

УДК 691.12:691.3

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА АРБОЛИТОБЕТОНА

Д-р техн. наук Е. С. Шинкевич, Д. С. Линник (ОГАСА)

## БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ АРБОЛІТОБЕТОНУ

Д-р техн. наук О. С. Шинкевич, Д. С. Линник (ОДАБА)

## MULTIPARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF PAPERCRETE

Dr. sc. Sciences E.S. Shinkevich, D.S. Linnik

*Целью исследования является получение арболитобетона пониженной плотности. Выполнен выбор и обоснование вида вяжущего для арболитобетона, систематизация полученных данных. Подобрано оптимальное соотношение компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее». Сделан подбор оптимального соотношения между фракциями органического наполнителя. Проведена многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона плотностью  $\rho < 400 \text{ кг/м}^3$  методами математического моделирования по показателям прочности и средней плотности с учетом состава композиционного гипсового вяжущего, фракционного состава костры и соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее». Оптимальные составы арболитобетона обеспечивают класс прочности В0,35 и В0,5 плотностью  $\rho \leq 300 \text{ кг/м}^3$ .*

**Ключевые слова:** *экостроительство, экоматериал, энергосбережение, наполнитель, костра, арболитобетон, модель, оптимизация, фракция, состав.*

*Метою дослідження є отримання арболітобетону зниженої щільності. Виконано вибір і обґрунтування виду в'язучого для арболітобетону, систематизація отриманих даних. Підібране оптимальне співвідношення компонентів у системі «органічний заповнювач – в'язуче». Зроблено підбір оптимального співвідношення між фракціями органічного заповнювача. Проведена багатопараметрична оптимізація складу арболітобетону щільністю  $\rho < 400 \text{ кг/м}^3$  методами математичного моделювання за показниками міцності та середньої щільності з урахуванням складу композиційного гіпсового в'язучого, фракційного складу костриці та співвідношення компонентів у системі «органічний заповнювач – в'язуче». Оптимальні склади арболітобетону забезпечують клас міцності В0,35 та В0,5 щільністю  $\rho \leq 300 \text{ кг/м}^3$ .*

**Ключові слова:** *екобудівництво, екоматеріал, енергозбереження, заповнювач, костриця, арболітобетон, модель, оптимізація, фракція, склад.*

*In the article provides a brief overview of the specific features of cellulose-containing aggregates of plant origin. The degree of influence of these features of cellulose-containing aggregates of plant origin on the processes of structure formation and the physical and mechanical properties of arbolitic concrete is shown. The aim of the study is to obtain an arbolite concrete of reduced density. The choice and justification of the type of binder for arbolitic concrete, the systematization of the obtained data was made. Composites based on cellulose-containing aggregate with various kinds of binder are analyzed. The optimum ratio of components in the system "organic filler - astringent". The selection of the optimal ratio between fractions of organic aggregate is made. Based on the results of experimental data, ES models of the influence of the*

*fractional composition of organic aggregate on the properties of arbolitic concrete are calculated. The multiparametric optimization of the composition of arbolitic concrete with a density  $\rho < 400 \text{ kg / m}^3$  was carried out using mathematical modeling methods for strength and average density parameters, taking into account the composition of the composite gypsum binder, the fractional composition of the bonfire, and the ratio of the components in the "organic filler-binder" system. The optimal compositions of ablit-concrete provide a strength class of B0.35 and B0.5 with a density  $\rho \leq 300 \text{ kg / m}^3$  for these strength classes for arbolitic concrete. The developed compositions of arbolitic concrete on the complex of quality criteria are optimized.*

**Keyword:** green building, eco-material, energy saving, filler, bonfire, arbolitobeton, model, optimization, fraction, composition.

