

Функциональные свойства пенобетона со сверхмалыми добавками углеродных нанотрубок

**Р. Д. Слдозян, А. Г. Ткачев, З. А. Михалева,
А. Е. Бураков, И. В. Буракова**

Исследованы ключевые свойства пенобетона на основе портландцемента, модифицированного добавками углеродных нанотрубок (УНТ) со сверхнизкой концентрацией. Углеродные нанотрубки (Таунит-24) с массовым процентным содержанием 0,0004, 0,0006, 0,0008, 0,001 и 0,0012 % от массы цемента использовали для дисперсного армирования пенобетона, получаемого на основе портландцемента. Для определения прочностных характеристик образцов модифицированного бетона применяли испытательную машину IP-M. Показано, что использование добавок углеродных нанотрубок в концентрациях 0,0004, 0,0006, 0,0008 % при производстве бетонов позволяет увеличивать прочность на сжатие по сравнению с контрольным образцом. При этом прочность на сжатие увеличивается на 1, 12,4 и 68%, соответственно, и уменьшается при концентрациях 0,001 и 0,0012 % с 55,5 до 45,7 %, соответственно. Отмечен положительный эффект добавки УНТ (0,0004, 0,0006 и 0,0008 %) при испытании прочности на изгиб на 3,7, 13,7 и 33,7%, соответственно. При дальнейшем увеличении содержания добавки (0,001 и 0,0012 %) показания снижаются до 20 и 14,8 %, соответственно. При оценке водопоглощения было отмечено снижение значений при добавках 0,0004 и 0,0006 % УНТ. Однако, при высоких значениях концентраций добавок (0,0008, 0,001 и 0,0012 %) установлен самый низкий процент водопоглощения.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, пенобетон, прочность на сжатие, прочность на изгиб, водопоглощение.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-1-49-57

Введение

Пенобетон — это затвердевший вспененный камень, имеющий пористую структуру за счёт замкнутых пор (пузырьков) по всему объёму, и получаемый в результате твердения цемента, песка, воды и пенообразователя. Пена в бетоне генерирует большое количество воздушных пор диаметром от 1 до 3 мм. Следовательно, плотность пенобетона обычно колеблется от 200 до 1600 кг/м³ [1]. В частности, пенобетон низкой плотности (300 кг/м³) считается сверхлегким пенобетоном. Значительные теоретические исследования и инженерный опыт позволяют предположить, что сверхлегкий пенобетон является нестабильным [2]. Возможная нестабильность сверхлегкого пенобетона обычно приводит к низким механическим свойствам, таким как малая

прочность на сжатие и изгиб, которые ограничивают применение этого материала.

Все большее число исследователей пытаются повысить прочность на сжатие и разрыв сверхлегкого пенобетона путем введения различных структурообразующих и армирующих волокон [3 – 6]. Проведенные в последние годы исследования доказали, что введение углеродных нанотрубок (УНТ) эффективно увеличивает прочность на сжатие и разрыв бетона/пенобетона, и на этот эффект существенно влияет качество дисперсии УНТ [7 – 10]. Достижение равномерного распределения УНТ в цементной пасте, которое является ключевым для повышения прочности на сжатие и разрыв пенобетона, осложняется их склонностью к агломерации [7].

В настоящее время существует ряд проблем, которые ограничивают широкое применение пе-

нобетона. Первое — это повышенная усадка при высыхании и риск растрескивания [11]. Вторая проблема — это снижение прочности по сравнению с автоклавным газосиликатным бетоном с такой же плотностью. Поэтому разработка технологии пенобетона должна быть направлена на достижение наилучшего соотношения между механической прочностью материала и плотностью. Использование последних достижений науки о бетоне (таких как использование суперпластификаторов, пуццолановых микро- и нано-наполнителей [12, 13], а также микро- и нановолокон [14]) позволяет улучшить свойства и повысить конкурентоспособность пенобетона на современном рынке строительных материалов. Проблема достижения низкой плотности и локализации усадки может быть решена путем использования легкого заполнителя [15].

Чтобы повысить прочность изделий без изменения их плотности, необходимо увеличить прочность матрицы пенобетона. Это может быть достигнуто путем повышения количества связующих материалов, а также путем уменьшения количества минеральных добавок [16 – 18].

Волокна, имеющие длину от 5 до 20 мм, могут быть добавлены к неавтоклавным цементно-пенобетонам и равномерно распределены по всему объему изделия, но они могут не оказывать влияния на его пористую структуру, поэтому высокодисперсные армирующие волокна обеспечивают лишь незначительное улучшение механических свойств изделий, изготовленных из неавтоклавного бетона. Улучшение физико-механических свойств неавтоклавного пенобетона после затвердевания возможно только при увеличении прочности межпоровых стенок. Принимая во внимание толщину межпоровой стенки, эффективное армирование может быть достигнуто только с помощью волокон наноразмерного диапазона (в частности, углеродных нанотрубок), размеры которых малы по сравнению с размерами стенки.

