

in a technical university / Proceedings of the VI Intern. scientific and methodological conference. - Gomel, - 2019 - p.1-6.

УДК 691.542:338.583

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО НАНОКРЕМНЕЗЕМА И МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

*Е. Н. Полонина<sup>1</sup>, С. Н. Леонович<sup>2</sup>, И. В. Шаниukeвич<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологии строительства Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: grushevskaya\_en@tut.by*

<sup>2</sup> *Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологии строительства Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: sleonovich@mail.ru*

<sup>3</sup> *К. э. н., доцент, доцент кафедры экономики, организации строительства и управления недвижимостью Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: shaniukevich@gmail.com*

### Реферат

В данной статье определяется стоимость комплексной добавки, разработанной на основе сочетания малых доз наночастиц SiO<sub>2</sub> и многослойных углеродных нанотрубок, исходя из рыночной стоимости входящих в состав ее компонентов, и рассчитывается экономический эффект от применения комплексной добавки. Использование в комплексной добавке малых доз привело к тому, что произошло повышение физико-механических характеристик бетона при одновременном снижении стоимости 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси.

**Ключевые слова:** комплексная добавка, наночастицы, гидротермальный кремнезем, многослойные углеродные нанотрубки, экономический эффект.

## DETERMINATION OF THE ECONOMIC EFFECT FROM THE USE OF A COMPLEX ADDITIVE FOR CONCRETE BASED ON HYDROTHERMAL NANOSILICA AND MULTILAYER CARBON NANOTUBES

**E.N. Polonina, S.N. Leonovich, I.V. Shaniukevich**

### Abstract

In this article the cost of the complex additive developed on the basis of small doses of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and multilayer carbon nanotubes is determined based on the cost of its components, and the economic effect of the use of a complex additive is calculated. The use of small doses in the complex additive led to an increase in the physical and mechanical characteristics of concrete while reducing the cost of 1 m<sup>3</sup> of concrete mixture.

**Key words:** complex additive, nanoparticles, hydrothermal silica, multilayer carbon nanotubes, economic effect.

### Введение

Материальные затраты во многих отраслях, особенно в строительной, составляют существенную долю в структуре всех затрат при производстве продукции. В связи с чем, снижение и оптимизация затрат является одним из направлений совершенствования деятельности любого предприятия, что позволяет в том числе снизить стоимость производимой продукции. В свою очередь, потребителю интересна не только цена, но и самые значимые характеристики продукции.

Одним из направлений снижения материалоемкости и экономии без потери качества строительной продукции и сохранении высоких ее эксплуатационных свойств является эффективность применения строительных материалов, в частности, бетона как наиболее распространенного. Это возможно не только путем повышения его физико-механических характеристик, но и снижением стоимости его составляющих, что может быть реализовано за счет применения различных модификаторов и пластификаторов.

Анализ научных исследований (таблица 1) показал, что наночастицы (далее – НЧ), вводимые в состав бетона, применяются в большом диапазоне [1-18], что ограничивает их применение в промышленном масштабе из-за высокой стоимости конечного продукта. Поэтому использование малых доз наночастиц, в несколько сотен раз ниже уже исследованных, является одним из возможных вариантов более рентабельного применения наночастиц.

Таблица 1 – Количество предлагаемых различными авторами к применению наночастиц в долях от массы цемента

Автор	Количество НЧ, % от массы цемента	
	МУНТ	SiO <sub>2</sub>
Полонина Е.Н.	0,00002-0,0009	0,000001-0,00008
Гуриненко Н.С.	-	0,25-1,0
Рябчиков П.В.	0,005-0,1	-
Марко О.Ю.	0,005	-
Zhang P. (Чанг)	-	2,0-5,0
Bahadori, H.	-	1,0-3,0
Khaloo, A.	-	1,75
Ji, T.	-	0,3
Du, H.	-	0,9
Li, G.Y.	0,5	-
Makar, J.M.	2,0	-
Wansom, S.	0,1-0,75	-
Habermehl - Cwirzen, K.	0,045-0,15	-
Shah, S.P.	0,02-0,1	-

Следует отметить, что применение нанотехнологий позволят избежать основной проблемы изготовления бетона – микротрещин, которая усиливается в процессе эксплуатации.

