

Б. Б. Чеканський, І. В. Луцюк

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра хімічної технології силікатів  
chbb1992@gmail.com

## НЕАВТОКЛАВНИЙ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИЙ ГАЗОБЕТОН НА ОСНОВІ КОМПОЗИЦІЙНОГО В'ЯЖУЧОГО

<https://doi.org/10.23939/ctas2019.02.035>

Розроблено та оптимізовано технологічні параметри спучення газобетонної суміші на основі безклінкерного композиційного гіпсованяного в'язучого системи “гіпс – негашене вапно – метаксаолін – аморфний кремнезем” за литтєвою технологією формування. Встановлено оптимальні межі температури води замішування, водотвердого відношення, рухливості суміші та кратності спучення. Відповідно до технологічних параметрів процесу підібрано газоутворювач. Досліджено фізико-технічні властивості ніздрюватого бетону. Методом РФА встановлено фазовий склад продуктів тверднення газобетону.

**Ключові слова:** гіпс, негашене вапно, метаксаолін, аморфний кремнезем, ніздрюватий бетон, середня густина, теплопровідність, усадка.

### Вступ

На житлово-комунальний сектор України припадає левова частка кінцевого споживання енергії – близько 42–44 % [1]. Переважно витрати енергії зумовлені втратою тепла крізь огорожувальні конструкції будівель: стіни, вікна, перекриття цокольних поверхів та горищ [2].

Проблеми енергозбереження й екологічної безпеки поставили перед будівельною галуззю низку невідкладних завдань, серед яких вирішальну роль відіграє створення нових теплоізоляційних матеріалів і виробництв, що забезпечують їхній випуск.

Одним із лідерів стінових матеріалів на сучасному ринку, який поєднує в собі високі конструкційні та теплоізоляційні властивості, є ніздрюватий бетон, зокрема неавтоклавної тверднення.

Підвищення ефективності ніздрюватого бетону як теплоізоляційного матеріалу полягає, перш за все, в гранично можливому зниженні середньої густини з одночасним забезпеченням певного рівня фізико-механічних показників, необхідних для виготовлення виробів у вигляді плит [3].

Конкурентами ніздрюватого бетону за теплоізоляційними властивостями є такі поширені утеплювачі, як мінеральна вата, скловата й пінополістирол. Недоліки та основні експлуатаційні показники існуючих утеплювачів про-

аналізовано в роботах [4, 5]. Автори зробили висновок, що в ситуації, яка склалася на ринку, найперспективнішим матеріалом є теплоізоляційний ніздрюватий бетон. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-45:2010 такий вид бетону характеризується середньою густиною від 180 до 370 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає маркам D200, D250, D300 і D350.

Сьогодні простежується загальна тенденція зниження середньої густини виробів до 400–300 кг/м<sup>3</sup> [6]. У роботі [3] стверджується, що досягнення значень середньої густини нижче ніж 300 кг/м<sup>3</sup> визначається перетворенням, за якого форма макропор із сферичних переходить у багатогранникові. Однак, згідно з даними [7], досліджень і дослідно-виробничих робіт щодо отримання ніздрюватого бетону із пониженою середньою густиною дуже мало. В основному вони присвячені пінобетону та автоклавному газобетону і лише незначна увага приділяється розробленню неавтоклавної газобетону.

Газова поризація в технології ніздрюватого бетону відбувається завдяки речовинам, які виділяють газ під час хімічних реакцій [8]. При виборі газоутворювача основним завданням є пошук оптимального варіанта, за якого процес поризації відбуватиметься найбільш рівномірно, а якість бетону покращуватиметься.

Усі газоутворювачі за принципом дії поділяють на два типи, відмінність яких полягає

в механізмі утворення пор. При використанні газоутворювач іводного типу пори утворюються під час їхньої взаємодії зі складниками суміші, в інших же газоутворювач розкладається за відповідних умов, зокрема підвищеної температури.

Найпоширенішими газоутворювачами є алюмінієва пудра, пергідроль, алюмінієві паста та комплексні газоутворювачі. Під час отримання газогіпсу також використовують поризацію маси, яка можлива за наявності карбонатів і розчинних кислот або солей з утворенням поризуючого агенту в виді  $\text{CO}_2$  [9].

У роботі [10] проведено порівняльну характеристику різних видів газоутворювачів. Автори стверджують, що найвигіднішим є використання алюмінієвих паст, які, незважаючи на високу вартість, значно покращують властивості бетону та безпеку праці.

