

Використання малоклінкерних вяжучих при виробництві автоклавного газобетону за різальною технологією

В. Р. Сердюк, Д. Г. Рудченко, Н. О. Дюжилова

Досліджено можливості оптимізації різальної технології виробництва автоклавного газобетону та використання малоклінкерних вяжучих. Враховуючи ціновий фактор, енерго-екологічні тенденції розвитку промисловості будівельних стінових і теплоізоляційних матеріалів, автоклавний газобетон має значні перспективи розвитку виробництва.

При переході на виробництво автоклавного газобетону меншої густини з однієї сторони зменшується загальна матеріалосмість виробництва, з іншої – зростають питомі витрати вяжучого (цементу) на одиницю маси газобетону. Дослідження були націлені на реалізацію низки технологічних рішень. Вони передбачають зменшення енергоємності виробництва шляхом мінімізації клінкерної складової у сировинній суміші та інтенсифікацію процесу виробництва з метою підвищення коефіцієнту конструктивної якості матеріалу і серійного виробництва газобетону меншої густини. Зменшення клінкерної складової, шляхом її заміни активними мінеральними добавками та доменним гранульованим шлаком, в умовах різальної технології є можливим за умови вирішення проблеми прискорення росту пластичної міцності газобетонного сирця на стадії формування його макроструктури.

Визначено що, реалізація примусового синтезу етtringіту на стадії формування газобетонної суміші з високим В/Т відношенням скорочує тривалість доавтоклавної витримки масиву сирця. Це забезпечує можливість використання мінеральних добавок та сприяє зростанню міцності кінцевого продукту. Заміна 10–15 % цементу добавкою ДГШ в складі газобетонної суміші при наявності додаткового вмісту гіпсового каменю 5–10 % в складі піщаного шламу забезпечує інтенсивне зростання пластичної міцності сирця до його розрізки та високу міцність кінцевого продукту.

Ключові слова: газобетон, мінеральні добавки, доменний гранульований шлак, малоклінкерне вяжуче, етtringіт.

1. Вступ

В автоклавному газобетоні поєднані відмінні конструкційно-теплоізоляційні властивості. За екологічними властивостями він наближений до деревини, а для його виробництва використовуються доступні сировинні матеріали – цемент, вапно, пісок та добавка алюмінієвої пудри.

Порівняння нормативних вимог з показними, близької за кліматичними умовами Фінляндії, свідчить про значне відставання українських нормативів. Якщо термічний опір для стін І кліматичної зони в Україні дорівнює $3,3 \text{ м}^2/\text{К}\cdot\text{Вт}$ і суміщеного перекриття відповідно $6,0 \text{ м}^2/\text{К}\cdot\text{Вт}$, то у Фінляндії ана-

логічні показники майже в 2 рази вищі і відповідно становлять 5,88 і 11,1 м²/К·Вт. Термічний опір для вікон в Україні складає 0,75 м²/К·Вт у Фінляндії – 1,0 м²/К·Вт. Товщина одношарових огорожувальних стін будівель із традиційних стінових матеріалів таких, як цегла глиняна повнотіла, силікатна цегла, керамзитобетон, за рахунок їхніх низьких теплофізичних властивостей, збільшилася в рази і стала неприйнятною для одношарових конструкцій стін.

Газобетон на сьогодні досить поширений в європейських та країнах СНД. Його доля ринку в стінових матеріалах країн колишнього Радянського Союзу становить приблизно 40–60 % в Україні – 53 %. З 2000 по 2019 рік обсяги виробництва цього матеріалу зросли в Україні в 36 разів – до 3,6 млн м³. За даними Всеукраїнської асоціації виробників автоклавного газобетону приблизно 80 % цей матеріал використовується приватними забудовниками при будівництві малоповерхового житла, решта – в монолітно каркасному висотному будівництві.

При цьому слід зазначити, що на сьогодні за рахунок держави в Україні будується лише 0,3–0,4 % житла. Тенденції зростання долі малоповерхового житла відповідають міжнародному досвіду та світовим тенденціям. В США, Канаді, розвинених країнах ЄС приблизно 75–80 % населення проживає в малоповерхових будинках, а будівництво багатоповерхових житлових будинків фактично обмежене.