С учетом эффективности применения, затрат на производство, возможности стабилизированного однородного ввода в бетонную смесь и наличия действующих крупных производств авторами для исследований были выбраны наночастицы гидротермального золя кремнезема и многослойные углеродные нанотрубки, в следствии чего впервые было произведено комплексное сочетание данных наноконпонентов и разработана комплексная добавка. Введение комплексной добавки в бетон, содержащей в своем составе наночастицы гидротермального кремнезема  $\text{SiO}_2$  (далее -  $\text{SiO}_2$ ) и многослойные углеродные нанотрубки (далее - МУНТ) дал структурный эффект, переходящий в эффекты повышения физико-механических характеристик [19-25]. Дальнейшей целью в рамках данной статьи является определение экономического эффекта от применения разработанной комплексной добавки.

### **Материалы и методы**

Характеристики компонентов комплексной добавки следующие:

– гидротермальный золь нанокремнезема: содержание  $\text{SiO}_2$  в золе -120 г/дм<sup>3</sup>, плотность  $\rho=1075$  г/дм<sup>3</sup>, общее солесодержание - 1720 мг/дм<sup>3</sup>, рН=9,2, удельная площадь поверхности 500 м<sup>2</sup>/г и средний диаметр первичных наночастиц  $\text{SiO}_2$  5,5 нм.

– МУНТ: средний диаметр трубок и волокон 10-300 нм, средняя длина трубок и волокон 0,01-20 мкм, насыпная плотность 0,15-0,22 г/см<sup>3</sup>, зольность не более 5%, удельная адсорбционная поверхность от 60 м<sup>2</sup>/г;

– суперпластификатор (далее - СП) в виде водного раствора - поликарбоксилатный сополимер WBK плотностью 1,1-1,14 г/мл, рН=6-8, вязкостью 230-330 сПз, содержание нелетучих веществ 39-41%, водоредуцирующей способностью до 40 %.

Технология получения комплексной нанодобавки состоит в следующем: в приготовленную водную суспензию наночастиц МУНТ (ТУ 2111-001-97849280-2014) добавляется отмеренное количество золя гидротермального нанокремнезема  $\text{SiO}_2$  (ТУ ВУ 691460594.002-2016) и перемешивают в смесителе, снабженном высокооборотистой мешалкой, в течении 40 минут. Таким образом, наночастицы МУНТ и  $\text{SiO}_2$  равномерно распределяются в объеме дисперсии, что придает им большую устойчивость к расслоению, а комбинированная композиция – приобретает соответствующие свойства.

При применении комбинированную композицию – добавку – смешивали с небольшим количеством воды и вводили к компонентам бетонной смеси. Для изготовления бетонной смеси дозируется крупный и мелкий заполнители, портландцемент и производится смешивание сухих компонентов в течении нескольких минут до однородной массы. Далее в смесь, при постоянном перемешивании, добавляется вода совместно с комплексной добавкой (содержание суперпластификатора 0,32-0,4%, наночастиц  $\text{SiO}_2$  0,000001 – 0,00008% и наночастиц МУНТ 0,00002-0,0009% от массы цемента) в количестве от 0,5 до 0,8 % от массы цемента для получения необходимой подвижности смеси с В/Ц= 0,3 - 0,4.

### **Определение экономического эффекта**

Для оценки и сопоставления стоимости бетонной смеси (в бел. руб/м<sup>3</sup>) для Серий 1-5 (составы которых указаны в табл. 3-7) была применена упрощенная

оценка, которая базируется на определении экономического эффекта от изменения в составах бетона при фиксированном содержании основных материалов с заменой используемой добавки на комплексную.

В силу отсутствия достоверной информации о ценах в открытой печати стоимость комплексной добавки рассчитывалась, исходя из рыночной стоимости входящих в состав ее компонентов (табл.1). Стоимость компонентов принята согласно данным, предоставленным производителями наночастиц ООО «Передовые исследования и технологии» и ООО НПФ «Наносилика». Следует отметить, что стоимость наночастицы МУНТ взята максимальная и в зависимости от объема и полученного результата при производстве и последующей реализации она может быть снижена, по предварительным данным, до 25 коп. за 1 г.

