УНТ составляет 10-20 нанометров. В качестве поверхностно-активного вещества при приготовлении дисперсии использовали поливинилпирролидон.

Водоцементное отношение определяли в зависимости от двух параметров: плотности образца и прочности на сжатие [13]. Соотношение компонентов смеси выбирались таким образом, чтобы получить заданную плотность легкого бетона (песок, цемент в соотношении 1:1, пенообразователь 0,5% от массы цемента), водоцементное отношение составляло 0,4. Поливинилпирролидон растворяли в 100 мл воды и перемешивали магнитной мешалкой в течение 10 минут. Затем добавляли УНТ и перемешивали в течение 5 минут вручную в стеклянном стакане. Ультразвуковая обработка раствора проводилась в течение 15 мин с частотой 60 кГц. Соотношение поливинилпирролидона и нанотрубок составляло, 1 часть УНТ: 2 части поливинилпирролидона на 100 мл воды.

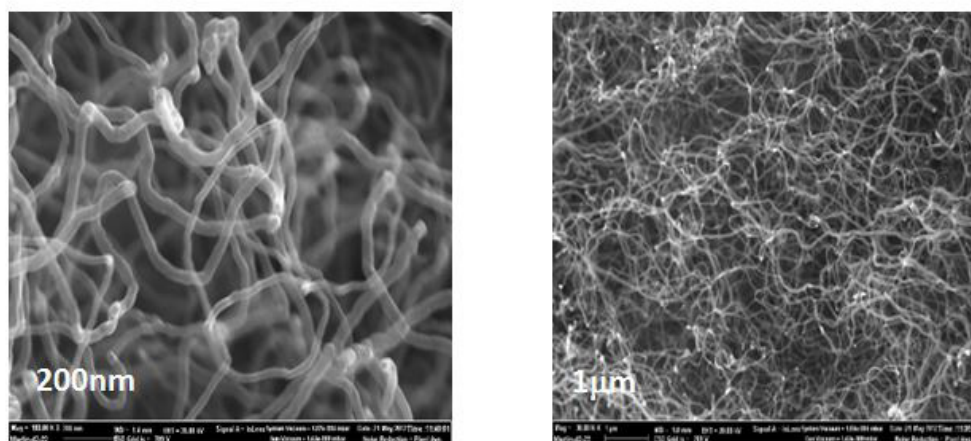


Рис 1. Сканирующая электронная микроскопия УНТ (Таунит-24) [12]

После смешивания компонентов легкого бетона раствор помещали в призматическую форму 40 x 40 x 160 мм. Образцы извлекали из формы через 24 ч после отливки, затем погружали в воду для отверждения при температуре $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно (ГОСТ 31108). Испытание затвердевшего легкого бетона было проведено в соответствии с ГОСТ10180 – 2012 .

Результаты и обсуждение

Важное значение имеет определение оптимального содержания углеродных нанотрубок в композитах, которое обеспечивает максимальный эффект по физико-механическим свойствам материалов. В ряде работ приводятся данные по концентрации УНТ в строительных материалах, так например, результаты исследования армированного неавтоклавного цементного пенобетона показали, что использование углеродных нанотрубок (0.05% по массе) при производстве этих бетонов позволяет снизить его теплопроводность до (12–20)% и увеличить прочность на сжатие до 70% [14]. Результаты следующей работы показывают, что увеличение пропорций функционализированных многослойных углеродных нанотрубок в бетоне увеличивает прочность на сжатие. Фактически прочность на сжатие бетона с долей 0.045% функционализированных многослойных углеродных нанотрубок увеличивается на 26.69%, прочность на разрыв повышается с увеличением количества многослойных углеродных нанотрубок на 66,3%. [15]

В статье по исследованию влияния различных типов углеродных нанотрубок (УНТ) с содержанием 0.05–0.5% не функционализированных и функционализированных УНТ, с различными аспектными отношениями воды к цементу 0.35–0.55 на основные механические свойства показало, что использование УНТ позволило повысить прочность на сжатие до 21% по сравнению с эталонным образцом бетона [16].