**Вступление.** Экостроительство положительно влияет и создает комфорт для человека и окружающей среды. Одним из основных критериев создания и выбора материалов для экостроительства с точки зрения «стабильного развития среды обитания» является прохождение экоматериалом полного жизненного цикла от создания до утилизации с минимальным ущербом для окружающей среды и человека. Актуальной задачей строительной отрасли является разработка ресурсосберегающих технологий, которые обеспечивают экономию топливно-сырьевых материалов и улучшают технико-экономические показатели работы предприятия. Не менее актуальной задачей является получение экологически безопасных, низкоэнергетических и комфортных строительных материалов. Одним из таких видов экоматериалов является арболит – легкий бетон на основе различных видов органических целлюлозных заполнителей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время научный и практический интерес к арболитобетону, как к экологически чистому, энергосберегающему и комфортному материалу, наблюдается в таких странах: США, Канада, Великобритания, Австрия, Франция, Швеция, Финляндия, Украина, Япония и др. Исследования отечественных и зарубежных ученых посвящены вопросам структурообразования, технологии получения и оптимизации составов арболитобетонных материалов. Проблема получения качественных изделий из

арболитобетона заключается в подборе вида вяжущего, оптимизации его компонентов, исследовании влияния фракционного состава органического заполнителя на свойства арболитобетона. Анализ литературных источников показал, что обычные типы вяжущего – цемент, известь – заменяются в работах на альтернативные материалы, такие как MgO и цеолит [1–7]. Экспериментальные результаты механических свойств арболитобетона показывают, что использование цеолита как замена цемента не обеспечивает высокую механическую прочность арболитобетона, но оксид магния является подходящей заменой для цемента в легких композитах [5–7]. Однако плотность полученных изделий довольно высокая и составляет 790–1200 кг/м<sup>3</sup>. Использование извести в качестве вяжущего не обеспечивает высокой прочности при сжатии и составляет 0,3–0,4 МПа при плотности 300 кг/м<sup>3</sup> [1–4].

Что касается вопроса подбора и оптимизации фракционного состава органического заполнителя, то в литературных источниках отсутствует информация о подборе фракционного состава костры с помощью метода экспериментально-статистического моделирования. Обычно авторами используются усредненные значения длины частиц костры, рассчитанные по гранулометрическому анализу [4, 6, 7]. Таким образом, теряется важный объем данных, учитывающий не только влияние каждой фракции отдельно на свойства, но и их синергизм.

**Определение цели и задачи исследования.** Цель исследования – получение арболитобетона пониженной плотности. Задачи исследования: 1) выбор и обоснование вида вяжущего для арболитобетона, систематизация полученных данных; 2) подбор оптимального соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее»; 3) подбор оптимального соотношения между фракциями органического наполнителя; 4) многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона плотностью  $\rho < 400 \text{ кг/м}^3$ .

**Основная часть исследования.** Одним из способов получения композиционных материалов с заданными свойствами является оптимизация их состава. Оптимизация в настоящем исследовании проводится по экспериментально-статистическим (ЭС) моделям [8]. Важными аспектами любой оптимизационной задачи является улучшение свойств, уменьшение расхода дорогостоящих компонентов и снижение себестоимости конечной продукции. Арболит – это сложный композит, состоящий из системы вяжущего и органического наполнителя. Оптимизация состава арболита представляет собой решение многих задач, поэтому рационально оптимизацию его состава проводить поэтапно.

На первом этапе исследования обоснован подбор основных компонентов вяжущего, добавок и выполнен подбор состава вяжущего. В поисковых исследованиях по подбору состава вяжущего для арболитобетона предусмотрен широкий набор вариантов. Выбор вариантов исходил из соображений, связанных с определенными ограничениями и начальными условиями, продиктованными требованиями технологичности получения композита, затрат на исходные материалы, прогнозируемыми производственными затратами, длительностью технологического цикла получения строительных изделий из композита и др. В составе этих

требований особое место уделяется вопросам экологичности и биостойкости [9]. В поисковых экспериментальных исследованиях использованы сырьевые материалы: цемент, гипс, известь, магнезиальное вяжущее, жидкое натриевое стекло [10–11].

