

УДК 691-405.8:666.3-187

## ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВИПАЛУ ВЕРМИКУЛІТУ

Канд. техн. наук А. О. Атинян, асп. К. С. Буханова, д-р техн. наук Л. В. Трикоз,  
канд. техн. наук С. М. Камчатна, канд. техн. наук О. М. Пустовойтова

## PRETREATMENT IMPACT ON VERMICULITE BURN TEMPERATURE

PhD (Tech.) A. O. Atynian, postgraduate student K. S. Bukhanova,  
D. Sc. (Tech.) L. V. Trykoz, PhD (Tech.) S. M. Kamchatnaya, PhD (Tech.) O. M. Pustovoitova

*У статті розглянуто можливість зниження температури випалу для отримання спученого вермикуліту – наповнювача теплоізоляційних будівельних матеріалів. Показано, що попередня витримка у розчині нітрату калію зменшує більше ніж удвічі температуру випалу порівняно з необробленою сировиною при збереженні такої ж самої насипної щільності. Коефіцієнт теплопровідності після випалу обробленого вермикуліту теж удвічі менший, ніж у необробленого. Підібрано оптимальні режими попередньої обробки.*

**Ключові слова:** вермикуліт, температура випалу, насипна щільність, коефіцієнт теплопровідності.

*Vermiculite feature is that it can be expanded up to 30 times its original volume when heated at 650–950 °C. Due to this property the expanded vermiculite possesses low thermal conductivity. The light concrete with vermiculite aggregate is used as the heat-protective enclosing structures in building and structure constructions. To reduce the burn temperature it has been proposed the vermiculite pretreatment by the potassium nitrite solution. The vermiculite samples have been saturated with the tri-molar potassium nitrite solution and held for different time periods. After keeping the samples have been burned under different temperatures. The bulk density and thermal conductivity coefficient were determined for all sample sets. The results show that the burn temperature halves and is equal to 400 °C versus 900 °C for non-treated vermiculite. The expanded vermiculite bulk density is equal to 0,105 g / cm<sup>3</sup>. The thermal conductivity coefficient of expanded vermiculite is equal to 0,032 W/(m·K) that is almost three times less compared with non-treated vermiculite which have been burned under the same temperature 400 °C. Moreover, burning of the non-treated vermiculite under temperature 900 °C does not allow improving the thermal conductivity coefficient that is only equal to 0,063 W/(m·K). The experimental data indicate that the increase of the processing time does not affect the bloat possibility of vermiculite. Also the keeping the samples under temperature 95 °C for 144 hours does not result in the change of bulk density or thermal conductivity coefficient. The treatment with distilled water is not enough effective compared with potassium nitrite solution. The usage of burnt vermiculite under low temperature decreases the production cost of the building materials, reduces the energy consumption, and improves the heat insulation characteristics of building constructions. Calculated heat consumption for 300 kg per hour of expanded vermiculite at 900 °C and 400 °C demonstrates the economic feasibility of the proposed pretreatment.*

**Keywords:** vermiculite, burn temperature, bulk density, coefficient of thermal conductivity.

**Вступ.** Визначальною тенденцією в розвитку виробництва теплоізоляційних матеріалів є зниження їх середньої щільності, поліпшення теплотехнічних