Таблица 2 – Расчет стоимости комплексной добавки

Основные компоненты комплексной добавки	Расход, г	Стоимость, бел. руб. за 1г	Сумма, бел. руб.
Наночастицы МУНТ	0,005	2,5	0,0125
Суперпластификатор (СП)	49,15	0,002925	0,1437
Гидротермальные наночастицы SiO <sub>2</sub>	0,000749	0,088	0,0000659
Вода	49,15+1,699	0, 000 001	0,0000508
<i>Стоимость 100 г</i>	100	-	0,15635
<i>Стоимость 1 кг</i>	-	-	1,5635

Экономический эффект (Э, руб/ м<sup>3</sup> бетона) примененной в бетоне комплексной добавки (КД) определялась как разница между стоимостями 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси при замене в рецептурах бетона традиционно используемых во время строительства на БелАЭС добавок (C<sub>б(АЭС)</sub>) на разработанную комплексную добавку (C<sub>б(КД)</sub>):

$$\mathcal{E} = C_{б(АЭС)} - C_{б(КД)}, \text{ руб/м}^3 \quad (1)$$

Для расчета из прейскурантов заводов – производителей были взяты стоимостные показатели основных компонентов бетона (табл. 2). При этом принималась соразмерность затрат на транспортировку и перемешивание бетонной смеси.

Таблица 3 – Стоимость добавок и основных материалов

Основные материалы	Стоимость, бел. руб	
	за 1 кг	за 1 т
Цемент М500-Д0	0,22	220
Щебень фр 5-20мм	0,026	26,34
Щебень фр 5-10мм	0,029	29,36
Песок	0,007	7,43
Расширяющая добавка РСАМ	0,105	-
Микрокремнезем конденсированный МКУ-85	2,61	-
Добавка «SikaViscoCrete 3190»	4,3	-
Добавка «SikaViscoCrete 5-600»	6,3	-
Добавка «Линамикс ПК»	5,32	-
Добавка «Линамикс СП-180»	2,3	-
Комплексная добавка (КД)	1,5635	-

Стоимость бетонной смеси ( $C_6$ ) определялась ее составом и стоимостью компонентов (без учета воды), результаты для Серий 1-5 представлены в таблицах 3-7:

$$C_6 = Ц \cdot C_ц + Щ \cdot C_щ + П \cdot C_п + Д \cdot C_д, \text{ руб/м}^3 \quad (2)$$

где  $Ц$ ,  $Щ$ ,  $П$  и  $Д$  – соответственно расход цемента, щебня, песка и добавок в бетоне;

$C_ц$ ,  $C_щ$ ,  $C_п$  и  $C_д$  – соответственно рыночная стоимость цемента, щебня, песка и добавок в бетоне.

После таблиц, знаком (\*) обозначены характеристики бетона, которые были повышены при испытаниях, с использованием комплексной добавки.

Таблица 4 – Расчет стоимости бетонной смеси для Серии 1 (бетон \*В25 (С20/25) W6 F100)

№ п/п	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси					Стоимость бетонной смеси, бел. руб/м <sup>3</sup>
	Цемент ПЦ 500-Д0	Щебень фр. 5-20 мм	Песок	КД	Добавка «Линамикс СП-180»	
1	400	1020	820	3,2 (0,8% от массы цемента)	-	125,26
2				-	7,88 (1,97% от массы цемента)	138,38

*\*по факту получен бетон В45(С35/45) W20 F300*

Таблица 5 – Расчет стоимости бетонной смеси для Серии 2 (бетон \*В30 (С25/30) W8 F500)

№ п/п	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси					Стоимость бетонной смеси, бел. руб/м <sup>3</sup>
	Цемент ПЦ 500-Д0	Щебень, фр. 5-20 мм	Песок	КД	Добавка «SikaViscoCrete 5-600»	
1	445	1035	820	2,225 (0,5% от массы вяжущего)	-	134,03
2				-	6,0 (1,35% от массы вяжущего)	168,35

*\*по факту получен бетон В45(С35/45) W20 F600*

Таблица 6 – Расчет стоимости бетонной смеси для Серии 3 (бетон \*В30 (С25/30) W8 F200 СУБ)