Вирішальним чинником, від якого залежать основні показники макроструктури газобетону, є узгодженість протікання процесів газовиділення і зміни реологічних характеристик суміші в часі. Для отримання якісної ніздрюватої структури використовують різні рецептурно-технологічні прийоми, зокрема: регулювання водотвердого відношення (В/Т), співвідношення компонентів в'язучого, температури води замішування і газобетонної суміші, умов формування і введення добавок-регуляторів тверднення тощо [11].

Для отримання неавтоклавного газобетону малої/середньої густини вирішальне значення має якість сировинних матеріалів [3]. Згідно з [12] варто використовувати мінерально-однорідні компоненти з однаковими або близькими значеннями поверхневої активності і великою енергією взаємодії у водному середовищі з виділенням тепла.

Попри постійне збільшення виробництва теплоізоляційного ніздрюватого бетону, його частка в будівництві є невисокою [13, 14]. Тому необхідність зниження середньої густини теплопровідності, а також оптимізації процесу формування пористої структури неавтоклавного газобетону залишається актуальною проблемою [15, 16].

**Мета дослідження** – розроблення технологічних параметрів отримання неавтоклавного теплоізоляційного газобетону марки D200

на основі безклінкерного композиційного гіпсовапняного в'язучого.

### Матеріали та методи досліджень

У роботі використано такі матеріали та речовини: гіпс марки Г-5 Н-П (ПАТ “Івано-Франківськцемент”) відповідно до ДСТУ Б В.2.7-82:2010; мелене негашене вапно (“Carmeuse”, Словаччина) швидкого гасіння І сорту (вміст активних  $\text{CaO} + \text{MgO}$  93,8 %) згідно з EN 459-1:2010 і ДСТУ Б В.2.7-90:2011; метакаолін високоактивний (ТзОВ “Західна каолінова компанія”) відповідно до ТУ У В.2.7-08.1-31108661-001:2014; аморфний кремнезем (ПАТ “Гіпсовик”) згідно з ТУ У21-752-73; натрій тетраборнокислий  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (бура); пороутворювач – алюмінієву пасту ALBApor 108B (AlbaAluminium, Румунія).

Фізико-механічні властивості гіпсу: тонина розмелення (залишок на ситі № 02) – 3,0 %(мас); нормальна густина (НГ) – 54,0 %; терміни тужавіння (початок / кінець) – 9 / 16 хв; границя міцності при згині / стиску – 3,8 / 5,3 МПа; коефіцієнт розм'якшення – 0,37.

Негашене вапно ( $\text{CaO}$ ) характеризується максимальною температурою гасіння 100 °С, часом досягнення температури 60 °С 0,75–1,25 хв і залишками на ситах № 02 і № 008 відповідно 1,5 і 13 %(мас.).

Пуцоланічна активність метакаоліну зі поглинання  $\text{CaO}$  за питомої поверхні 1091 м<sup>2</sup>/кг становить 1019 мг/г. Аморфний кремнезем в основному складається з опалу.

Хімічний склад метакаоліну та аморфного кремнезему наведено в табл. 1.

Таблиця 1

### Хімічний склад метакаоліну та аморфного кремнезему

Вміст оксидів, %(мас.)							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Інші (ВПП)
у метакаоліні							
54,35	41,25	1,17	–	–	–	–	3,23 (1,50)
в аморфному кремнеземі							
96,00	0,47	0,40	1,70	0,10	0,20	0,20	0,93

Гранулометричний склад вихідних проб метакаоліну та аморфного кремнезему (табл. 2) характеризується частковими залишками на відповідних ситах.

Таблиця 2

**Гранулометричний склад метакаоліну та аморфного кремнезему**

Залишок на ситі №, %(мас.)						
09	063	0315	014	008	0071	дно
для метакаоліну						
0,00	0,04	0,28	3,08	1,50	0,20	94,40
для аморфного кремнезему						
0,05	3,43	10,98	17,70	17,16	4,80	45,88

Фізико-механічні випробування виробів із неавтоклавного теплоізоляційного газобетону здійснювали згідно з ДСТУ Б В.2.7-45:2010.

Рентгенофазовий аналіз (РФА) сировинних матеріалів і продуктів гідратації газобетону здійснювали за допомогою дифрактометра ДРОН-3,0 М при  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні.