показників, зниження енергоємності. Ефективність цих матеріалів визначається насамперед можливістю їх виготовлення у виробі повної заводської готовності з мінімальними енергетичними витратами. Одним із перспективних видів теплоізоляційних виробів є матеріали на основі спученого вермикуліту на цементному або гіпсовому в'язучому. Вони належать до екологічно чистих, негорючих матеріалів і забезпечують високу теплоізоляцію. Виробництво таких матеріалів може бути швидко налагоджено, зокрема і на існуючих підприємствах з випуску бетонних і залізобетонних виробів при їх незначній модернізації. Завдяки своїм особливостям виробу на вермикулітовому заповнювачі і відповідному в'язучому можуть використовуватися не тільки як теплоізоляційні матеріали, але і як вогнетриви. Для збільшення енергоефективності досить важливою є проблема економії пального, яка може бути вирішена шляхом зниження температури випалу. Спроба замінити випал іншими видами теплової обробки, наприклад мікрохвилями в [1], виявилася недостатньо ефективною. Тому пошук шляхів зменшення температури випалу при збереженні основних характеристик наповнювача є актуальною науково-технічною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Природні вермикуліти і гідрослюди є вторинними мінералами, що утворилися в результаті гідратації слюд – біотиту і флогопіту. Основною і практично найбільш цінною їх властивістю є здатність спучуватися при нагріванні, перетворюючись на легкий пористий зернистий матеріал з високими тепло- і звукоізоляційними властивостями. Випалені маси вермикуліту характеризуються підвищеною вогнестійкістю (температура плавлення досягає 1400 °С), високою звукопоглинальною здатністю, низькою теплопровідністю. Також вони мають підвищену хімічну стійкість, добре опираються вивітрюванню, не конденсують вологу,

мають низький коефіцієнт температурного розширення [2]. Вермикуліт – це сучасний заміник широко розповсюдженого керамзиту. Він так само негорючий, повністю екологічний, довговічний, проте його теплоізоляційні властивості в 2,4 рази кращі (0,05 Вт/(м · град) проти 1,2 Вт/(м · град)), при цьому вага однакового об'єму вермикуліту в 4 рази менша, що дає змогу значно полегшити тиск на конструкції будівлі. Розрахунки показують, що товщина стін з ніздрювато-бетонних блоків з наповнювачем із вермикуліту при щільності 400–500 кг/м<sup>3</sup> становить 25 см, що є важливою перевагою для енергозберігаючої програми. Суміші розчинів для збереження теплової енергії були виготовлені в [3] шляхом заміни піщаних заповнювачів на готовий спучений вермикуліт. Готові розчинні суміші зі спученим вермикулітовим заповнювачем демонстрували хороші теплові характеристики і були найкращими для терморегулювання та енергозбереження в будівлях. Кількість заміненого на вермикуліт піску може досягати 60 %, що позитивно впливає на теплостійкість і термостабільність будівельних розчинів [4].

За уявленнями У. Л. Брега з колегами [5], структуру вермикуліту можна розглядати як похідну від структури слюд біотитового (флогопітового) ряду. Як вони зазначають, у структурі вермикуліту атом Mg<sup>2+</sup> здатний до інтенсивного катіонного обміну з атомами Ca<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> та іншими іонами, які розташовуються між шарами води в міжшарових проміжках. При цьому товщина шару води зростає приблизно до 5,6 Å (0,56 нм). При заміщенні Mg<sup>2+</sup> на Ba<sup>2+</sup> і Li<sup>+</sup> товщина шару зменшується до 3 Å (0,3 нм), що відповідає товщині одного шару молекул води. При заміщенні Mg<sup>2+</sup> на K<sup>+</sup> або NH<sup>3+</sup> товщина ще більше зменшується до 1,4 Å (0,14 нм). Наведені значення подібні до висушених на повітрі зразків вермикуліту. Зазвичай іонний обмін відбувається неповно, у результаті чого молекулами води і катіонами частково

замінюється магній у доступних положеннях. Вермикулітова здатність розширюватися при нагріванні залежить від виду іона в шарах вермикуліту.  $K^+$ -вмісний вермикуліт має більший коефіцієнт теплового розширення, ніж  $Mg$ - або  $Al$ -вмісний вермикуліт [6, 7]. Теплопровідність вермикуліту після обробки  $LiNO_3$ ,  $NaNO_3$  і  $KNO_3$  становить відповідно 0,51, 0,44 і 0,33 Вт/(м·град) [8]. Отже, обробка вермикуліту речовиною, яка спричиняє катіонний обмін, приводить до більшого розширення при меншій температурі. Це покладено в основу фізико-хімічної модифікації вермикулітової сировини з метою зниження температури випалу. Досвід використання вермикулітової сировини показав, що на спучення гідратованих слюд, які входять до складу вермикуліту, впливає багато факторів, при цьому в одних випадках гідрофлогопіти спучуються активніше від типових вермикулітів, а в інших – слюди з однаковим ступенем гідратації мають різну спученість. Тому температура випалу залежить від оптимізації факторів, що позначаються на ступені спучування.