№ п/п	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси					Стоимость бетонной смеси, бел. руб/м <sup>3</sup>
	Цемент ПЦ 500-Д0	Щебень, фр. 5-10 мм	Песок	КД	Добавка «Линамикс ПК»	
1	460	880	950	2,3 (0,5% от массы вяжущего)	-	136,97
2				-	4,6 (1,0% от массы вяжущего)	157,84

*\*по факту получен бетон В30(С25/30) W8 F400 СУБ*

Таблица 7 – Расчет стоимости бетонной смеси для Серии 4 (бетон \*B60 (C50/60) W6 F200 СУБ)

№ п/п	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси							Стоимость бетонной смеси, бел. руб/м <sup>3</sup>
	Цемент ПЦ 500-Д0	РСА М	МКУ-85	Щебень, фр. 5-10 мм	Песок	КД	Добавка «SikaViscoCrete 3190»	
1	485	40	45	880	950	4,56 кг (0,8 % от массы цемент+РСАМ+МКУ-85)	-	267,65
2						-	8,55 кг (1,5 % от массы цемент+РСАМ+МКУ-85)	297,29

*\*по факту получен бетон B60(C50/60) W6 F300 СУБ*

Таблица 8 – Расчет стоимости бетонной смеси для Серии 5 (бетон \*B30 (C25/30) W8 F500)

№ п/п	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси					Стоимость бетонной смеси, бел. руб/м <sup>3</sup>
	Цемент ПЦ 500-Д0	Щебень, фр. 5-20 мм	Песок	КД	Добавка «SikaViscoCrete 5-600»	
1	445	1035	820	3,56 (0,8% от массы вяжущего)	-	136,12
2				-	6,0 (1,35% от массы вяжущего)	168,35

*\*по факту получен бетон B45(C35/45) W20 F600*

В итоге экономический эффект от применения комплексной добавки в бетонной смеси, выявленный при производственной апробации, без учета стоимости воды, для Серий 1- 5 ( $\mathcal{E}_{1-5}$ ) составил:

$$\mathcal{E}_1 = 138,38 - 125,26 = 13,12 \text{ бел. руб/м}^3;$$

$$\mathcal{E}_2 = 168,35 - 134,03 = 34,32 \text{ бел. руб/м}^3;$$

$$\mathcal{E}_3 = 157,84 - 136,97 = 20,88 \text{ бел. руб/м}^3;$$

$$\mathcal{E}_4 = 297,29 - 267,65 = 29,64 \text{ бел. руб/м}^3;$$

$$\mathcal{E}_5 = 168,35 - 136,12 = 32,23 \text{ бел. руб/м}^3.$$

## Заключение

Таким образом, использование в комплексной добавке малых доз гидротермальных наночастиц  $\text{SiO}_2$  и наночастиц МУНТ привело к тому, что произошло повышение физико-механических характеристик бетона за счет направленного действия наночастиц на структуру С-S-H геля при одновременном снижении стоимости каждого  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси (до 34 бел. руб). Следует отметить, что экономический эффект наблюдается не только за счет более низкой стоимости комплексной добавки по сравнению с другими, что может быть скорректировано в зависимости от условий и факторов ее производства, а также изменения цен на компоненты, но более существенное влияние оказывает применение более малых доз – в десятки раз меньших по сравнению с исследуемыми диапазонами вводимых добавок в строительные материалы. Даже при изменении цен на другие компоненты бетонной смеси эффект от применения более малых доз сохранится, что особенно будет ощутимо при возведении крупных и высотных объектов. Также повышение класса бетона при применении комплексной добавки позволит использовать его на объектах строительства с более высокими требованиями к параметрам бетона, что даст большой положительный экономический эффект из-за разницы цен.