В результате экспериментальных исследований представленных в данной работе, установлено, что углеродные нанотрубки образуют более прочную матрицу из бетона за счет уменьшения размера пор и взаимосвязанных каналов (набор соединяющихся плотно упакованных микропор), что обеспечивает плохое перемещение воды через эти микропоры в результате блокирования каналов, сохраняя при этом прочность каркаса. Кроме того улучшение физико-механических свойств неавтоклавного пенобетона после твердения возможно только при усилении пор стенки. Учитывая толщину стенки, эффективное упрочнение может быть достигнуто только углеродными нанотрубками, размеры которых меньше диаметра пор стенки. Углеродные нанотрубки служат центрами кристаллизации гидросиликатов кальция в твердеющем ячеистом бетоне и стимулируют структурообразование твердеющего известково-сили-

катного вяжущего с высокой кристалличностью по сравнению с обычным контрольным образцом и повышением кристалличности, которое наблюдается в стенках пор [20, 21, 22, 23]. Зависимость прочности на сжатие образцов легкого бетона от содержания УНТ представлена на рис. 2. Следует отметить, что увеличение прочностных характеристик наблюдается и при незначительных концентрациях УНТ. В то же время система микропор, которая формируется внутри матрицы, препятствует проникновению воды и поглощению капиллярной влаги. Зависимость водопоглощения легкого бетона от концентрации УНТ представлена на рис. 2.

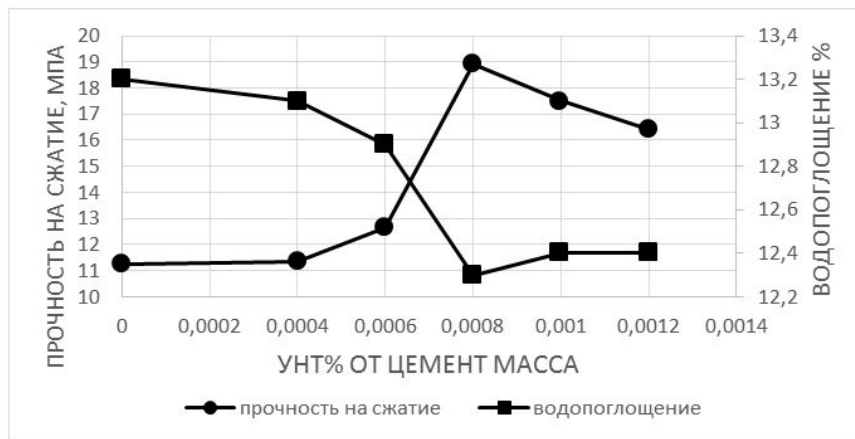


Рис. 2. Влияние концентрации УНТ на прочность при сжатии и на водопоглощение
 Fig. 2. Effect of CNT concentration on compressive strength and water absorption

Независимо от плотности, которая немного увеличивается (рис. 3) немодифицированные образцы, показали неравномерно распределенные поры относительно большого диаметра неправильной формы. На рис. 4 можно отметить различие в размере пор и распределении пор немодифицированных и модифицированных углеродными нанотрубками образцов, которые имеют размер пор или диаметр пор меньше и более организованы.

Кроме того, увеличение плотности показало улучшение в отношении водопоглощения. Это связано с включением углеродных нанотрубок, что улучшает систему пор и обеспечивает лучшее распределения пор и микропор меньшего диаметра, в отличие от образца без УНТ, который содержит неравномерно связанные поры большего размера. Однако эллипсоидальные пузырьки, скорее всего, образуются из пены сурфактанта и локальных сил, вызывающих овальную форму. Более того, эти очень маленькие пузырьки могут быть причиной больших изменений размера пузырьков, что приводит к процессу, сродни созреванию [17]. В результате пузырьки, которые росли в диаметре, оставались окруженными этими маленькими пузырьками в стенке после затвердевания.

В соответствии с предыдущим исследованием [17], размер пузырьков пенобетона увеличился с уменьшением плотности для тех же комбинаций цемента и уменьшением диаметров пузырьков бетоне с дисперсией углеродных нанотрубок, в соответствии с гипотезой, что цемент с углеродными нанотрубками или наночастицы, в общем, образуют более стабильные пузырьки, которые меньше по диаметру. С другой стороны механизм зонирования структуры материала определяется главным образом удельной поверхностной энергией наноразмерных частиц, которая, в свою очередь, является функцией размера частиц и удельной площади их поверхности. По расчетам объем пространства, который энергетически зонирован одна наночастица размером 5–20 нм, может быть не только сопоставим с ее собственным объемом, но и превышать его в 2–3 раза.