РФА гіпсу показав, що в досліджуваній пробі окрім гіпсу напівгідрату також присутні рефлекси гіпсу двогідрату ( $d/n = 0,379; 0,756$  нм) і  $\beta$ -кварцу ( $d/n = 0,334$  нм).

Для досліджуваної проби негашеного вапна окрім характерних рефлексів  $\text{CaO}$  зафіксовано слабо виражені рефлекси портландиту  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $d/n = 0,179; 0,193; 0,263; 0,311; 0,493$  нм) та кальциту  $\text{CaCO}_3$  ( $d/n = 0,303$  нм).

Метакаолін характеризується інтенсивними рефлексами  $\beta$ -кварцу ( $d/n = 0,334; 0,426$  нм) та слабо вираженими рефлексами каолініту ( $d/n = 0,356; 0,446; 0,715$  нм).

**Результати досліджень та їх обговорення**

Результатами попередніх досліджень [17–19] розроблено склад безклінкерного композиційного гіпсовапняного в'язучого. Встановлено, що оптимальний вміст компонентів в'язучого в системі “гіпс – негашене вапно – метакаолін – аморфний кремнезем” є 56,76–52,74 % гіпсу, 37,84–35,16 % негашеного вапна 3,50–6,50 % метакаоліну і 1,90–5,60 % аморфного кремнезему.

Газобетонну суміш отримували литтєвою технологією формування шляхом послідовного додавання компонентів у металеву ємність об'ємом 2 л:

вода → алюмінієва суспензія → бура і гіпс (час перемішування суміші після додавання гіпсу напівгідрату  $\tau_1 = 3$  хв) → метакаолін та аморфний кремнезем ( $\tau_2 = 1$  хв) → негашене вапно ( $\tau_3 = 1$  хв) (рис. 1).

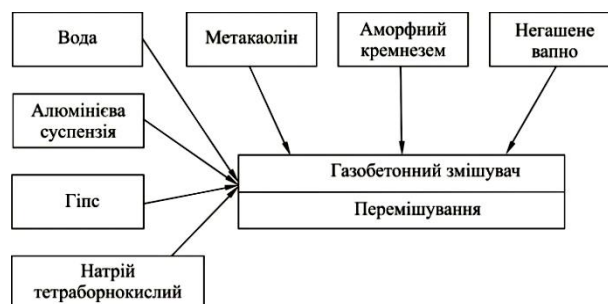


Рис. 1. Схема дозування компонентів газобетонної суміші

Газобетонну суміш заливали в форми з розмірами  $10 \times 10 \times 10$  см, де вона спучувалася протягом 15–20 хв. Форми поміщали в камеру попереднього тверднення і витримували протягом 3–4 год за температури  $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$  і вологості (70–80) %.

Витрати сировини та матеріалів для отримання газобетону наведено в табл. 3.

Таблиця 3

**Витрати сировини та матеріалів на  $1 \text{ м}^3$  газобетону**

Показник	Гіпс	Негашене вапно	Метакаолін	Аморфний кремнезем	Алюмінієва паста	Бура
Витрата, кг	85,14–79,11	56,76–52,74	5,25–9,75	2,85–8,40	0,93	0,75

Одним із важливих чинників, що значною мірою впливає на гідратаційну активність компонентів газобетону, є температура води замішування. Відомо [20], що газову поризацію застосовують як у технології гарячих (початкова температура  $35\text{--}60^\circ\text{C}$ ), так і холодних (початкова температура  $20\text{--}30^\circ\text{C}$ ) сировинних сумішей.

Перевага гарячих сумішей полягає в значній інтенсифікації процесів спучення і тужавіння, а також росту пластичної міцності сирцю, що дає змогу суттєво скоротити тривалість витримки

масивів до різки на виробі і відповідно, виробничого циклу загалом.

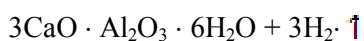
Натомість, як стверджують автори [12], замішування компонентів суміші холодною водою забезпечує можливість тривалішого перемішування суміші з метою її граничної гомогенізації. Так, у роботі [21] із застосуванням холодних формувальних сумішей пропонують отримувати автоклавний теплоізоляційний ніздрюватий бетон із густиною 160–220 кг/м<sup>3</sup>. При цьому зазначається, що міцність такого газобетону становить 0,30–0,63 МПа.

Для покращення процесу гідратаційного тверднення одного з головних складників газобетонної суміші СаО нами запропоновано використовувати воду, охолоджену до 8–12 °С. Це унеможливить перегрівання газобетонної суміші і забезпечить повноту перебігу реакції гідратації кальцію оксиду.