Враховуючи ціновий фактор, енерго-екологічні тенденції розвитку промисловості будівельних матеріалів в цілому, і зокрема виробництва стінових матеріалів, автоклавний газобетон, як стіновий конструкційно-теплоізоляційний і теплоізоляційний матеріал, має значні перспективи розвитку виробництва та використання.

У зв'язку з необхідністю підвищення вимог енергозбереження та прогнозованим потенційним вдосконаленням технології виробництва ніздрюватого бетону в ДСТУ Б В.2.7-45:2010 «Будівельні матеріали. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови» внесені зміни – в підрозділ 4.1 перед маркою D200 додані марки D100 та D150, як ефективною мінеральною теплоізоляції (табл. 1). Такі зміни мотивують науковців та виробників автоклавного газобетону до вдосконалення технології його виробництва. Єдиним в Європі виробником пористого мінерального утеплювача пінобетону марки D100 є німецька компанія «Xella», яка виготовляє його під маркою «Multipor», склад якого запатентований.

За рахунок підвищення коефіцієнта конструктивної якості автоклавного газобетону в ДСТУ Б В.2.7-45:2010 були внесені зміни і марку газобетону D300 в залежності від класу міцності залишаючись теплоізоляційним одночасно отримав категорію конструкційно-теплоізоляційного матеріалу, що дає можливість передбачати це в будівельних проектах. Газобетон марки D300 і D400 з класом міцності C1,5 до C2,5 забезпечує несучу спроможність для 2-х поверхових будинків, стіни яких не потребують утеплення і відповідає діючим в Україні нормативам.

При переході на виробництва автоклавного газобетону меншої густини з однієї сторони зменшується загальна матеріалоемність виробництва, з іншої – зростають питомі витрати цементу на одиницю маси газобетону. Цілком очевидно, що при зменшенні густини газобетону товщина міжпорових перегородок

буде зменшуватись. Для забезпечення їх міцності мають бути збільшені витрати мінерального в'язучого (зокрема цементу).

Таблиця 1

Розширення марок теплоізоляційного автоклавного газобетону відповідно до внесених змін до ДСТУ Б В.2.7-45:2010 «Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови»

Марка за середньою густиною	Середня густина, кг/м ³	Клас міцності, С	Міцність, МПа, не менше	Теплопровідність у сухому стані, Вт/м·°С, не більше
D100	70–120	C0,25	>0,4	0,052
D150	120–170	C0,25	>0,4	0,058
D 200	180–220	C0,35	0,50	0,055
D 250	220–270	C0,5	0,72	0,065
D 300	270–320	C0,75	1,06	0,08

З боку виробників автоклавного газобетону, є зацікавленість в реалізації низки технологічних рішень, які спрямовані на інтенсифікацію виробництва, підвищення коефіцієнта конструктивної якості матеріалу, перехід на виробництво стінових блоків меншої густини, та в зменшення енергоємності виробництва шляхом мінімізації клінкерної складової мінерального в'язучого.

Розширення ресурсної бази при виробництві автоклавного газобетону за різальною технологією шляхом використання малоклінкерного в'язучого наразі є актуальною науково-технічною задачею, яка одночасно вирішує ряд енерго-екологічних проблем.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Як відомо з роботи [2], виробництво автоклавного газобетону базується на штучному синтезі гідросилікатів кальцію (переважно групи тоберморіту) при температурі 192...200 °С в середовищі насиченої пари тиску 1,2–1,4 МПа. Базовою складовою в'язучого газобетонної суміші виступає цемент з добавкою вапна, і така практика є загально прийнятою в країнах ЄС і СНД [3]. Хоча в [2] передбачено використання добавок доменного гранульованого шлаку (ДГШ), золи-винос, паливних шлаків та інших спеціально виготовлених видів мінеральних в'язучих.

Дослідження, які інтенсивно проводились ще на стадії становлення галузі промисловості виробництва автоклавного газобетону, як в європейських країнах, так і в країнах колишнього СРСР в 70–80 роки минулого століття знайшли відображення спочатку в СН 277-70 пізніше в СН 277-80 (Інструкції по виготовленню виробів з ніздрюватого бетону) [2], яка являється чинною по сьогодні.