С этой точки зрения уменьшение размера наночастиц позволяет не только значительно насыщать энергией микрообъемы материала, но и позволяет снижать дозировку наноразмерных частиц, что благоприятно сказывается на экономической стороне вопроса их применения в технологии бетона. [18,24]

На рис. 5 показано влияние наночастиц на образование пузырьков в пенобетоне.

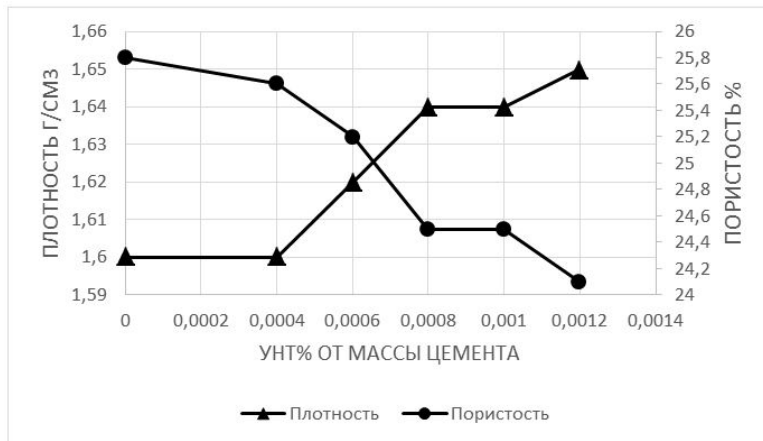


Рис. 3. Влияние концентрации УНТ на плотность и пористость
 Fig. 3. Effect of CNT concentration on the density and porosity

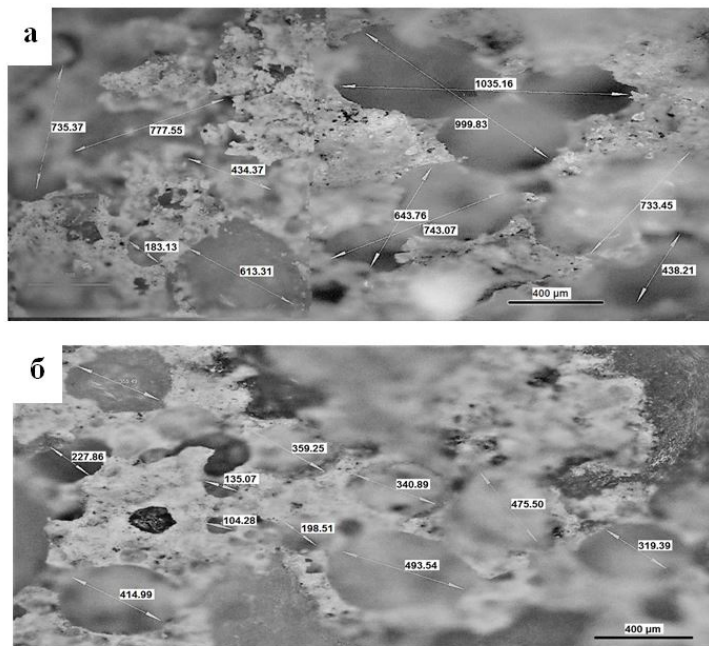


Рис. 4. Оптическая микрофотография структуры легкого бетона:
 (а) немодифицированного, (б) модифицированного УНТ

Fig. 4. Optical micrograph of lightweight concrete structure: (a) unmodified, (b) modified CNTs

Кроме того, снижение пористости можно объяснить влиянием углеродных нанотрубок, заполняющих поры между продуктами гидратации и перекрывающими нано и микрокапиллярные поры (рис 3). Оптимизация пористости нанодобавками в вяжущее композитов является важной, поскольку пористость существенно влияет на механические характеристики,

так как распространение трещин начинается в порах, а нанодобавки необходимы для формирования структуры пор [19].