На основании проведенных поисковых исследований для различных видов и вариантов вяжущего можно говорить о достоинствах и недостатках каждого вида вяжущего. Цемент широко используется как основа для производства арболита. Составы на цементном вяжущем показывают высокую прочность и стойкость к влагопеременным воздействиям, но имеют повышенную плотность и требуют обработки целлюлозного наполнителя минерализаторами. Известь широко используется при производстве арболита за рубежом. Изделия на извести имеют низкую плотность, достаточную прочность. Недостаток известкового вяжущего – медленный набор марочной прочности изделий. Известны разработки, в которых в качестве вяжущего для арболита применялось жидкое стекло. Достоинством этого вяжущего является то, что оно хорошо связывается с кострой и в сочетании с добавками обеспечивает материалу с таким наполнителем необходимую биостойкость, огнестойкость и достаточную механическую прочность. На его твердение не оказывают влияния сахара и реактивные вещества, находящиеся в древесине. Однако данное вяжущее обладает высокой стоимостью. Гипс является наиболее перспективным материалом для изделий из арболитобетона. Композиты на основе гипса имеют хорошее сцепление костры с вяжущим; прочностные показатели удовлетворительны; распалубочная прочность достигается через 3–5 ч (в зависимости от марки гипса, сроков схватывания, водогипсового отношения); проблемы с сахарами для этого вида вяжущего не так актуальны. После

твердения композит на гипсе характеризуется относительно невысокой влажностью. Гипс, обладая коротким сроком схватывания, ограничивает время формирования материала. Для замедления начала схватывания потребовалось введение добавок – замедлителей гидратации гипса.

На втором этапе исследования проведен подбор оптимального соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее», которое обеспечивает получение арболитобетона плотностью ниже минимально нормированной в стандартах для заданной прочности. Условия задачи второго этапа исследования приведены в таблице.

На рис. 1, 2 представлены графики изменения физико-механических свойств арболитобетона в зависимости от содержания вяжущего по отношению к содержанию органического наполнителя.

Из графиков, представленных на рис. 1, 2, можно сделать заключение, что при соотношении органического наполнителя к вяжущему от 1:1,5 до 1:1 (мас.ч.) плотность арболитобетона  $\rho$  – 270÷300 кг/м<sup>3</sup>,  $R_{сж}$  – 0,25÷0,50 МПа,  $W_o$  – 55÷35 %. Таким образом, в диапазоне исследуемых составов по соотношению компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее» прочность изменяется до 1,7 раз. При содержании вяжущего в смеси от 1,4 до 2 ощутимо уменьшается водопоглощение по объему – до 30 %. В результате для дальнейших экспериментальных исследований рекомендованы соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее» 1:1,4 и 1:1,5. Соотношение 1:1,5 органической части к неорганической берется за основу при подборе соотношения фракционного состава органического наполнителя, который обеспечит плотность  $\rho < 400$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблица

Условия оптимизации системы «вяжущее – органический наполнитель»

Свойство	Нормированные уровни свойств по ДСТУ Б В.2.7.-271:2011	Заданные уровни свойств (марка)
Прочность при сжатии, МПа (Класс В)	В 0,35 при $\rho=400-450$ кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж} \geq 0,45$ МПа (В0,35)
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	400–500 кг/м <sup>3</sup>	$\rho \leq 300$ кг/м <sup>3</sup>
Водопоглощение по объему $W_o$ , %	–	$W_o \rightarrow min$

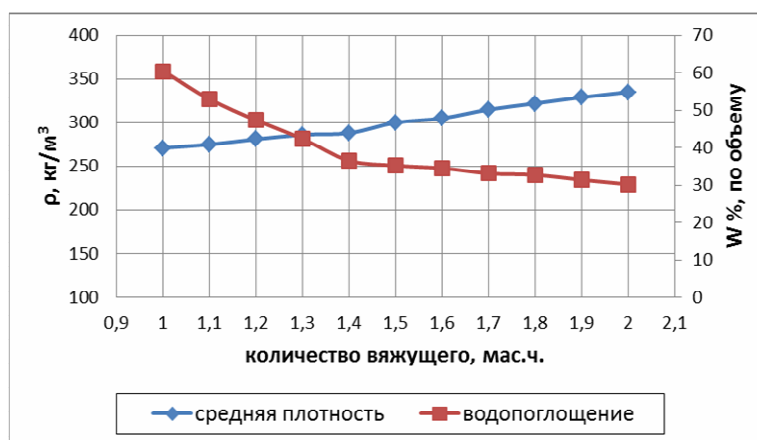


Рис. 1. Зависимость средней плотности и водопоглощения от количества вяжущего в арболитовых образцах