Для отримання газобетону на основі розробленого композиційного в'язучого системи "гіпс – негашене вапно – метаксаолін – аморфний кремнезем" важливим параметром є водотверде відношення.

Експериментально встановлено, що за значення В/Т, меншого ніж 75 %(мас.), газобетонна суміш здатна перегріватися, втрачати рухливість, внаслідок чого зменшується кратність спучення. Це призводить до розтріскування масиву або отримання виробів зі середньою густиною в сухому стані понад 220 кг/м<sup>3</sup>. За В/Т вище ніж 85 %(мас.) виникає ризик "фальшивого кипіння" масиву через недостатню його в'язкість. Тому оптимальне В/Т знаходиться в межах 75–85 %(мас.) за розпливу газобетонної суміші на віскозиметрі Сутгарда 22–26 см. При цьому оптимальна кратність спучення масиву становить 3,75–4,25 рази.

У роботі як газоутворювач використано алюмінієву пасту. Процес спучення газобетонної суміші відбувається внаслідок утворення водню (H<sub>2</sub>) згідно з реакцією:



Варто зазначити, що пасту підбирали з урахуванням можливості отримувати на її основі

суспензії за низьких температур води. Такій вимозі відповідають пасти фірми AlbaAluminiu. Для отримання виробів із густиною 200–350 кг/м<sup>3</sup> виробник рекомендує використовувати пасту ALBApog 108В. Встановлено, що оптимальним співвідношенням *паста : вода* є 1 : 10.

Визначальними чинниками, які визначають процес газоутворення, є температура і В/Т [22]. У роботі підвищення температури газобетонної суміші і, як наслідок, прискорення спучення і тверднення досягається завдяки екзотермічному ефекту гідратації безклінкерного композиційного гіпсованяного в'язучого і безпосередньо розчиненню алюмінієвої пасти в лужному середовищі. При цьому встановлено, що максимальна температура масиву під час тверднення досягала 55–60 °С.

Після витримки газобетону в камері протягом визначеного часу зрізали "горбушку", виробі розформували і зберігали в повітряно-сухих умовах. Фізико-технічні властивості газобетону досліджували на зразках-кубах у віці 28 діб згідно з ДСТУ Б В.2.7-45:2010 (табл. 4).

Таблиця 4

**Фізико-технічні властивості газобетону в віці 28 діб**

№ з/п	Показник	Фактичне значення
1	Середня густина, кг/м <sup>3</sup> (від 180 до 220 включно)	210
2	Міцність на стиск, МПа (не менше ніж 0,50)	0,55
3	Марка за морозостійкістю	10
4	Усадка під час висихання, мм/м	5,00
5	Теплопровідність у сухому стані, Вт/(м·°С) (не більше ніж 0,055)	0,05
6	Сорбційна вологість, %, за відносної вологості повітря 75 % (не більше ніж 6)	5

Методом рентгенофазового аналізу (рис. 2) встановлено фазовий склад продуктів тверднення газобетону. На дифрактограмі ідентифіковано лінії гіпсу двогідрату ( $d/n = 0,2867; 0,3059; 0,379; 0,427; 0,756$  нм), портландиту ( $d/n = 0,193; 0,263; 0,493$  нм), кальциту ( $d/n = 0,1875; 0,1913; 0,2095; 0,2285; 0,2495; 0,3035$  нм) та  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

( $d/n = 0,357; 0,472; 0,71$  нм). Утворені кристалічні фази в складі бетону забезпечують його міцність. Зменшене значення усадки виробів із газобетону під час висихання зумовлене кристалізацією етрингіту ( $d/n = 0,388; 0,973$  нм).

На підставі проведених випробувань і результатів рентгенофазового аналізу можна стверджувати, що отримано конкурентоздатний теплоізоляційний матеріал на основі доступної та екологічної сировини.