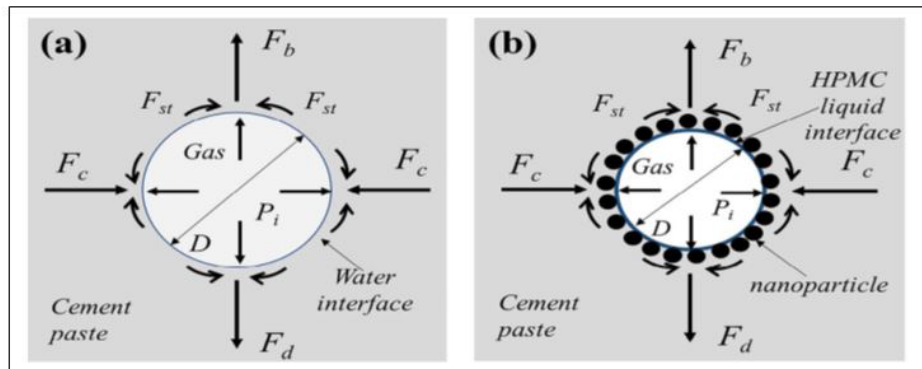


Рис. 5. Схема сил, действующих на (а) пузырек и (б) пузырек, стабилизированный наночастицами при включении в свежую цементную пасту [18]

Fig. 5. Scheme of forces acting on (a) a bubble and (b) a bubble stabilized by nanoparticles when incorporated into a fresh cement paste [18]

Также возможно объяснить повышение физико-механических характеристик добавкой очень низкого количества нанокремнезема к бетону через структурные изменения, новообразования на поверхности твердых фаз частиц цемента и на поверхности углеродных нанотрубок, которые формируют плотный высокопрочный пространственный каркас, объединяющий все компоненты бетона в конгломерат с улучшенными физико-техническими свойствами, включая повышенную прочность, морозостойкость и водонепроницаемость [25]. Для реализации упрочняющего эффекта МУНТ необходимо создать высокую адгезию гидрофильной матрицы бетона к гидрофобной поверхности нанотрубок. Свойства наномодифицированных бетонов во многом зависят от выбранного способа введения углеродных наночастиц в объем материала. В силу высокой поверхностной энергии, углеродные нанотрубки при синтезе образуют глобулы, размеры которых колеблются. При содержании МУНТ в таких малых дозировках механизм модифицирования не может быть объяснен химическим взаимодействием с составляющими цементного камня (свободным гидроксидом кальция). Необходимо учитывать поверхностные явления, возникающие при введении нанодобавки [26].

Заключение

Углеродные наноструктуры в составе легких бетонов могут формировать и направлять процесс гидратационного упрочнения, благодаря образованию различных структур, которые влияют на плотность упаковки цементной матрицы. Установлено, что содержание УНТ (Таунит) даже в малых дозах в диапазоне (0.0004–0.0012%) от массы цемента может влиять на микроструктуру пор и свойства композита и, соответственно, значительно улучшает свойства легкого бетона, такие как (прочность, водопоглощение, плотность и пористость). Использование наномодификаторов в композитах строительного назначения даже в малых концентрациях показало эффективность их применения, экономически обосновано и позволит значительно сократить расходы на связующие и добавки при производстве композитов строительного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Кабай Н., Туфекки М.М., Кизилканат А.Б., Октай Д.** Свойства бетона с использованием порошка пемзы и летучей золы в качестве цементных материалов. Журнал Строительство и строительные материалы. 2015. № 85. С. 1–8.
- [2] **Крамер гл., Рейнхард Х.Ф.Т.** Исследования наноструктурированных трехфазных пен и их применение в пенобетоне – краткий обзор. *Advanced Materials Letters*. 2017. № 8 (11). С. 1072–1079.
- [3] **Шобер Г.** Пористость в автоклавном газобетоне (ААС): обзор структуры пор, типов пористости, методов измерения и влияния пористости на свойства. 5-я Международная конференция по автоклавному газобетону. 2011. № 39–43. Быдгощ, Польша. С. 351–359.
- [4] **Чжан З., Провис Л.Дж., Рейд А., Ван Х.** Механические, теплоизоляционные, термические и акустические свойства абсорбции пенобетона геополимера. Журнал цемента и бетонных композитов. 2015. № 62. С. 97–105.
- [5] **Struhárová A., Rouseková I.** Пористая структура ячеистых бетонов и ее влияние на отдельные физико-механические свойства ячеистых бетонов, Словацкий строительный журнал. 2007. № 2. С. 35–43.
- [6] **Кирсли Е.П., Уэйнрайт П.Дж.** Пористость и проницаемость пенобетона. Журнал исследований цемента и бетона. 2001. № 31 (5). С. 805–812.
- [7] **Гульельми П.О., Сильва В.Р.Л., Репетт В.Л., Хотза Д.** Пористость и механическая прочность автоклавного глинистого ячеистого бетона. Журнал достижений гражданского строительства. 2010. № 2010. С. 6.
- [8] **Раки Л., Бодуан Ж., Ализаде Р., Макара Дж., Сато Т.** Цементная и бетонная наноинженерия и нанотехнологии. Журнал Материалов. 2010. № 3 (2). С. 918–942.
- [9] **Кумар М., Андо Ю.** Химическое паровое осаждение углеродных нанотрубок: обзор механизма роста и массового производства. Журнал нанонауки и нанотехнологий. 2010. № (10.6). С. 3739–3758.
- [10] **Wengui Ли., Хуан Z., Тянью Zu., Caijun Ши., Duan W.Н., Shah S.Р.** Влияние нано известняка на гидратацию, механическую прочность и аутогенную усадку сверхвысокопрочного бетона. Журнал материалов в гражданском строительстве. 2015. № 28 (1). С. 04015068.
- [11] **Бастос Дж., Патино-Барбейто Ф., Патино-Камбейру Ф., Арместо Дж.** Нано-включения, применяемые в цементно-матричных композитах: обзор. Материалы журнала. 2016. № 9 (12). С. 1015.
- [12] Информация доступна на <http://www.nanotc.ru>. (<http://www.nanotc.ru/productions/87-cnmtaunit>).
- [13] **Хамад А.Дж.** Производство материалов, свойства и применение газобетона. Международный журнал материаловедения и инженерии. 2014. № 2 (2). С. 152–157.
- [14] **Яковлев Г., Керене Й., Гайлиус А., Гирнене И.** Пенобетон на цементной основе, армированный углеродными нанотрубками. Материалы материалов [Medžiagotyra]. 2006. № 12 (2). С. 147–151.
- [15] **Abinayaa U., Chetha D., Chathuska S., Praneeth N., Vimantha R., Wijesundara K.К.** Улучшение свойств бетона с помощью углеродных нанотрубок. В Исследовательском симпозиуме SAITM по техническим достижениям. Южно-Азиатский институт технологии и медицины Шри-Ланка. 2014.
- [16] **Хаврин А., Богас Дж. А.** Ползучесть, усадка и механические свойства бетона, армированного различными типами углеродных нанотрубок. Строительство и строительные материалы. 2019. № 198. С. 70–81.
- [17] **Джонс М.Р., Озлутас К., Чжэн Л., Бабу Д.С.** Устойчивость и нестабильность пенобетона. Журнал исследований бетона. 2016. № 68 (11). С. 542–549.