В природе существуют два материала, которые соответствуют указанным размерным требованиям и могут быть использованы в качестве армирующих элементов: галлузит $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8 \cdot 4 H_2O$ и хризотил $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8 \cdot 4 H_2O$. Оба имеют трубчатую структуру и наноразмерные диаметры кристаллов. Структура этих двух материалов состоит из двухслойных пакетов типа каолинита, где между двумя слоями расположен гексагональный слой молекул воды. В [19] отмечено, что галлузит содержит Cu, Cr, Ni. Минеральный хризотил – асбест используется при дисперсионном арми-

ровании цементных систем. Существует скрытая опасность для здоровья человека при производстве асбестоцементных изделий, а также при обслуживании зданий и сооружений, связанных с использованием асбестовых материалов. Из-за этих недостатков хризотил – асбест необходимо заменить другими дисперсионными усилителями с аналогичными свойствами, которые безопасны в использовании.

Можно предположить, что синтезированные углеродные нанопродукты обладают наиболее близкими к хризотилу характеристиками. Одной из возможных форм углеродных нанопродуктов может быть квазитрубчатая структура, то есть пакет из длинных цилиндров с атомными “лентами”, вырезанными из графитовой сети. Одним из основных элементов такой структуры является графитовый слой. Графитовый слой может образовывать структуру в виде полого цилиндра [20]. Длина нанотрубок может достигать десятков микрометров и в несколько раз превосходить их диаметр, который обычно составляет всего несколько нанометров. В исследованиях [21 – 24] показано, что большинство нанотрубок состоят из нескольких графитовых слоев, расположенных один над другим и “намотанных” вокруг одной общей оси. Способность функциональных групп ориентироваться вдоль оси нанотрубок [25], и в дальнейшем интенсивно формировать кристаллогидратное состояние, позволяет получить композиционную структуру с ультрадисперсным армированием.

Существует ряд работ, доказывающих эффективность применения УНТ при модифицировании бетонов [26, 27]. При модифицировании структуры цементного камня нанодобавками, определяющим в эффективности данного процесса может быть не только изменение кинетики гидратации, но и изменение кинетики прочности (скорости набора прочности, продолжительности достижения “отпускных” и достигаемых предельных значений прочности цементного камня).

Цель настоящей работы — получение наномодифицированных пенобетонов и определение ключевых эксплуатационных свойств конечного продукта в сравнении с контрольными образцами.

Материалы и методы

Материалы для приготовления бетонной смеси

Для приготовления смесей пенобетона с наномодификаторами на основе УНТ были использованы следующие сырьевые компоненты:

Таблица 1
Свойства УНТ “Таунит-24”
Table 1
Properties of Taunit-24 CNTs

Параметр	Значение
Внешний диаметр, нм	20 – 50
Внутренний диаметр, нм	10 – 20
Длина, мкм	≥ 2
Общее количество примесей, %	
начальное	≤ 10
после очистки	≤ 1
Удельная поверхность, м ² /г	≥ 160
Насыпная плотность, г/см ³	0,3 – 0,6

портландцемент М500 (Евроцемент, г. Белгород, Россия) и градиентный песок в качестве мелкого наполнителя, а также обычная водопроводная вода (соотношение вода/цемент составляло 0,4). Для получения пенобетона использовали пенный агент (МАХРЕН, Россия). В работе использованы УНТ “Таунит-24” производства ООО “НаноТехЦентр” (Тамбов, Россия), свойства УНТ представлены в табл. 1.

Поливинилпирролидон (ПВП) низкомолекулярный ПВП 8000 (ООО “АК Синтвита”, Россия) использовали в качестве поверхностно-активного вещества для приготовления дисперсии УНТ. Поливинилпирролидон это белый или светло-желтый слоеный гигроскопичный порошок, легко растворим в воде, спирте, хлороформе, практически нерастворим в эфире. Используется как диспергирующий агент и стабилизатор.

Изображения образцов получены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

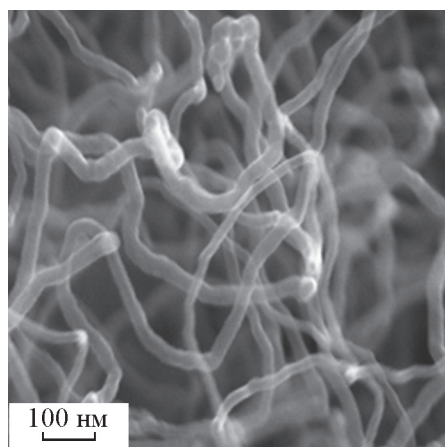


Рис. 1. СЭМ-изображение УНТ.

Fig. 1. SEM-image of CNTs.

с помощью сканирующего электронного микроскопа MERLIN (Carl Zeiss, Йена, Германия). Удельная поверхность была измерена на анализаторе Автосорб-1 (Quantachrome, Одельсхаузен, Германия).

На рис. 1 приведены СЭМ-изображения УНТ “Таунит-24” [28].