Традиційним основним поясненням спучування вермикуліту є видалення пароподібної води з міжпаquetного гідратного шару в процесі його нагрівання. Однак, на нашу думку, процес спучування пояснюється не видаленням парів води, а утворенням гідроксильних груп на суміжних поверхнях структурних пакетів вермикуліту. Після видалення води, зв'язаної з обмінними катіонами

однойменного позитивного заряду, відбувається їх відштовхування і, як наслідок, розшарування (розсунення) за площинами спайності. З'ясування механізму спучування дасть змогу корегувати температуру випалу в бік її зменшення.

**Визначення мети та завдання дослідження.** З огляду на теоретичні передумови метою цього дослідження є визначення впливу попередньої обробки вермикулітової сировини на температуру випалу. Для досягнення мети необхідно встановити, як вид, концентрація та тривалість обробки розчинами вплине на температуру випалу вермикуліту. Для отримання складу вермикулітового ряду (адже вермикуліт характеризується повним заміщенням іонів  $K^+$  на іони  $Mg^{2+}$ , які з'єднують пакети  $SiO_2$  і  $Mg(OH)_2$ ) проводилася попередня обробка вермикулітової сировини водним розчином  $KNO_3$ , що дало змогу змодельовати зміни в структурі вермикуліту, подібні до природних, що відбуваються в результаті вивітрювання, а саме здійснити впровадження іонів калію у внутрішню структуру слюд. Також було перевірено вплив гідратування матеріалу на заміщення іонів важких елементів іонами водню за допомогою насичення матеріалів дистильованою водою.

#### Основна частина дослідження

**Матеріали та методи досліджень.** Як сировину в роботі було використано вермикулітовий концентрат Васильківського родовища (Україна, Київська область), хімічний та мінералогічний склад якого наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад вермикуліту Васильківського родовища

Вміст оксидів, %										
$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$FeO$	$CaO$	$MgO$	$MnO$	$Na_2O$	$K_2O$	$H_2O$
32,09	1,22	8,79	11,01	1,97	9,18	7,23	0,17	0,50	5,38	6,77

Вермикулітовий концентрат був подрібнений до розміру зерен 5–4 мм з насипною щільністю 500–550 кг/м<sup>3</sup> і

природною вологістю 5 % (за масою). Для попередньої обробки вермикуліту був використаний тримолярний водний розчин

$KNO_3$ . Проби вермикуліту заливали розчинами в співвідношенні (за масою) розчин : вермикуліт = 1,1:1 і витримували при температурі  $20 \pm 2$  °С відповідно 1, 3, 4 і 6 діб. Для підвищення швидкості насичення матеріалу було прийнято рішення збільшити температуру розчинів до 95 °С і скоротити час витримки. Інтервали витримки становили від півгодини до 5 год з кроком у 0,5 год.

Після фіксованої витримки в хімічних розчинах пробу кожен раз 20-кратно промивали дистильованою водою, потім воду видаляли на полотняному фільтрі. Промиту пробу поміщали в лабораторну сушарку. Знімну ємність сушарки попередньо зважували. Час сушіння встановлювали за моментом, коли матеріал у ємності починав вільно пересипатися при обертанні (цей момент визначили як «початок сипучості»). Потім сушарку з

висушеним матеріалом зважували та обчислювали масу висушеної проби в кожному окремому випадку.