[18] She W., Du Y., Miao C., Liu J., Zhao G., Jiang J., Zhang Y. Применение органических пен и модифицированных наночастиц пенобетона: механизмы усиления и стабилизации, цемент и Конкретный Исследовательский Журнал. 2018. № 106. С. 12–22.

[19] Чуах С., Пан З., Санджаян Дж.Г., Ванг К.М., Дуан В.Х. Наноармированные цементные и бетонные композиты и новые перспективы из оксида графена. Строительство и строительные материалы. 2014. № 73. С.113–124.

[20] Weitzel B., Hansen M.R., Kowald T.L., Müller T., Spiess H.W., Trettin H.F.R. "Influence of multiwalled carbon nanotubes on the microstructure of CSH-phases". Abstracts and Proceedings XII International Congress on the Chemistry of Cement, 3-8 July, Madrid, Spain, (2011) 299.

[21] Weitzel B., Hansen M.R., Kowald T.L., Müller T., Spiess H.W., Trettin H.F.R. "Spectroscopic studies of the influence of multi walled carbon nanotubes on the hydration of tricalcium silicate and microstructure of calcium silicate hydrate phases". Proc. of the 10th International Congress for Applied Mineralogy. (2012) 765–772.

[22] Laukaitis A., Kerienė J., Kligys M., Mikulskis D., Lekūnaite L. Influence of mechanically treated carbon fibre additives on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete. Construction and Building Materials 26 (2012) 362–371.

[23] Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Oreshkin D.V. Cement matrix with carbon nanotubes. Industrial and Civil Construction 7 (2011) 44–45.

[24] Jones M. Roderick, Kezban Ozlutas, Zheng Li. "Stability and instability of foamed concrete." Magazine of Concrete Research 68.11 (2016) 542–549.

[25] Yakovlev G., Pervushin G., Maeva I., Keriene J., Pudov I., Shaybadullina A., Senkov S. Modification of construction materials with multi-walled carbon nanotubes. Procedia Engineering, 57 (2013) 407–413.