Получение пенобетона

Процентное соотношение компонентов бетонной смеси (цемент/песок), используемое в этом исследовании, составляет 1:1. Выбор соотношения воды и цемента зависит от двух важных параметров: плотности бетонного образца и значения прочности на сжатие. ПВП растворяли в 100 мл воды и перемешивали с помощью магнитной мешалки в течение 10 мин. УНТ добавляли и перемешивали в течение 5 мин вручную в стеклянной чашке, а затем полученную суспензию обрабатывали в течение 30 минут с частотой 60 кГц ультразвуком для диспергирования нановолокон [11].

Для получения нанокompозита УНТ/бетон сначала смешивали цемент (1200 г) и песок (1200 г) в сухом состоянии. Затем добавляли воду и готовую суспензию УНТ (0,0004, 0,0006, 0,0008, 0,001 и 0,0012 %) от веса цемента в ПВП. После этого в растворную смесь вносили пенообразователь (6 г) для получения пенобетона (отношение вода/цемент составляло 0,4). Соотношение ПВП и нанотрубок составляло 2:1 на 100 мл воды.

Полученную смесь заливали в призматическую форму размером 40 × 40 × 160 мм. После высыхания образцы извлекали из формы и затем погружали в воду для отверждения при температуре 23 ± 2 °С в течение 28 дней в соответствии с ГОСТ 31108-2016. С использованием указанных пропорций были получены образцы с плотностью 1500 г/см³.

Средние значения прочности на изгиб, а также прочности на сжатие по трем образцам были получены при испытаниях по ГОСТу 310.4-76 на одноосной испытательной машине ИР-М, обеспечивающей нагрузку 2000 кН и скорость нагрузки 0,4 МПа/с.

Испытания образцов пенобетонов на водопоглощение проводили согласно ГОСТ 12730.3-78.

Результаты и обсуждение

Как правило, сопротивление изгибу под нагрузкой, особенно для пенобетона, имеющего много пор, приводит к низкому значению прочности

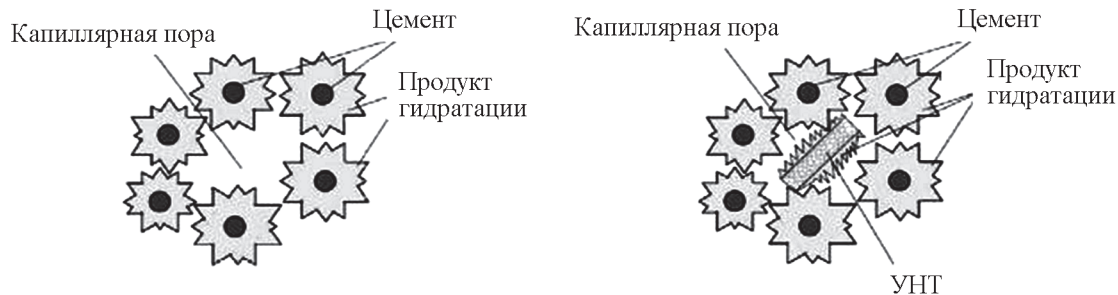


Рис. 2. Схема порового пространства: *a* — бетон без УНТ, *b* — бетон с УНТ.

Fig. 2. Scheme of pore space: *a* — concrete without CNTs, *b* — concrete with CNTs.

на изгиб. Физико-механические характеристики бетона улучшаются при добавлении УНТ, поскольку прочность геля С – S – Н в цементе увеличивается благодаря присутствию УНТ. Предполагаемая схема формирования бетонного порового пространства в присутствии УНТ приведена на рис. 2. Согласно схеме продукты гидратации, образующиеся на поверхности УНТ, заполняют свободное пространство между частицами в структуре порцементного камня, в то время как поры в том же образце без наномодификатора остаются пустыми. В результате происходит уменьшение общей пористости и увеличение плотности бетона, что повышает механические свойства. УНТ обладают превосходными механическими характеристиками при более низкой плотности, и предполагается, что их добавление в бетон может повысить его прочность. Добавление УНТ в бетон контролирует трещины и, в конечном итоге, увеличивает

его прочность и долговечность. Таким образом, материал с меньшей плотностью будет давать большую прочность, уменьшая нагрузку на конструкцию. Снижение расхода материалов уменьшает количество бетона, что напрямую связано с производством цемента. Добавлений углеродных нанотрубок в смесь было очень мало [29], поэтому результаты плотности были очень близки.

Улучшение механических свойств происходило по мере увеличения концентрации УНТ от 0,0004, 0,0006 и до 0,0008 %, но добавление 0,001 и 0,0012 %, по-видимому, уже является избыточной дозой для использованного связующего материала, однако еще обеспечивает положительный эффект по сравнению с контрольным образцом. На рис. 3 показана связь между концентрацией УНТ и значениями прочности на сжатие и на изгиб [26].