На основі негідратованих мінералів, які можуть міститися в слюдах, можливе також отримання матеріалів гідрофлогопіт-вермикулітового ряду після обробки дистильованою водою, що позитивно позначиться на спученні вермикулітової сировини. Для перевірки того, що вільна вода бере участь у процесі спучування вермикулітового концентрату, пробу сировинного вермикуліту заливали дистильованою водою і витримували протягом 24, 72 і 96 год, після чого сушили до «початку сипучості». У результаті експериментальних досліджень було встановлено, що на момент появи сипучості вологість матеріалу становить 5–7 %. Умови експериментів з проведення хімічної обробки природного вермикуліту наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Умови попередньої підготовки природнього вермикуліту

Номер проби	Умови обробки вермикулітового концентрату			Час випалу, хв
	Концентрація розчину $KNO_3$ , моль	Температура обробки, °С	Час обробки, год	
1	Без обробки	Без обробки	Без обробки	3
2				3
3	0	20	24	3
4			72	3
5			96	3
6	3М	20	24	3
7			24	4
8			24	5
9			72	3
10			72	4
11		96	3	
12		95	0,5	3
13			1;1,5	3
14			2	3
15			2,5	3
16	3		3	
17	3,5		3	
18	4		3	
19	4,5		3	
20	5	3		

Після випалу визначали насипну щільність та коефіцієнт теплопровідності згідно з ДСТУ Б В.2.7-280 [9].

**Дослідження впливу видів попередньої обробки вермикуліту на фізико-механічні показники.** Для оцінки та

вибору найбільш ефективного виду обробки для кожної проби було визначено насипну щільність та коефіцієнт теплопровідності. Результати випробувань наведено в табл. 3, 4.

Таблиця 3

Залежність насипної щільності спученого вермикуліту від температури випалу

Номер проби	Насипна щільність, г/см <sup>3</sup> , після випалу при температурі, °С				
	250	315	400	850	900
1	-	-	-	0,19±0,04	0,136±0,04
2	0,37±0,07	0,261±0,05	0,19±0,04	0,114±0,03	0,109±0,02
3	-	0,285±0,06	0,103±0,02	-	-
4	-	0,287±0,06	0,103±0,02	-	-
5	-	0,285±0,06	0,107±0,02	-	-
6	-	0,182±0,04	0,105±0,02	-	-
7	-	0,181±0,04	0,115±0,02	-	-
8	-	0,196±0,04	-	-	-
9	0,215±0,04	0,156±0,04	0,128±0,03	-	-
10	0,245±0,06	-	0,109±0,02	-	-
11	-	0,159±0,04	0,111±0,03	-	-
12	0,268±0,04	0,173±0,04	0,126±0,03	-	-
13	0,265±0,05	0,173±0,04	0,123±0,03		
14	0,262±0,05	0,170±0,04	0,120±0,03		
15	0,260±0,05	0,168±0,04	0,119±0,03		
16	0,259±0,05	0,167±0,04	0,117±0,03		
17	0,257±0,05	0,164±0,04	0,115±0,03		
18	0,256±0,05	0,162±0,04	0,114±0,03		
19	0,254±0,05	0,160±0,04	0,113±0,03		
20	0,253±0,05	0,159±0,04	0,113±0,03		

Як видно з табл. 3, випал вермикулітового концентрату природної вологості без попередньої обробки при температурах 850 і 900 °С дав змогу отримати спучений вермикуліт з насипною щільністю 0,106 г/см<sup>3</sup>. При проведенні випалу цієї ж сировини при температурі 250 °С без хімічної обробки був отриманий продукт з низьким ступенем спучення (насипна щільність становила 0,370 г/см<sup>3</sup>). Підвищення тривалості термообробки (144 год) для проб при температурі 250 °С також не призвело до отримання

оптимального результату – щільність становила 0,267 г/см<sup>3</sup>. Підвищення температури випалу до 400 °С у всіх випадках призводило до зниження насипної щільності, що ще раз підтвердило, що другий ендоефект в оброблених хімічними розчинами гідролюд належить до 400 °С. Отримані результати добре узгоджуються з даними [10]. Ефект зниження насипної щільності вермикуліту виявлений за умови природного недосушування (5–7 % вологості) після промивання дистильованою водою обробленого KNO<sub>3</sub> концентрату.