## Список цитированных источников

1. Гуриненко, Н.С. Технология и свойство бетона с полифункциональной добавкой, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / Н.С. Гуриненко; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2020. – 25 с.
2. Рябчиков, П.В. Технология и физико-технические свойства тяжелого бетона, модифицированного углеродными наноматериалами: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / П.В. Рябчиков; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2017. – 28 с.
3. Марко, О.Ю. Технология термосного бетонирования с применением комплексной химической добавки, содержащей углеродный материал: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / О.Ю. Марко; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2022. – 26 с.
4. Zhang, P. Fracture properties of steel fiber reinforced high performance concrete containing nano- $\text{SiO}_2$  and fly ash/ P. Zhang, C.H. Liu, Q.F. Li, T.H. Zhang, P. Wang // Current Science. –2014. –Vol. 106, № 7. – pp. 980–987.
5. Zhang, P. Study on notch sensitivity of fracture properties of concrete containing nano- $\text{SiO}_2$  particles and fly ash/ P. Zhang, Q.Y. Guan, C.H. Liu, Q.F. Li. // Journal of Nanomaterials . –2014. – pp. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/381682>
6. Zhang, P. Influence of nano- $\text{SiO}_2$  on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review/ P. Zhang, J. Wan, K. Wang, Q.Li// Construction and Building Materials. –2017. –Vol. 148, № 1. – pp. 648–658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>
7. Zhang, M. H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement /M.-h. Zhang, H. Li // Construction and Building Mate-

rials. –2011. –Vol. 25, № 2. – pp. 608–616. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.032>

8. Bahadori, H. Reduction of cement consumption by the aid of silica nanoparticles (investigation on concrete properties) / H. Bahadori, P. Hosseini. // *Journal of Civil Engineering and Management*. –2012. –Vol. 18, № 3. – pp. 416–425. DOI: 10.3846/13923730.2012.698912

9. Khaloo, A. Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete/ A. Khaloo, M.H. Mobini, P. Hosseini. // *Construction and Building Materials*. –2016. –Vol. 113. – pp. 188-201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041>

10. Ji, T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> /T. Ji // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Vol. 35, №10. – pp. 1943–1947. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004>

11. Du, H. Durability performances of concrete with nano-silica / H. Du, S. Du, X. Liu // *Construction and Building Materials*. – 2014. –Vol. 73. – pp. 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014>

12. Li, G.Y. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes/ G. Y.Li, P. M. Wang, X.Zhao// *Carbon*. –2005. –Vol. 43, № 6. – pp. 1239–1245. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017>

13. Li, G.Y. Pressure-sensitive and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites/ G. Y.Li, P. M.Wang, X.Zhao // *Cement and Concrete Composites*. – 2007. –Vol. 29, № 5. – pp. 377–382. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011>

14. Makar, J.M. Carbon nanotubes and their application in the construction industry/ J.M. Makar, J.J. Beaudoin// *Proceedings of the 1st International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Royal Society of Chemistry. –2003. – pp. 331-341.

15. Makar, J.M. Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications / J.M. Makar, J. C. Margeson, J. Luh // *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials, Performance, Innovations and Structural Implications*, Vancouver, B.C., Canada. –2005. – pp. 1-10.

16. Wansom, S., Kidner, N.J., Woo, L.Y., Mason, T.O.: AC-impedance response of multi-walled carbon nanotube/cement composites / S.Wansom, N.J.Kidner, L.Y.Woo, T.O. Mason // *Cement and Concrete Composites*. – 2006. – Vol. 28, № 6. – pp. 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.014>

17. Habermehl - Cwirzen, K. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites/ K. Habermehl - Cwirzen, V. Penttala, A. Cwirzen // *Advances in Cement Research*. –2008. –Vol. 20, № 2. – pp. 65–73. DOI: 10.1680/adcr.2008.20.2.65

18. Shah, S.P. Nanoscale modification of cementitious materials / S. P. Shah, M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, P. Mondal // *Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction)*. –2005. – pp. 125–30.

19. Способ модифицирования бетона комплексной добавкой, включающей гидротермальные наночастицы SiO<sub>2</sub> и многослойные углеродные нанотрубки:



патент РФ №2750497, СПК С04В 28/04, С04В 14/06, С04В 24/04, В82У 30/00 / В.В. Потапов, Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, С.А. Жданок. - № 2020138511; заявл. 23.11.2020; дата публикации 28.06.2021г.

20. Жданок, С.А. Модификация цементных бетонов добавками, содержащими наноразмерные материалы / С.А. Жданок, В.В. Потапов, Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. - 2020. - Том 93, №3 (май-июнь). – С. 669-673.

21. Полонина, Е.Н. Механизм повышения прочности цементно-водных образцов, модифицированных наночастицами SiO<sub>2</sub> и МУНТ / Е.Н. Полонина, В.В. Потапов, С.А. Жданок, С.Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. - 2021. - Том 94, №1 (январь-февраль). –С. 72-83.