Причиной улучшения механических свойств бетона при добавлении УНТ может быть то, что УНТ в бетоне образуют структуру, которая устойчива к растрескиванию под нагрузкой, особенно с точки зрения прочности на изгиб. Добавление наномодификаторов в бетон снизит расход цемента. Увеличение прочности на сжатие указывает на то, что влияние агломерации кластеров нанотрубок было сведено к минимуму благодаря высокому диспергированию УНТ в суспензии. Агломерация, в первую очередь, связана с качеством реализации процессов ультразвуковой обработки и магнитного перемешивания: если нанотрубки не полностью диспергированы, механические свойства бетона не будут улучшаться. УНТ имеют большую удельную поверхность, что, в свою очередь, обеспечивает активное взаимодействие на границах раздела. Наличие соединительных трещин является одним из самых слабых звеньев в формировании гетерогенной бетонной смеси. Введение УНТ заполняет это образующееся пространство и предотвращает

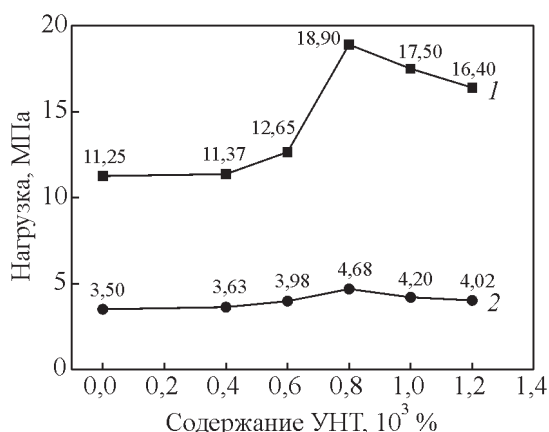


Рис. 3. Влияние концентрации УНТ на прочность на сжатие (1) и на изгиб (2).

Fig. 3 Effect of CNTs concentration on compressive (1) and bending strength (2).

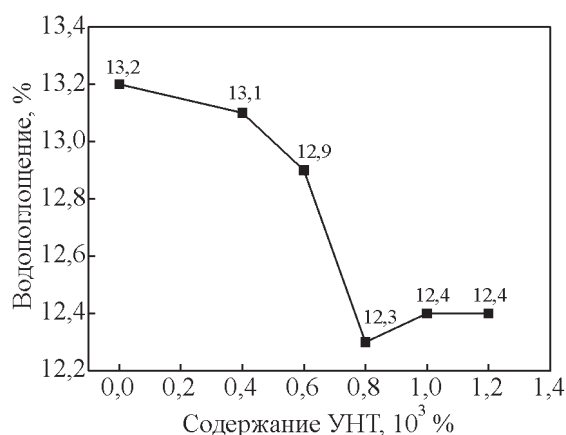


Рис. 4. Влияние концентрации УНТ на водопоглощение.
Fig. 4. Effect of the CNTs concentration on water absorption.

распространение трещин. На рис. 4 показано влияние концентрации УНТ на водопоглощение.

Смеси с более низкой плотностью поглощают больше воды, чем смеси с более высокой плотностью. Из рис. 4 следует, что для пенобетона, армированного УНТ, водопоглощение уменьшилось при добавлении 0,0004, 0,0006, и 0,0008 % нанотрубок. Внесение добавок с концентрациями УНТ в 0,001 и 0,0012 % приводит к увеличению водопоглощения до 12,4 %. Таким образом, максимально процент водопоглощения был снижен на 7,3 % по сравнению с образцом без углеродных нанотрубок.

На рис. 5а и 5b показана взаимосвязь между прочностью на сжатие и водопоглощением, а также прочностью на изгиб и водопоглощением.

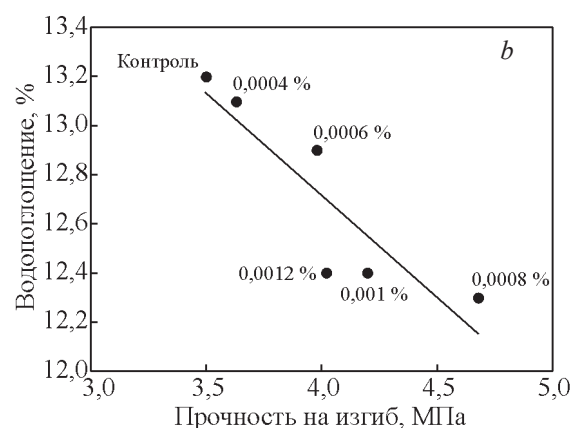
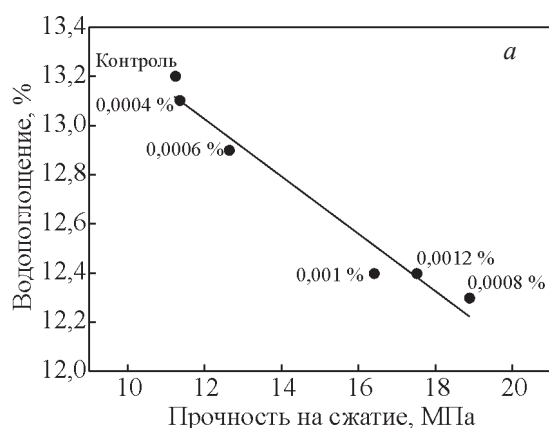


Рис. 5. Зависимости: *a* — прочность на сжатие – водопоглощение, *b* — прочность на изгиб – водопоглощение, для образцов с разным содержанием добавок УНТ.