Сушка проводилася при температурі 25 °С протягом 1 доби. При підвищенні температури сушіння до 50–100 °С відзначався негативний ефект при подальшому спученні, пересушені проби показали величину насипної щільності на

30–35 % вище. Кип'ятіння в розчинах різних концентрацій теж не поліпшило об'ємних характеристик випаленого продукту. Витримка в розчинах при 95 °С з покроковим збільшенням часу істотних результатів не дала.

Таблиця 4

Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури випалу

Номер проби	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К, після випалу при температурі, °С		
	400	850	900
1	-	0,079	0,063
2	0,088	0,063	0,054
3	0,047	-	-
4	0,048	-	-
5	0,044	-	-
6	0,045	-	-
7	0,032	-	-
8	0,032	-	-
9	0,037	-	-
10	0,047	-	-
11	0,048	-	-
12	0,050	-	-
13	0,049	-	-
14	0,048	-	-
15	0,048	-	-
16	0,048	-	-
17	0,049	-	-
18	0,048	-	-
19	0,047	-	-
20	0,046	-	-

Згідно з даними табл. 4 найкращу теплопровідність показали проби 3, 4, 7 і 9. Проби 3 і 4 – це проби, які пройшли насичення дистильованою водою протягом 24 і 72 год, а проби 7 і 9 – витримані в тримолярному розчині KNO<sub>3</sub> при 20 °С протягом 1 і 3 діб відповідно. Експеримент показав, що додатковий час витримки у воді не вплинув на значення одержуваної щільності та коефіцієнта теплопровідності. Отже, доведено, що випал можна проводити при температурі 400 °С, а не при 850–900 °С. Збільшення часу витримки в розчинах KNO<sub>3</sub> (до 144 год) не зробило

позитивного впливу на кінцевий результат. Однак при однакових показниках щільності теплопровідність цих проб значно відрізняється. Оптимальні результати показала проба 7 (0,032 Вт/(м · К)), витримана в 3М розчині KNO<sub>3</sub> при 20 °С протягом 24 год. Дещо гірші показники у пробі 9 (0,037 Вт/(м · К)), яку витримували в 1М розчині KNO<sub>3</sub> при 20 °С протягом 3 діб. Обробка дистильованою водою не настільки ефективна порівняно з витримкою у розчині нітрату калію.

Для визначення економічної доцільності запропонованого способу

підготовки сировини порівняємо витрати тепла на отримання 300 кг за годину спученого вермикуліту при температурах 900 та 400 °С.

Витрати тепла на отримання спученого вермикуліту без попередньої обробки при температурі 900 °С.

1. Сушка 354 кг вермикуліту (54 кг води при 15 % вологості вихідної сировини):

$$Q_1 = m \cdot c, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість випаровуваної води;

$c$  – витрата енергії на 1 кг випаровуваної води (3800 кДж).

$$Q_1 = 54 \text{ кг} \cdot 3800 \text{ кДж / кг} = 205\,200 \text{ кДж}.$$

2. Нагрівання сухого матеріалу масою  $m = 300$  кг до температури  $\Delta t = 900$  °С:

$$Q_2 = c_1 \cdot m \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де  $c_1$  – питома теплоємність сухого вермикуліту.

$$Q_2 = 300 \text{ кг} \cdot 1,05 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°С} \cdot 900 \text{ °С} = 283\,500 \text{ кДж}.$$

3. Втрати з повітрям (300 м<sup>3</sup>/год або 387 кг/год) при температурі 900 °С:

$$Q_3 = c_2 \cdot m \cdot \Delta t, \quad (3)$$

де  $c_2$  – питома теплоємність повітря.

$$Q_3 = 387 \text{ кг} \cdot 1,3 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°С} \cdot 900 \text{ °С} = 402\,489 \text{ кДж}.$$