22. Полонина, Е.Н. Технология бетона, модифицированного комплексной добавкой гидротермального нанокремнезема и многослойных углеродных нанотрубок/ Е.Н. Полонина // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. - 2021. - №2 (125). – С. 27-34.

23. Полонина, Е.Н. Применение метода наноиндентирования для изучения структуры модифицированного цементного камня / Е.Н. Полонина, О. Lahayne, J. Eberhardsteiner, В.В. Потапов, С.А. Жданок, С.Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. - 2021. Том 94, №5 – С.1221-1234

24. Жданок, С. А. Синергетическое влияние наночастиц SiO<sub>2</sub> и углеродных нанотрубок на свойства бетона / С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 109–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112>

25. Ковшар, С.Н. Оценка седиментационной устойчивости комплексной нанодобавки/ С.Н. Ковшар, Е.Н. Полонина, С.А. Жданок, С.Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. - 2022. Том 95, №4 –С. 969-976.

## References

1. Gurinenko, N.S. Tekhnologiya i svojstvo betona s polifunkcional'noj dobavkoj, soderzhashchej ul'tradispersnyj mikrokremnezem: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchennoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.05 / N.S. Gurinenko; Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk, 2020. – 25 s.

2. Ryabchikov, P.V. Tekhnologiya i fiziko-tekhnicheskie svojstva tyazhelogo betona, modifitsirovannogo uglerodnymi nanomaterialami: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchennoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.05 / P.V. Ryabchikov; Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk, 2017. – 28 s.

3. Marko, O.YU. Tekhnologiya termosnogo betonirovaniya s primeneniem kompleksnoj himicheskoy dobavki, soderzhashchej uglerodnyj material: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchennoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.05 / O.YU. Marko; Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – Minsk, 2022. – 26 s.

4. Zhang, P. Fracture properties of steel fiber reinforced high performance concrete containing nano-SiO<sub>2</sub> and fly ash/ P. Zhang, C.H. Liu, Q.F. Li, T.H. Zhang, P. Wang //Current Science. –2014. –Vol. 106, № 7. – pp. 980–987.

5. Zhang, P. Study on notch sensitivity of fracture properties of concrete containing nano-SiO<sub>2</sub> particles and fly ash/ P. Zhang, Q.Y. Guan, C.H. Liu, Q.F. Li. // Journal of Nanomaterials . –2014. – pp. 1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/381682>

6. Zhang, P. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review/ P. Zhang, J. Wan, K. Wang, Q.Li// *Construction and Building Materials*. –2017. –Vol. 148, № 1. – pp. 648–658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>
7. Zhang, M. H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement /M.-h. Zhang, H. Li // *Construction and Building Materials*. –2011. –Vol. 25, № 2. – pp. 608–616. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.032>
8. Bahadori, H. Reduction of cement consumption by the aid of silica nanoparticles (investigation on concrete properties) / H. Bahadori, P. Hosseini. // *Journal of Civil Engineering and Management*. –2012. –Vol. 18, № 3. – pp. 416–425. DOI: 10.3846/13923730.2012.698912
9. Khaloo, A. Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete/ A. Khaloo, M.H. Mobini, P. Hosseini. // *Construction and Building Materials*. –2016. –Vol. 113. – pp. 188-201.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041>
10. Ji, T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>/T. Ji // *Cement and Concrete Research*. – 2005. – Vol. 35, №10. – pp. 1943–1947. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004>
11. Du, H. Durability performances of concrete with nano-silica / H. Du, S. Du, X. Liu // *Construction and Building Materials* . – 2014. –Vol. 73. – pp. 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014>
12. Li, G.Y. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes/ G. Y.Li, P. M. Wang, X.Zhao// *Carbon*. –2005. –Vol. 43, № 6. – pp. 1239–1245. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017>
13. Li, G.Y. Pressure-sensitive and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites/ G. Y.Li, P. M.Wang, X.Zhao // *Cement and Concrete Composites*. – 2007. –Vol. 29, № 5. – pp. 377–382. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011>
14. Makar, J.M. Carbon nanotubes and their application in the construction industry/ J.M. Makar, J.J. Beaudoin// *Proceedings of the 1st International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Royal Society of Chemistry. –2003. – pp. 331-341.
15. Makar, J.M. Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications / J.M. Makar, J. C. Margeson, J. Luh // *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials, Performance, Innovations and Structural Implications*, Vancouver, B.C., Canada. –2005. – pp. 1-10.
16. Wansom, S., Kidner, N.J., Woo, L.Y., Mason, T.O.: AC-impedance response of multi-walled carbon nanotube/cement composites / S.Wansom, N.J.Kidner, L.Y.Woo, T.O. Mason // *Cement and Concrete Composites*. – 2006. – Vol. 28, № 6. – pp. 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.014>
17. Habermehl - Cwirzen, K. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites/ K. Habermehl - Cwirzen, V. Penttala, A. Cwirzen // *Advances in Cement Research*. –2008. –Vol. 20, № 2. – pp. 65–73. DOI: 10.1680/adcr.2008.20.2.65
18. Shah, S.P. Nanoscale modification of cementitious materials / S. P. Shah, M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, P. Mondal // *Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction)*. –2005. – pp. 125–30.