Fig. 5. Relationship: *a* — compressive strength – water absorption, *b* — bending strength – water absorption, for samples with different contents of CNT additives.

Следует отметить, что водопоглощение уменьшается с добавлением углеродных нанотрубок. Предполагается, что УНТ помогают ускорить процесс гидратации цемента и увеличить содержание комплекса С – S – Н, который, образуясь, помогает заполнить микропоры, что влияет на снижение поглощения и повышение механических свойств. Кроме того, УНТ способствуют снижению скорости поглощения воды, но тенденция изменения скорости поглощения воды в зависимости от количества наноматериала варьируется. Это явление показывает, что внутренние микропоры образцов действительно адекватно заполнены наноматериалами, что приводит к постепенному увеличению компактности, а, следовательно, к увеличению прочности и уменьшению водопоглощения [23].

Учитывая механизм взаимодействия между УНТ и пенобетоном, можно предположить, что применение УНТ может повысить долговечность пенобетона. УНТ оказывает существенное влияние на кинетику гидратации [10], структуру и фазовый состав бетона. Благодаря этому графеновая поверхность УНТ может взаимодействовать с гидрат-ионами, образующимися при растворении фаз клинкера. Особое внимание уделяется взаимодействию Ca²⁺ и УНТ, поскольку развитие прочности бетона и структура цементного камня в основном определяются этими ионами. Взаимодействие между ионами кальция и ароматическим водородом обычно происходит по механизму поляризации. Вода приводит к уменьшению этого взаимодействия из-за высокого значения диэлектрической проницаемости. С другой стороны, электронная

структура углеродных нанотрубок ближе к графену, чем к углеводороду, что говорит о различии в механизме их взаимодействия с ионами кальция [29 – 31].

Выводы

Проведены экспериментальные исследования по оценке влияния добавок УНТ на функциональные свойства пенобетона, а именно – прочность на сжатие, прочность на изгиб и водопоглощение. Рассмотрен концентрационный ряд добавок УНТ — 0,0004, 0,0006, 0,0008, 0,001 и 0,0012 % от массы цемента.

Установлено, что происходит улучшение механических свойств бетона (прочности на сжатие и изгиб) и уменьшение водопоглощения. Дальнейшее увеличение массы нанодобавки приводят к снижению качества конечного продукта. Отмечено, что самый высокий процент снижения водопоглощения достигает значения 7,3 %. Увеличение прочности на сжатие составляет ~ 60 – 70 %, а прочности на изгиб — на 30 – 40 %. Кроме того, учитывая механизм взаимодействия между УНТ и структурой бетона, можно предположить, что применение УНТ повысит его долговечность.

Литература

1. Falliano D., De Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Constr. Build. Mater.*, 2018, v. 165, pp. 735 – 749.
2. She W., Du Y., Miao C., Liu J., Zhao G., Jiang J., Zhang Y. Application of organic- and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: Reinforcement and stabilization mechanisms. *Cem. Concr. Res.*, 2018, v. 106, pp. 12 – 22.
3. Gunawana P., Setionob Foamed lightweight concrete tech using galvalum Az 150 fiber. *Procedia Eng.*, 2014, v. 95, pp. 433 – 441.
4. Vesova L.M. Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete. *Procedia Eng.*, 2016, v. 150, pp. 1587 – 1590.
5. Mahzabin M.S., Hock L.J., Hossain M.S., Kang L.S. The influence of addition of treated kenaf fibre in the production and properties of fibre reinforced foamed composite. *Constr. Build. Mater.*, 2018, v. 178, pp. 518 – 528.
6. Mastali M., Kinnunen P., Isomoisio H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 2018, v. 187, pp. 371 – 381.
7. Eftekhari M., Ardakani S.H., Mohammadi S. An XFEM multiscale approach for fracture analysis of carbon nanotube reinforced concrete. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2014, v. 72, pp. 64 – 75.
8. Zhang S., Luo J., Li Q., Wei X., Sun S. Physico-mechanical and damping performances of carbon nanotubes modified foamed concrete. *Concrete*, 2015, v. 306, pp. 78 – 81.
9. Luo J., Hou D., Li Q., Wu C., Zhang C. Comprehensive performances of carbon nanotube reinforced foam concrete with tetraethyl orthosilicate impregnation. *Constr. Build. Mater.*, 2017, v. 131, pp. 512 – 516.
10. Vaganov V., Popov M., Korjakins A., Šahmenko G. Effect of CNT on microstructure and mineralogical composition of lightweight concrete with granulated foam glass. *Procedia Eng.*, 2017, v. 172, pp. 1204 – 1211.
11. Awang H., Ahmad M.H. Durability properties of foamed concrete with fiber inclusion. *Int. J. Civ. Env. St. Con. & Arc. Eng.*, 2015, v. 8, pp. 269 – 272.
12. Toropovs N., Bajare D., Sahmenko G., Krage L., Korjakins A. The formation of microstructure in high strength concrete containing micro and nanosilica. *Key Engineering Materials*, 2014, v. 604, pp. 83 – 86.
13. Sahmenko G., Juhņevica I., Korjakins A. Influence of Sol-Gel nanosilica on hardening processes and physically-mechanical properties of cement paste. *Procedia Engineering*, 2013, v. 57, pp. 1013 – 1021.
14. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Yakovlev G., Špokauskas A., Aleknevičius M. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes – *Con. & Build. Mat.*, 2013, vol. 49, pp. 527–535.
15. Bajare D., Bumanis G., Korjakins A. New porous material made from industrial and municipal waste for building application. *Mat. Sc. (Medžiagotyra)*, 2014, v. 20, pp. 333 – 338.
16. Kahmer H. Fibrous concrete successfully used in structural precast component production. *Concrete Plant + Precast Technology*, 2001, v. 67(8), pp. 26 – 31.
17. Tagnit-Hamou A., Vanhove Y., Petrov N. Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35(2), pp. 364 – 370.
18. Girnienė I., Laukaitis A. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 2002, v. 8, no. 1, pp. 77 – 82.
19. Пенкаля Т. Очерки кристаллохимии. Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. Л.: Химия, 1974, 496 с.
20. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P.C. Science of fullerenes and carbon nanotubes. Academic Press, 1997, 1216 p.
21. Кодолов В.И., Шабанова И.Н., Макарова Л.Г., Хохлаков Н.В., Кузнецов А.П., Николаева О.А., Керене Я., Яковлев Г.И. Исследование структуры продуктов стимулированной карбонизации ароматических углеводородов. *Журнал структурной химии*, 2001, т. 42, № 2, с. 280 – 286.