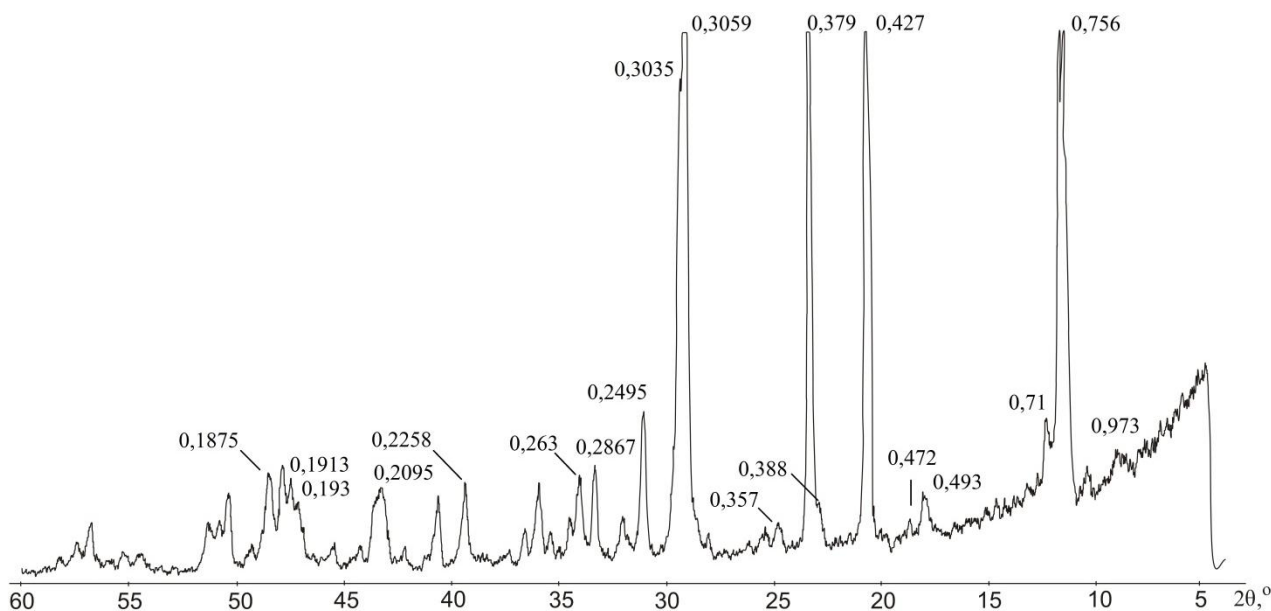


Рис. 2. Дифрактограма газобетону в віці 28 діб, що тверднув у повітряно-сухих умовах

### Висновки

На підставі проведених досліджень розроблено технологічні параметри та отримано неавтоклашний теплоізоляційний газобетон марки D200 на основі безклінкерного композиційного гіпсованяного в'язучого: температура води замішування 8–12 °С, В/Т = 75–85 %, рухливість газобетонної суміші 22–26 см, кратність спучення 3,75–4,25 разу.

За результатами випробувань встановлено, що ніздрюватий бетон відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-45:2010 “Будівельні матеріали. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови”.

### Література

1. Марущак, У. Д., Саницький, М. А., Гоц, В. В., Федунь, Ю. Б. (2013). Техніко-економічні показники низькоенергетичних будинків. *Вісник НУ ЛП. Збірник наукових праць. Серія: Теорія і практика будівництва*, 755, 262-267.
2. Вылегжанин, В. П., Пинскер, В. А. (Ред.). (2008). Эффективность ячеистых бетонов в ограждающих конструкциях. Популярное бетоноведение. II Международная конференция: Сборник докладов. Санкт-Петербург.

3. Чернышов, Е. М., Неупокоев, Ю. А., Потамонина, Н. Д. (2007). Высокопоризованные ячеистые бетоны для эффективных теплоизоляционных плит. *Вестник ТГАСУ*, 1, 184-190.

4. Иванов, А. Н., Трёмбицкий, М. А. (2011). Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий. *Инженерно-строительный журнал*, 8, 19-24.

5. Печенина, О. А. (Ред.). (2017). *Современные представления о ячеистом бетоне как эффективном теплоизоляционном материале. Сборник: Наука и инновации в строительстве* (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгород.

6. Шмитько, Е. И., Резанов, А. А., Бедарев, А. А. (2012). Управление процессом порообразования ячеистого силикатного бетона за счет фактора давления внешней газовой фазы. *Научный вестник ВГАСУ. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения*, 5, 110-115.

7. Сахаров, Г. П., Карпенко, Р. П. (2007). Теплоизоляционный пено- и газобетон средней плотностью 100...200 кг/м<sup>3</sup>. *Бетон и железобетон*, 6, 4-7.