4. Втрати через корпус теплового агрегату ( $S = 40$  м<sup>2</sup>, середня різниця між температурою корпусу і повітря на відстані 1,5 м дорівнює 45 °С):

$$Q_4 = \lambda \cdot s \cdot \Delta t, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – кількість випромінюваного тепла з 1 м<sup>2</sup> поверхні печі при нагріванні на 1 °С;

$s$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>.

$$Q_4 = 15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С} \cdot 40 \text{ м}^2 \cdot 45 \text{ °С} \cdot 3600 \text{ с} = 97\,200 \text{ кДж}.$$

5. Витрати на дегідратацію кристалізаційної води і спучування  $Q_{\text{хім}}$ .

Ці витрати не розраховувалися, тому що при різних режимах отримання спученого вермикуліту вони збігаються (за даними термографії).

6. Загальні витрати:

$$Q_{1 \text{ заг}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{\text{хім}}. \quad (5)$$

$$Q_{1 \text{ заг}} = (205\,200 + 283\,500 + 402\,489 + 97\,200 + Q_{\text{хім}}) \text{ кДж} = (988\,389 + Q_{\text{хім}}) \text{ кДж}.$$

За формулами (1) – (5) проводимо розрахунок витрати тепла на отримання спученого вермикуліту з попередньою обробкою при температурі 400 °С.

1. Сушка 450 кг (150 кг води при 33 % вологості хімічно обробленої сировини):

$$Q_1 = 150 \text{ кг} \cdot 3800 \text{ кДж / кг} = 573\,800 \text{ кДж}.$$

2. Нагрівання сухого матеріалу (300 кг) на 400 °С:

$$Q_2 = 300 \text{ кг} \cdot 1,05 \text{ кДж / кг} \cdot \text{°С} \cdot 400 \text{ °С} = 126\,000 \text{ кДж}.$$

3. Втрати з повітрям (300 м<sup>3</sup> / год або 387 кг) при температурі 300 °С:

$$Q_3 = 387 \text{ кг} \cdot 1,3 \text{ кДж / кг} \cdot \text{°С} \cdot 300 \text{ °С} = 150\,930 \text{ кДж}.$$

4. Втрати через корпус теплового агрегату ( $S = 40$  м<sup>2</sup>, середня різниця між температурою корпусу і повітря 20 °С):

$$Q_4 = 15 \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{°С} \cdot 40 \text{ м}^2 \cdot 20 \text{ °С} \cdot 3600 \text{ с} = 43\,200 \text{ кДж}.$$

5.  $Q_{\text{хім}}$  як і в попередньому не розраховувалося.

6. Загальні витрати становили:

$$Q_{2 \text{ заг}} = (573\,800 + 126\,000 + 150\,930 + 43\,200 + Q_{\text{хім}}) \text{ кДж} = (893\,930 + Q_{\text{хім}}) \text{ кДж}.$$

Енергозбереження становить різницю між  $Q_{1 \text{ заг}}$  і  $Q_{2 \text{ заг}}$

$$\Delta Q = Q_{1 \text{ заг}} - Q_{2 \text{ заг}} = 94459 \text{ кДж.}$$

**Висновки.** У результаті проведених досліджень встановлена можливість отримання низьковипаленого вермикуліту за рахунок попередньої обробки розчином солі калію. Показано, що обробка вермикулітової сировини 3М розчином  $\text{KNO}_3$  дала змогу більше ніж удвічі знизити температуру випалу (з 900 до 400 °С) при збереженні основних фізико-механічних характеристик спучених матеріалів –

насипної щільності 0,105 г/см<sup>3</sup> та коефіцієнта теплопровідності 0,032 Вт/(м · К). Використання такого вермикуліту як наповнювача бетонів є фактором, що значно підвищує енергоефективність використовуваних конструкцій за рахунок значного зниження температури випалу, поліпшення теплотехнічних показників, а також дає змогу значно зменшити вагу споруд. Відповідно зменшені тиск на ґрунт і вага будівель у цілому дає змогу економити будівельні матеріали, здешевлюючи будівництво будівель і споруд.