22. Ebbesen T.W. Wetting, Filling and decorating carbon nanotubes. *J. Phys. Chem. Solids*, 1996, v. 57(6 – 8), pp. 951 – 955.
23. Zhang X., Cao A., Li Y., Xu C., Liang Ji, Wu D., Wei B. Self-organized arrays of carbon nanotube ropes. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, v. 351, pp. 183 – 188.
24. Kurt R., Bonard J. M., Karimi A. Structure and field emission properties of decorated c/n nanotubes tuned by diameter variations. *Thin Solid Films*, 2001, v. 398 – 399, pp. 193 – 198.
25. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Маева И.С., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Мачюлайтис Р. Модификация ангидридовых композиций многослойными углеродными нанотрубками. *Строительные материалы*, 2010, № 7, с. 25 – 27.
26. Ткачев А.Г., Слдозян Р.Д.А., Михалева З.А., Толчков Ю.Н. Оценка влияния модификатора на основе углеродных нанотрубок с сурфактантами на физико-механические характеристики строительных композитов. *Вестник ТГТУ*, 2019, т. 25, № 4, с. 660 – 670.
27. Толчков Ю.Н., Михалева З.А., Ткачев А.Г. Модифицирование композитов строительного назначения углеродными наноструктурами. *Вестник ТГТУ*, 2019, т. 25, № 1, с. 161 – 172.
28. Информация <http://www.nanotc.ru/>
29. Zhang Jing, Xiangdong Liu. Dispersion performance of carbon nanotubes on ultra-light foamed concrete. *Processes*, 2018, v. 6.10 pp. 194.
30. Chen J., Luo W., Guo A. Preparation of novel carboxylate-rich palygorskite as an adsorbent for Ce³⁺foraqueous solution. *J. Colloid Interface Sci.*, 2018, v. 512, pp. 657 – 664.
31. Ogata T., Narita H., Tanaka M. Adsorption behavior of rare earth elements on silica gelmodified withdiglycol amic acid. *Hydrometallurgy*, 2015, v. 152, pp. 178 – 182.
32. Chao Fu, Chunyan Xie, Jing Liu, Xiuli Wei, Dake Wu. A comparative study on the effects of three nanomaterials on the properties of cement-based composites. *Materials*, 2020, v. 13.4, pp. 857.
4. Vesova L.M. Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete. *Procedia Eng.*, 2016, vol. 150, pp. 1587 – 1590.
5. Mahzabin M.S., Hock L.J., Hossain M.S., Kang L.S. The influence of addition of treated kenaf fibre in the production and properties of fibre reinforced foamed composite. *Constr. Build. Mater.*, 2018, vol. 178, pp. 518 – 528.
6. Mastali M., Kinnunen P., Isomoisio H., Karhu M., Illikainen M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 20-18, vol. 187, pp. 371 – 381.
7. Eftekhari M., Ardakani S.H., Mohammadi S. An XFEM multiscale approach for fracture analysis of carbon nanotube reinforced concrete. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2014, vol. 72, pp. 64 – 75.
8. Zhang S., Luo J., Li Q., Wei X., Sun S. Physico-mechanical and damping performances of carbon nanotubes modified foamed concrete. *Concrete*, 2015, vol. 306, pp. 78 – 81.
9. Luo J., Hou D., Li Q., Wu C., Zhang C. Comprehensive performances of carbon nanotube reinforced foam concrete with tetraethyl orthosilicate impregnation. *Constr. Build. Mater.*, 2017, vol. 131, pp. 512 – 516.
10. Vaganov V., Popov M., Korjakins A., Šahmenko G. Effect of CNT on microstructure and minearological composition of lightweight concrete with granulated foam glass. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 172, pp. 1204 – 1211.
11. Awang H., Ahmad M.H. Durability properties of foamed concrete with fiber inclusion. *Int. J. Civ. Env. St. Con. & Arc. Eng.*, 2015, vol. 8, pp. 269 – 272.
12. Toropovs N., Bajare D., Sahmenko G., Krage L., Korjakins A. The formation of microstructure in high strength concrete containing micro and nanosilica. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 604, pp. 83 – 86.
13. Sahmenko G., Juhņevica I., Korjakins A. Influence of sol-gel nanosilica on hardening processes and physically-mechanical properties of cement paste. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 1013 – 1021.
14. Keriene J., Kligys M., Laukaitis A., Yakovlev G., Špokauskas A., Aleknevičius M. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes. *Con. & Build. Mat.*, 2013, vol. 49, pp. 527 – 535.
15. Bajare D., Bumanis G., Korjakins A. New porous material made from industrial and municipal waste for building application. *Mat. Sc. (Medžiagotyra)*, 2014, vol. 20, pp. 333 – 338.
16. Kahmer H. Fibrous concrete successfully used in structural precast component production. *Concrete Plant + Precast Technology*, 2001, vol. 67(8), pp. 26 – 31.
17. Tagnit-Hamou A., Vanhove Y., Petrov N. Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35(2), pp. 364–370.
18. Girmienė I., Laukaitis A. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase