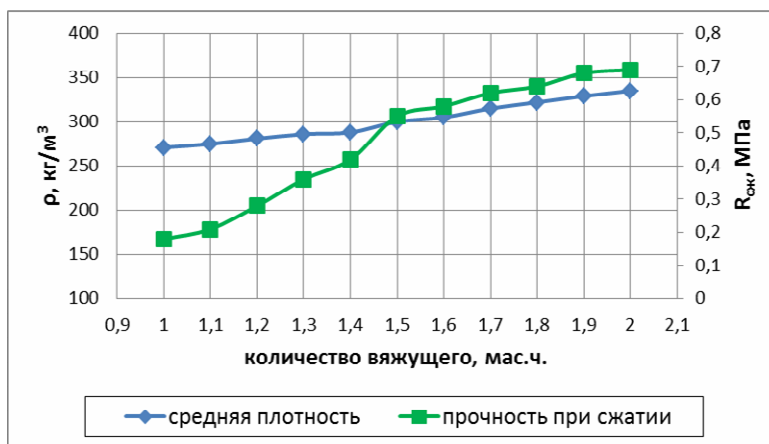


Рис. 2. Зависимость средней плотности и прочности при сжатии от количества вяжущего в арболитовых образцах

На третьем этапе исследования проведена оптимизация фракционного состава органического заполнителя. Эксперимент по оптимизации фракционного состава органического заполнителя поставлен по симплекс-решетчатому плану Шеффе для смесей. Расчет ЭС моделей, визуализация графической части выполнены в программе STATISTICA. В эксперименте варьировалось три независимых фактора: крупная фракция органического заполнителя размером  $X = 10\text{--}20$  мм, средняя фракция органического заполнителя размером  $Y = 5\text{--}10$  мм, мелкая фракция органического заполнителя размером  $Z = 2,5\text{--}5$  мм. Фракции органического заполнителя более 20 мм и менее 2,5 мм не анализировались в силу их

незначительного нормированного содержания в заполнителе. Оценка фракционного состава органического заполнителя определялась по показателям частных остатков на ситах в соответствии со стандартом (ДСТУ Б В.2.7-271:2011 «Арболит и изделия из него; общие технические условия»).

В результате реализации эксперимента получены трехфакторные смесевые ЭС модели, описывающие изменение прочности при сжатии и плотности под влиянием фракционного состава заполнителя. Зависимость прочности на сжатие от соотношения количества разных фракций органического заполнителя описывается моделью 1:

$$R_{сж} = 0,47 * x + 0,5 * y + 0,46 * z - 0,02 * x * y - 0,1 * x * z + 0,16 * y * z + 1,32 * x * y * z \quad (1)$$

Зависимость плотности от соотношения количества разных фракций

органического наполнителя описывается моделью 2:

$$\rho = 285 * x + 310 * y + 314 * z + 18 * x * y + 30 * x * z - 3,9999 * y * z + 57 * x * y * z \quad (2)$$

По ЭС моделям (1) и (2) проанализировано влияние фракционного состава органического заполнителя на свойства арболитобетона. Оценка влияния каждого фактора (фракция органического

наполнителя) на соответствующее значение свойств (прочность при сжатии, плотность) выполнялась по графикам, представленным на рис. 3, 4.