8. Данилов, М. В., Чазова, О. Л. (2014). Сравнительный анализ нормативных требований, предъяв-

ляемых к изделиям (блокам) из различных видов ячеистого бетона (газобетона и пенобетона). *Вестник ИЖГТУ им. М. Т. Калашникова*, 1(61), 82-83.

9. Завадская, Л. В. (2011). Влияние микроармирующих добавок на свойства газогипса. *Фундаментальные исследования*, 12, 770-772.

10. Рябова, К. Н., Михеев, К. В., Варданын, Г. Б., Виноградов, О. В. (Ред.). (2014). *Сравнительная характеристика различных видов газообразователей для производства газобетона*. Инновационное лидерство строительной и транспортной отрасли глазами молодых ученых: Сборник научных трудов молодых ученых по материалам Международной научно-практической конференции. Омск.

11. Лотов, В. А., Митина, Н. А. (2003). Влияние добавок на формирование межпоровой перегородки в газобетоне неавтоклавного твердения. *Строительные материалы. Наука*, 1, 2-6.

12. Сахаров, Г. П., Скориков, Е. П. (2005). Неавтоклавный энергоэффективный поробетон естественного твердения. *Известия ВУЗов. Строительство*, 7, 49-54.

13. Ткаченко, Т. Ф., Перцев, В. Т. (2011). Совершенствование технологии неавтоклавных пенобетонов. *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*, 4(24), 243-250.

14. Сиротин, О. В. (2016). Утеплитель из автоклавного газобетона марки D150. Трехслойный блок со средним слоем из АГБ D150. *Технологии бетонов*, 7-8, 11-15.

15. Hellers, Bo. G., Schmidt, Bo. G. (Eds.). (2011). Autoclaved aerated concrete (AAC) – the story of a lowweight material. 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete “Securing a sustainable future”. Bydgoszcz.

16. Мечай, А. А., Мисник, М. П., Колпацников, В. Л., Сеница, М., Шепутите-Юцике, Ю. (Ред.)

(2014). Наномодифицированный автоклавный ячеистый бетон. 8-я Международная научно-практическая конференция “Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения”: Сборник научных трудов. Минск, Могилев.

17. Чеканський, Б. Б., Луцук, І. В., Яремчук, Р. М. (2017). Особливості структуроутворення безклінкерних композиційних в'язучих за високих водотвердих відношень. *Вісник НУ ЛП. Збірник наукових праць. Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування*, 868, 106-111.

18. Луцук, І. В., Якимечко, Я. Б., Чеканський, Б. Б. (2017). Дослідження впливу виду вапна на властивості композиційного в'язучого за різних умов тверднення. *Збірник наукових праць ПАТ “УкрНДІ вогнетривів ім. А. С. Бережного”*, 117, 116-124.

19. Чеканський Б. Б., Луцук І. В. (2018). Оптимізація складу багатокомпонентного композиційного в'язучого. *Вісник НУ ЛП. Збірник наукових праць. Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування*, 886, 73-78.

20. Филатов, А. Н., Вудвуд, Т. Н., Иваненко, В. А. (2012). Поризация сырьевой смеси в технологии ячеистого бетона. *Строительные материалы*, 11, 28-32.

21. Сулейманова, Л. А., Ерохина, И. А., Сулейманов, А. Г. (Ред.). (2006). *Технология ячеистобетонных изделий с применением холодных формовочных смесей. Строительное материаловедение – теория и практика*: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. Москва.

22. Резанов, А. А. (2011). Внешнее давление газовой среды как дополнительный технологический фактор оптимизации процесса порообразования при производстве ячеистых силикатных бетонов. *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*, 3(23), 68-78.

**B. B. Chekanskyi, I. V. Lutsyuk**

Lviv Polytechnic National University,

Department of Chemical Technology of Silicate Materials

#### **NON-AUTOCLAVED HEAT INSULATING AERATED CONCRETE BASED ON COMPOSITE BINDER**

**The technological parameters of the swelling of the aerated concrete mixture based on without clinker composite gypsum-lime binder of the system “gypsum – quicklime – metakaolin – amorphous silica” behind the casting technology of forming were designed and optimized. The optimum limits of the mixing water temperature, the water-powder ratio, the mixture workability and the swelling multiplicity were established. In accordance with the technological parameters of the process, a gas generator was selected. The physical and technical properties of cellular concrete were investigated. The phase composition of the hardening products of aerated concrete was established using XRD.**

**Key words: gypsum, quicklime, metakaolin, amorphous silica, cellular concrete, average density, thermal conductivity, shrinkage.**