19. Sposob modifitsirovaniya betona kompleksnoj dobavkoj, vklyuchayushchej gidrotermal'nye nanochasticy SiO<sub>2</sub> i mnogoslujnye uglerodnye nanotrubki: patent RF №2750497, СРК S04V 28/04, S04V 14/06, S04V 24/04, B82Y 30/00 / V.V. Potapov, E.N. Polonina, S.N. Leonovich, S.A. ZHDanok. - № 2020138511; zayavl. 23.11.2020; data publikacii 28.06.2021g.

20. ZHDanok, S.A. Modifikaciya cementnyh betonov dobavkami, soderzhashchimi nanorazmernye materialy / S.A. ZHDanok, V.V. Potapov, E.N. Polonina, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2020. - Tom 93, №3 (maj-iyun'). –С. 669-673.

21. Polonina, E.N. Mekhanizm povysheniya prochnosti cementno-vodnyh obrazcov, modifitsirovannyh nanochasticami SiO<sub>2</sub> i MUNT / E.N. Polonina, V.V. Potapov, S.A. ZHDanok, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2021. - Tom 94, №1 (yanvar'-fevral'). –С. 72-83.

22. Polonina, E.N. Tekhnologiya betona, modifitsirovannogo kompleksnoj dobavkoj gidrotermal'nogo nanokremnezema i mnogoslujnyh uglerodnyh nanotrubok/ E.N. Polonina // Vestnik BrGTU. Stroitel'stvo i arhitektura. - 2021. - №2 (125). – S. 27-34.

23. Polonina, E.N. Primenenie metoda nanoindentirovaniya dlya izucheniya struktury modifitsirovannogo cementnogo kamnya / E.N. Polonina, O. Lahayne, J. Eberhardsteiner, V.V. Potapov, S.A. ZHDanok, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2021. Tom 94, №5 – С.1221-1234

24. ZHDanok, S. A. Sinergeticheskoe vliyanie nanochastic SiO<sub>2</sub> i uglerodnyh nanotrubok na svojstva betona / S. A. ZHDanok, S. N. Leonovich, E. N. Polonina // Dokl. Nac. akad. nauk Belarusi. – 2022. – Т. 66, № 1. – S. 109–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112>

25. Kovshar, S.N. Ocenka sedimentacionnoj ustojchivosti kompleksnoj nanodobavki/ S.N. Kovshar, E.N. Polonina, S.A. ZHDanok, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2022. Tom 95, №4 –С. 969-976.

УДК 691: 035.267

## **ТЕПЛО- И ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

*С. А. Романовский<sup>1</sup>, А. А. Бакатович<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Магистр технических наук, ассистент кафедры строительного производства Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь,  
e-mail : s.romanovskiy@psu.by*

<sup>2</sup> *К. т. н., доцент, доцент кафедры строительного производства Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь,  
e-mail : a.bakatovich@psu.by*

### **Реферат**

Рассмотрены результаты исследований тепло- и гидрофизических характеристик теплоизоляционных плит, полученные на основе структурообразующего сырья растительного происхождения - очесов или волокон льна, а также мине-