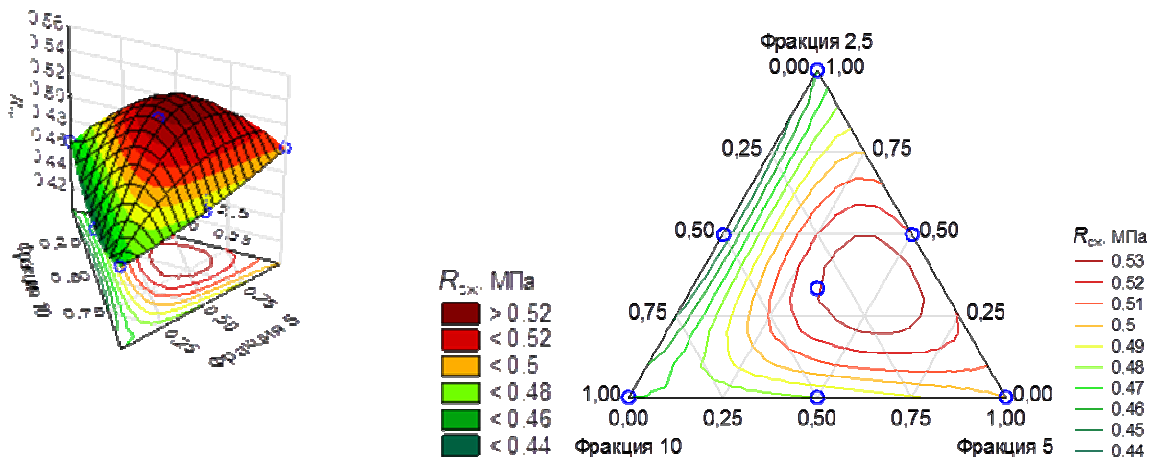


Рис. 3. Влияние фракционного состава органического заполнителя на предел прочности при сжатии арболитобетона

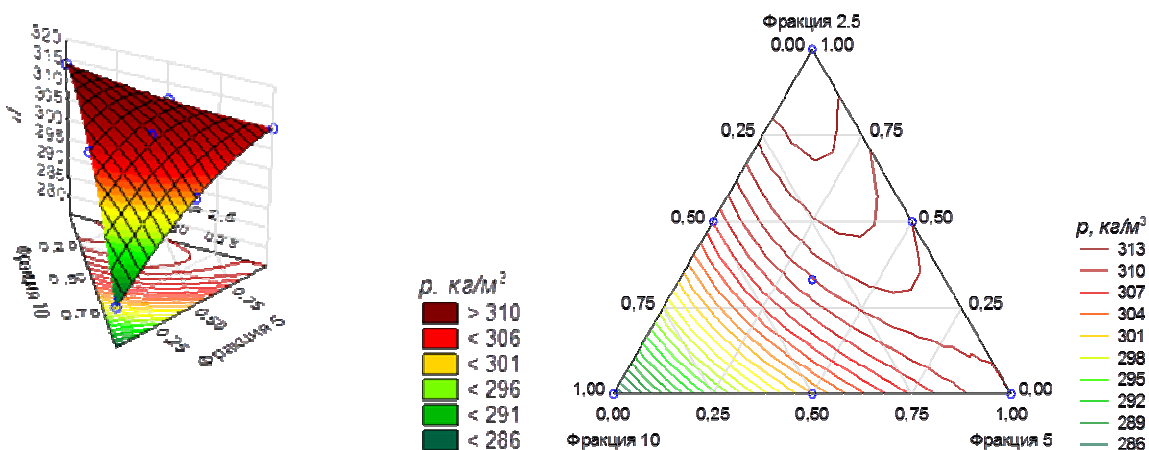


Рис. 4. Влияние фракционного состава органического заполнителя на плотность арболитобетона

Анализ графиков показывает, что при содержании крупной фракции (размером  $\geq 10$  мм) в количестве от 50 до 100 % и содержании средней фракции (размером  $\geq 5$  мм) в количестве от 0 до 50 % обеспечивается значительное снижение плотности – до  $285 \text{ кг/м}^3$ . Влияние мелкой фракции (размером  $\geq 2,5$  мм) на прочность незначительно.

На заключительном этапе исследований по результатам предыдущих трех этапов проведена многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона. Результаты многопараметрической

оптимизации фракционного состава органического заполнителя, а также область расположения фракционного состава в рекомендованных по стандартам пределах по полным остаткам на контрольных ситах проиллюстрированы на треугольной диаграмме (рис. 5).