### Список використаних джерел

1. Silva F. M. N., Silva E. L., Anjos I. F., Fontgalland G., Rodrigues M. G. F. Characterization of Natural Clay Vermiculite, Expanded by Indirect Method for Energy and Microwave. *Materials Science Forum*. 2015. Vol. 820. P. 36–39. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.820.36> (last access: 15.02.2019).
2. Alaa M. Rashad. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 125. P. 53–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019> (last access: 15.02.2019).
3. Zhang X., Jin W., Lv Y., Zhang H., Zhou W., Ding F. Preparation and characterization of mortar mixes containing organic acid/expanded vermiculite composite PCM. *Functional materials*. 2017. Vol. 24 (3). P. 481–489. URL: <https://doi.org/10.15407/fm24.03.481> (last access: 15.02.2019).
4. Kim HungMo, Hong JieLee, Michael Yong JingLiu, Tung-ChaiLing. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 179. P. 302–306. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219> (last access: 15.02.2019).
5. Брег У. Л., Кларигбулл Г. Ф. Структура минералов. Москва: Мир, 1967. 390 с.
6. Tong Jiang Peng, Hong Juan Sun, Hai Feng Liu. Application Mineralogy Characteristics of the Industrial Vermiculite from Different Mines in China. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 178. P. 53-58. URL: <https://www.scientific.net/AMR.178.53> (last access: 15.02.2019).
7. Jin L., Dai B. Preparation and Properties of Zno/Vermiculite Composite Particles. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 455-456. P. 265–270. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.455-456.265> (last access: 15.02.2019).
8. Deng Y., Li J., Nian H. Expanded Vermiculite: A Promising Natural Encapsulation Material of  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ , and  $\text{KNO}_3$  Phase Change Materials for Medium-Temperature Thermal Energy Storage. *Advanced Engineering Materials* [Internet]. Wiley; 2018 Apr 23; 1800135. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201800135> (last access: 15.02.2019).
9. ДСТУ Б В.2.7-280:2011 Вермикуліт спучений. Технічні умови (ГОСТ 12865-67, MOD). Чинний від 2012-12-01. Київ : Мінрегіон України, 2012. 8 с.



10. Атинян А. О. Оптимизация процесса вспучивания вермикулита и исследование его изменений методом комплексного дифференциально-термического анализа. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА ХОТВ АБУ, 2010. Вип. 57. С. 280–283.

---

Атинян Армен Овікович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: armen.atynyan@kname.edu.ua.

Буханова Катерина Сергіївна, аспірант Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: kateryna.bukhanova@kname.edu.ua.

Трикоз Людмила Вікторівна, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Камчатна Світлана Миколиівна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел. (057)730-10-68. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com, ORCID 0000-0001-5711-4146.

Пустовойтова Оксана Михайлівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10.

E-mail: oksana\_pustov@ukr.net, ORCID 0000-0003-4078-4834.

Atynian Armen, PhD (Tech.), Associate Professor, Construction Technology and Building Materials Department, O.M.Beketov National University of Urban Economy. Tel. (057) 707-31-10. E-mail: armen.atynyan@kname.edu.ua.

Bukhanova Kateryna, postgraduate student, O.M. Beketov National University of Urban Economy.

Tel. (057) 707-31-10. E-mail: kateryna.bukhanova@kname.edu.ua.

Trykoz Liudmyla, D. Sc. (Tech.), Professor, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Kamchatnaya Svitlana, PhD (Tech.), Associate Professor, Location and Design of Railroad, Geodesy and Land Management Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68.

E-mail: kamchatnayasn@gmail.com.

Pustovoitova Oksana, PhD (Tech.), Associate Professor, Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel. (057) 707-31-10. E-mail: oksana\_pustov@ukr.net.

Статтю прийнято 04.03.2019 р.