[26] Besinis A., De Peralta T., Tredwin C.J., Handy R.D. Review of nanomaterials in dentistry: interactions with the oral microenvironment, clinical applications, hazards, and benefits. ACS nano, 9 (2015) 2255–2289.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЛДОЗЬЯН Рами Джозеф – Аспирант, Тамбовский государственный технический университет, M.Sc.

E-mail: rami_j_ag@yahoo.com

МИХАЛЕВА Зоя Алексеевна – доцент, Тамбовский государственный технический университет, канд. техн. наук.

E-mail: zoyamih3@gmail.com

ТКАЧЕВ Алексей Григорьевич – Зав. кафедрой "Техника и технологии производства нанопроductов", Тамбовский государственный технический университет, д-р техн. наук.

E-mail: postmaster@kma.tstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 10.12.2019

REFERENCES

[1] N. Kabay, M.M. Tufekki, A.B. Kizilkanat, D. Oktay, Svoystva betona s ispolzovaniyem poroshka pemzy i letuchey zoly v kachestve tsementnykh materialov. Zhurnal Stroitelstvo i stroitelnyye materialy. 2015. № 85. S. 1–8.

[2]. gl. Kramer, Kh.F.T. Reynkhard, Issledovaniya nanostrukturirovannykh trekhfaznykh pen i ikh primeneniye v penobetone – kratkiy obzor, Advanced Materials Letters. 2017. № 8 (11). S. 1072–1079.

[3] **G. Shober**, Poristost v avtoklavnom gazobetone (AAC): obzor struktury por, tipov poristosti, metodov izmereniya i vliyaniya poristosti na svoystva, 5-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya po avtoklavnomu gazobetonu. 2011. № 39–43. Bydgoszcz, Polsha. S. 351–359.

[4] **Z. Chzhan, L.Dzh. Provis, A. Reyd, Kh. Van**, Mekhanicheskiye, teploizolyatsionnyye, termicheskiye i akusticheskiye svoystva absorptsii penobetona geopolimera, Zhurnal tsementa i betonnykh kompozitov. 2015. № 62. S. 97–105.

[5] **A. Struhárová, I. Rouseková**, Poristaya struktura yacheistyx betonov i yeye vliyaniye na otdelnyye fiziko-mekhanicheskiye svoystva yacheistyx betonov, Slovatskiy stroitelnyy zhurnal. 2007. № 2. S. 35–43.

[6] **Ye.P. Kirsli, P. Dzh. Ueynrayt**, Poristost i pronitsayemost penobetona, Zhurnal issledovaniy tsementa i betona. 2001. № 31 (5). S. 805–812.

[7] **P.O. Gulyelmi, V.R.L. Silva, V.L. Repett, D. Khotza**, Poristost i mekhanicheskaya prochnost avtoklavnogo glinistogo yacheistogo betona, Zhurnal dostizheniy grazhdanskogo stroitelstva. 2010. № 2010. S. 6.

[8] **L. Raki, Zh. Boduan, R. Alizade, Dzh. Makar, T. Sato**, Tsementnaya i betonnyaya nanonauka i nanotekhnologii. Zhurnal Materialov. 2010. № 3 (2). S. 918–942.

[9] **M. Kumar, Yu. Ando**, Khimicheskoye parovoye osazhdeniye uglerodnykh nanotrubok: obzor mekhanizma rosta i massovogo proizvodstva, Zhurnal nanonauki i nanotekhnologii. 2010. № (10.6). S. 3739–3758.

[10] **Li. Wengui, Z. Khuan, Zu. Tyanyu, Shi. Caijun, W.H. Duan, S.P. Shah**, Vliyaniye nano izvestnyaka na gidratatsiyu, mekhanicheskuyu prochnost i autogennuyu usadku sverkhvysokoprochnogo betona, Zhurnal materialov v grazhdanskom stroitelstve. 2015. № 28 (1). S. 04015068.

[11] **Dzh. Bastos, F. Patino-Barbeyto, F. Patino-Kambeyru, Dzh. Armesto**, Nano-vklyucheniya, primenyayemye v tsementno-matrichnykh kompozitakh: obzor. Materialy zhurnala. 2016. № 9 (12). S. 1015.

[12] Informatsiya dostupna na <http://www.nanotc.ru>. (<http://www.nanotc.ru/productions/87-cnm-taunit>)

[13] **A.Dzh. Khamad**, Proizvodstvo materialov, svoystva i primeneniye gazobetona, Mezhdunarodnyy zhurnal materialovedeniya i inzhenerii. 2014. № 2 (2). S. 152–157.