На диаграмме выделена (незаштрихованная) область рекомендуемых составов по показателям прочности и средней плотности с учетом состава композиционного гипсового вяжущего, фракционного состава органического заполнителя и соотношения компонентов в системе

«органический наполнитель – вяжущее». Оптимальные составы обеспечивают класс прочности В0,35 и В0,5 плотностью  $\rho \leq 300 \text{ кг/м}^3$ , что ниже нормированных

значений плотности 400–450  $\text{кг/м}^3$  для указанных классов прочности арболитобетон.

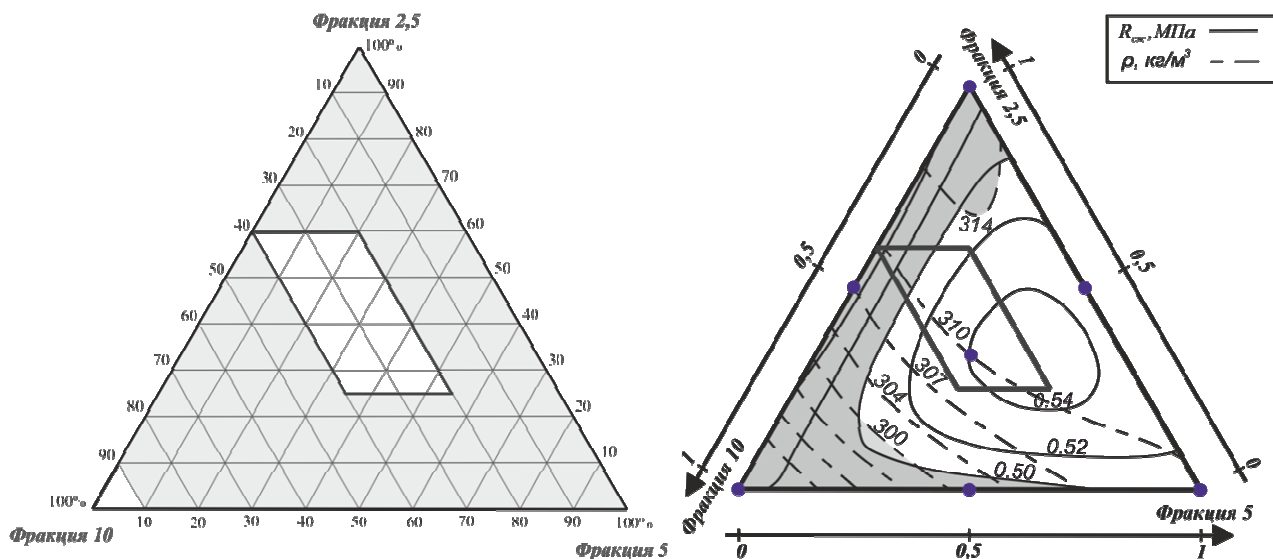


Рис. 5. Диаграмма области расположения фракционного состава в рекомендованных по стандартам пределах и многопараметрической оптимизации фракционного состава органического наполнителя для арболитобетона

**Выводы.** Проведен подбор соотношения количества органического наполнителя и композиционного гипсового вяжущего. Показано, что оптимальным является соотношение вяжущее – органический наполнитель, равное 1:1,5. Такой состав обеспечивает получение арболитобетона плотностью 300  $\text{кг/м}^3$ , прочностью при сжатии не менее 0,5 МПа.

По результатам экспериментальных данных рассчитаны ЭС модели влияния фракционного состава органического наполнителя на свойства арболитобетона. Показано, что при содержании крупной фракции в количестве от 50 до 100 % и содержании средней фракции в количестве от 0 до 50 %, обеспечивается значительное снижение плотности – до 285  $\text{кг/м}^3$ .

Влияние мелкой фракции на прочность незначительно.