Reference

1. Falliano D., De Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Constr. Build. Mater.*, 2018, vol. 165, pp. 735 – 749.
2. She W., Du Y., Miao C., Liu J., Zhao G., Jiang J., Zhang Y. Application of organic- and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: Reinforcement and stabilization mechanisms. *Cem. Concr. Res.*, 2018, vol. 106, pp. 12 – 22.
3. Gunawana P., Setionob foamed lightweight concrete tech using galvalum Az 150 fiber. *Procedia Eng.*, 2014, vol. 95, pp. 433 – 441.

- composition of new formations. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 2002, vol. 8, no. 1, pp. 77 – 82.
19. Penkalia T.V. *Ocherki kristalokhimii* [Articles of crystallochemistry]. Ed. Frank Kamenskij. Leningrad, Khimiya Publ., 1974, 496 p. (in Russ.).
 20. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P.C. *Science of fullerenes and carbon nanotubes*. Academic Press, 1997, 1216 p.
 21. Kodolov V.I., Shabanova I.N., Makarova L.G., Khokhriakov N.V., Kuznecov A.P., Nikolaeva O.A., Keriene J., Yakovlev G.I. Issledovaniye struktury produktov stimulirovannoy karbonizatsii aromaticeskikh uglevodorodov [Research of Structure of Products of the Stimulated Carbonization of Aromatic Hydrocarbons]. *Zhurnal strukturnoi khimii — Journal of Structural Chemistry*, 2001, vol. 42, no. 2, pp. 260 – 264 (in Russ.).
 22. Ebbesen T.W. Wetting. Filling and decorating carbon nanotubes. *J. Phys. Chem. Solids*, 1996, vol. 57(6 – 8), pp. 951 – 955.
 23. Zhang X., Cao A., Li Y., Xu C., Liang Ji, Wu D., Wei B. Self-organized arrays of carbon nanotube ropes. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, vol. 351, pp. 183 – 188.
 24. Kurt R., Bonard J. M., Karimi A. Structure and field emission properties of decorated C/N nanotubes tuned by diameter variations. *Thin Solid Films*, 2001, vol. 398 – 399, pp. 193 – 198.
 25. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Maeva I.S., Korzhenko A., Buryanov A.F., Machyulaitis R. Modifikatsiya angidritovykh kompozitsiy mnogosloynymi uglerodnymi nanotrubkami [Modification of anhydrite compositions with multilayer carbon nanotubes]. *Stroitel'nyye materialy — Construction Materials*, 2010, no. 7, pp. 25 – 27.
 26. Tkachev A.G., Sldozyan R.D.A., Mikhaleva Z.A., Tolchkov Yu.N. Otsenka vliyaniya modifikatora na osnove uglerodnykh nanotrubok s surfaktantami na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki stroitel'nykh kompozitov [Assessment of the effect of a modifier based on carbon nanotubes with surfactants on the physico-mechanical characteristics of building composites]. *Vestnik Tambovskogo Gos Tekh Universiteta — Transaction of TSTU*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 660 – 670.
 27. Tolchkov Yu.N., Mikhaleva Z.A., Tkachev A.G. Modifitsirovaniye kompozitov stroitel'nogo naznacheniya uglerodnymi nanostrukturami [Modification of building composites by carbon nanostructures]. *Vestnik Tambovskogo Gos Tekh Universiteta — Transaction of TSTU*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 161 – 172.
 28. Information on <http://www.nanotc.ru/>
 29. Zhang Jing, Xiangdong Liu. Dispersion performance of carbon nanotubes on ultra-light foamed concrete. *Processes*, 2018, vol. 6.10, pp. 194.
 30. Chen J., Luo W., Guo A. Preparation of novel carboxylate-rich palygorskite as an adsorbent for Ce³⁺foraqueous solution. *J. Colloid Interface Sci.*, 2018, vol. 512, pp. 657 – 664.
 31. Ogata T., Narita H.; Tanaka M. Adsorption behavior of rare earth elements on silica gelmodified withdiglycol amic acid. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 152, pp. 178 – 182.
 32. Chao Fu, Chunyan Xie, Jing Liu, Xiuli Wei, Dake Wu. A comparative study on the effects of three nanomaterials on the properties of cement-based composites. *Materials*, 2020, v. 13.4, pp. 857.