[14] **G. Yakovlev, Y. Kerene, A. Gaylius, I. Girnene**, Penobeton na tsementnoy osnove, armirovanny uglerodnymi nanotrubkami, Materialy materialov [Medziagotyra]. 2006. № 12 (2). S. 147–151.

[15] **U. Abinayaa, D. Chetha, S. Chathuska, N. Praneeth, R. Vimantha, K.K. Wijesundara**, Uluchsheniye svoystv betona s pomoshchyu uglerodnykh nanotrubok, V Issledovatel'skom simpoziume SAIM po tekhnicheskim dostizheniyam, Yuzhno-Aziatskiy institut tekhnologii i meditsiny Shri-Lanka. 2014.

[16] **A. Khavrin, Dzh.A. Bogas**, Polzuchest, usadka i mekhanicheskiye svoystva betona, armirovannogo razlichnymi tipami uglerodnykh nanotrubok. Stroitelstvo i stroitelnyye materialy. 2019. № 198. S. 70–81.

[17] **M.R. Dzhons, K. Ozlutas, L. Chzhen, D.S. Babu**, Ustoychivost i nestabilnost penobetona, Zhurnal issledovaniy betona. 2016. № 68 (11). S. 542–549.

[18] **W. She, Y. Du, C. Miao, J. Liu, G. Zhao, J. Jiang, Y. Zhang**, Primeneniye organicheskikh pen i modifitsirovannykh nanochastits penobetona: mekhanizmy usileniya i stabilizatsii, tsement i Konkretnyy Issledovatel'skiy Zhurnal. 2018. № 106. S. 12–22.

[19] **S. Chuakh, Z. Pan, Dzh.G. Sandzhayan, K.M. Vang, V.Kh. Duan**, Nanoarmirovannyye tsementnyye i betonnyye kompozity i novyye perspektivy iz oksida grafena, Stroitelstvo i stroitelnyye materialy. 2014. № 73. S. 113–124.

[20] **B. Weitzel, M.R. Hansen, T.L. Kowald, T. Müller, H.W. Spiess, H.F.R. Trettin**, “Influence of multiwalled carbon nanotubes on the microstructure of CSH-phases”, Abstracts and Proceedings XII International Congress on the Chemistry of Cement, 3–8 July, Madrid, Spain, (2011) 299.

[21] **B. Weitzel, M.R. Hansen, T.L. Kowald, T. Müller, H.W. Spiess, H.F.R. Trettin**, “Spectroscopic studies of the influence of multi walled carbon nanotubes on the hydration of tricalcium silicate and microstructure of calcium silicate hydrate phases”, Proc. of the 10th International Congress for Applied Mineralogy. (2012) 765–772.

[22] **A. Laukaitis, J. Kerienė, M. Kligys, D. Mikulskis, L. Lekūnaite**, Influence of mechanically treated carbon fibre additives on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete, *Construction and Building Materials* 26 (2012) 362–371.

[23] **G.I. Yakovlev, G.N. Pervushin, D.V. Oreshkin**, Cement matrix with carbon nanotubes, *Industrial and Civil Construction* 7 (2011) 44–45.

[24] **Jones, M. Roderick, Kezban Ozlutas, Li Zheng**, "Stability and instability of foamed concrete." *Magazine of Concrete Research* 68. 11 (2016) 542–549.

[25] **G. Yakovlev, G. Pervushin, I. Maeva, J. Keriene, I. Pudov, A. Shaybadullina, S. Senkov**, Modification of construction materials with multi-walled carbon nanotubes. *Procedia Engineering*, 57 (2013) 407–413.

[26] **A. Besinis, T. De Peralta, C.J. Tredwin, R.D. Handy**, Review of nanomaterials in dentistry: interactions with the oral microenvironment, clinical applications, hazards, and benefits. *ACS nano*, 9 (2015) 2255–2289.

THE AUTHORS

SLDOZIAN Rami J – *Tambov State Technical University.*

E-mail: rami_j_ag@yahoo.com

MIKHALEVA Zoya A. – *Tambov State Technical University.*

E-mail: zoyamih3@gmail.com

TKACHEV Aleksey G. – *Tambov State Technical University.*

E-mail: postmaster@kma.tstu.ru

Received: 10.12.2019