Проведена многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона по показателям прочности и средней плотности с учетом состава композиционного гипсового вяжущего, фракционного состава органического наполнителя и соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее». Оптимальные составы обеспечивают класс прочности В0,35 и В0,5 плотностью 300–312  $\text{кг/м}^3$ , что ниже нормированных значений плотности 400–450  $\text{кг/м}^3$  для указанных классов по прочности для арболитобетон.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение биостойкости [12] и огнестойкости [13–14] арболитобетона.

*Список использованных источников*

1. Colin MacDougall, Natural Building Materials in Mainstream Construction: Lessons from the U. K. [Text] // Journal of Green Building: Summer. – 2008. – Vol. 3, No. 3. – P. 1–14.
2. Placet V. Characterization of the thermo-mechanical behaviour of hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites [Text] // Compos. Part A 40. – 2009. – P. 1111.
3. D. Sedan, S. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard, Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction [Text] // J. Eur. Ceram. Soc. 28, 2008. – P. 183.
4. P. Dalmay, A. Smith, T. Chotard, P. Sahay-Turner, V. Gloaguen, P. Krausz, Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibers on the properties of set gypsum [Text] // J. Mater. Sci. 45, 2010. – P. 793.
5. Stevulova N., Kidalova L. Lightweight Composites Containing Hemp Hurds [Text] // Procidea engineering. – 2013. – Nr. 65. – P. 69.-74.
6. L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes [Text] // Construction and Building Materials 28. – 2012. – P. 50.
7. Kidalova L, Stevulova N, Terpakova E, Helcman M. Effective utilization of alternative materials in lightweight composites [Text] // Chem. Eng. Transac. – 2011. – No. 25. – P. 1079-1084.
8. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов [Текст] / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Я. П. Иванов, И. И. Николов. – К.: Будивельник, 1989. – 240 с.
9. Линник, Д. С. Повышение биостойкости костробретона добавкой пирогенного микрокремнезема, модифицированного соединениями серебра, меди и цинка [Текст] / В. И. Юсипчук, Д. С. Линник, Е. С. Шинкевич // Вестник ОГАСА. – Одесса, 2015. – Вып. 60. – С. 370-376.
10. Оптимізація складів сухих будівельних сумішей на основі експериментально-статистичних моделей [Текст] / О. С. Шинкевич, А. Б. Тимняк, Д. С. Лінник, А. А. Тертичний // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – К., 2013. – Вып. 48. – С. 179-183.
11. Линник, Д. С. Экостроительство из арболитобетона на основе композиционного гипсового вяжущего [Текст] / Д. С. Линник, Е. С. Шинкевич, В. И. Юсипчук // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – К., 2014. – Вып. 52. – С. 112-116.
12. Линник, Д. С. Влияние высокоактивной пуццолановой добавки на свойства композиционного гипсового вяжущего и арболитобетона на его основе [Текст] / Д. С. Линник, В. И. Юсипчук, Е. С. Шинкевич // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – Вып. 57. – С. 273-278.
13. Жартовський, В. М. Профілактика горіння целюлозовмісних матеріалів. Теорія та практика [Текст] / В. М. Жартовський, Ю. В. Цапко. – К., 2006. – 248 с.
14. ДБН В.1.1-7-2-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва [Текст]. – На заміну СНиП 2.01.02-85; введ. 2003-05-01. – вид. офіційне. – К.: УкрНДІПБ МНС України, 2003. – 59 с.

---

Шинкевич Олена Святославівна, д-р техн. наук, професор кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел: (067) 767-17-24.  
E-mail: elena\_shinkevich@ukr.net.

Линник Дмитро Сергійович, науковий співробітник кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (067)558-90-73.  
E-mail: fgg109m@gmail.com.

Shinkevish Elena, Dr. Sc. science of building materials Odessa State academy of building and architecture of city Odessa. Tel.: (067)767-17-24. E-mail: elena\_shinkevich@ukr.net.  
Linnik Dmitriy, Odessa State academy of building and architecture of city Odessa. Tel.: (067) 558-90-73.  
E-mail: fgg109m@gmail.com.

Стаття прийнята 20.12.2017 р.