*Статья поступила в редакцию — 15.03.2020 г.
после доработки — 30.06.2020 г.
принята к публикации — 2.07.2020 г.*

Слдозян Рами Джозеф — Тамбовский государственный технический университет (392000, Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1), аспирант, специалист в области модифицирования бетонов. E-mail: rami_j_ag@yahoo.com.

Ткачев Алексей Григорьевич — Тамбовский государственный технический университет (392000, Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области синтеза графеновых наноматериалов, исследования их свойств и применения в различных областях.. E-mail: nanotam@yandex.ru.

Михалева Зоя Алексеевна — Тамбовский государственный технический университет (392000, Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1), кандидат технических наук, доцент, специалист в области модифицирования бетонов. E-mail: zoyamih3@gmail.com.

Бураков Александр Евгеньевич — Тамбовский государственный технический университет (392000, Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1), кандидат технических наук, доцент, специалист в области адсорбционных технологий и синтеза УНМ. E-mail: m-alex1983@yandex.ru.

Буракова Ирина Владимировна — Тамбовский государственный технический университет (392000, Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1), кандидат технических наук, доцент, специалист в области адсорбционных технологий и синтеза УНМ. E-mail: iris_tamb68@mail.ru.

Functional properties of foam concrete with ultra-small additives of carbon nanotubes

R. D. Sldozyan, A. G. Tkachev, Z. A. Mikhaleva, A. E. Burakov, I. V. Burakova

We studied the properties of foam concrete based on Portland cement, modified with of the ultra-low concentration carbon nanotubes addition. Carbon nanotubes (Taunit-24) with a mass percentage of 0.0004, 0.0006, 0.0008, 0.001 and 0.0012 % by weight of cement were used for the dispersed reinforcement of foam concrete based on Portland cement. To determine of the modified concrete samples strength characteristics an IP-M testing machine was used. The results of the study showed that the use of the carbon nanotubes additives in concentrations of 0.0004, 0.0006, 0.0008 % allows to gradually increase the compressive strength compared to the control sample. The compressive strength increase on 1, 12.4 and 68 %, respectively, and gradually decreases at concentrations of 0.001 and 0.0012 % from 55.5 to 45.7 %, respectively. A positive effect of the carbon nanotubes additive (0.0004, 0.0006 and 0.0008 %) is also noted when testing the bending strength by 3.7, 13.7 and 33.7%, respectively. With a further increase in the additive content (0.001 and 0.0012 %), the strength decreases to 20 and 14.8 %, respectively. When assessing water absorption, a decrease was showed with additives with concentrations of 0.0004 and 0.0006 %. However, at high concentrations of additives (0.0008, 0.001 and 0.0012 %), the highest percentage of water absorption was established.

Keywords: carbon nanotubes, foam concrete, compressive strength, bending strength, water absorption.

Sldozian Ramie Joseph — Tambov State Technical University (Tambov, 392000, Leningradskaya Str., 1), graduate student, specialist in concrete modification. E-mail: rami_j_ag@yahoo.com.

Tkachev Aleksey — Tambov State Technical University (Tambov, 392000, Leningradskaya Str., 1), Dr Sci (Eng), professor; head of department Equipment and Technologies of Nanoproduct Manufacture, specialist in the synthesis of graphene nanomaterials, investigation of their properties and application in various fields..

Mikhaleva Zoya — Tambov State Technical University (Tambov, 392000, Leningradskaya Str., 1), PhD, assistant professor; specialist in concrete modification. E-mail: zoyamih3@gmail.com.

Burakov Alexander — Tambov State Technical University (Tambov, 392000, Leningradskaya Str., 1), PhD, assistant professor; specialist in adsorption technologies and carbon nanomaterials synthesis. E-mail: m-alex1983@yandex.ru.

Burakova Irina — Tambov State Technical University (Tambov, 392000, Leningradskaya Str., 1), PhD, assistant professor; specialist in adsorption technologies and carbon nanomaterials synthesis. E-mail: iris_tamb68@mail.ru.