Враховуючи актуальність зменшення енергії на виробництво автоклавного газобетону, інші в'язучі матеріали, постійно відбувається пошук альтернативної сировини і добавок до цементу, для зменшення екологічних наслідків від його виробництва, зокрема викидів CO₂ та споживання енергії [4–6].

В умовах різальної технології необхідно вирішити проблему прискореного росту пластичної міцності газобетонного масиву на стадії формування його макроструктури до різки сирця на блоки.

При цьому важлива роль відводиться саме мінеральним добавкам поліфункціональної дії, які не тільки сприятимуть зростанню міцності кінцевого продукту і скороченню витрат цементу, але забезпечать зростання пластичної міцності сирця на стадії формування, необхідної для кантування та розрізки газобетонного масива.

Використанню добавок гіпсового каменю, активних мінеральних добавок природного та штучного походження, ДГШ в умовах підвищених температур та надлишкового тиску пари присвячено багато досліджень, наведених в багаточисельних публікаціях. Дослідження, які були проведені раніше, умовно слід вважати дещо «лабораторними». Вони не враховують наявності в суміші зворотнього шламу (15...20 %), який при різальній технології виробництва є обов'язковою складовою газобетонної суміші – сучасні заводи та фактор видалення повітря, що втягується в суміш при швидкому заповненні форми.

Відповідно до досліджень [7], кристалічна фаза гранульованого шлаку представлена мікролітами окерманіта і мервініта, вкрапленнями в шлакове скло, проявляє гідратаційну активність, особливо при наявності добавки-активатора. При заміні частини портландцементу доменним шлаком від 20 до 80 %, міцність шлакоцементного каменю зростає на 17–41 %, але продовжується термін зростання пластичної міцності сирця.

Аналіз результатів досліджень [4–11], показують, що в умовах складних систем (цемент, вапно, ДГШ, природні мінеральні добавки, зворотній шлам) не до кінця досліджена роль гіпсового каменю.

З однієї сторони, відповідно до СН 277-80, гіпсовий камінь призначений для регулювання швидкості гідратації вапна. З іншої – за даними різних досліджень [6, 7] гіпсовий камінь є поліфункціональним компонентом в'язучого автоклавного газобетону. На стадії формування масиву він не тільки гальмує гідратацію вапна та урівноважує кінетику газовиділення із зростанням пластичної міцності сирця, а в процесі автоклавної обробки забезпечує приріст міцності кінцевого продукту. За даними [8], при попередньому гашенні 20–30 % вапна двуводним гіпсом і заміною до 50 % цементу на сталеплавильний шлак забезпечується підвищення міцності газобетонних зразків до 9,0 МПа.

Аналізуючи результати [9] теплової обробки відформованих виробів газобетону з ДГШ можливо робити висновок про те, що швидкість набору міцності збільшується в 1,5–2 рази, а кінцева міцність шлакогазобетону на 45–60 % вище ніж без пропарки при середній густині 550–700 кг/м³ міцність на стиск становить 1,8–3,0 МПа.

Згідно [10, 11], оптимальна добавка гіпсу в цементних системах при пропарюванні близька до значення, необхідного для зв'язування усієї кількості С₃А в моносольфатний гідроалюмінат кальцію; на 1 % С₃А в клінкері може бути додано до 1,6 % напівводного гіпсу. При гідратації С₃А в присутності гіпсу при будь-яких температурних умовах формується високосольфатна форма гідро-

сульфоалюмінату (еттрингіт), яка є більш щільною та міцнішою фазою, ніж гексогональні гідроалюмінати.

При використанні різальної технології виробництва автоклавного газобетону досить вагомим технологічним етапом стала необхідність витримки масиву та необхідність прискорення росту пластичної міцності газобетонного сирця, необхідної для його розрізки. Якщо цей процес затягується у часі – гальмується весь технологічний процес виробництва автоклавного газобетону.

Саме проблема необхідності швидкого приросту пластичної міцності газобетонної суміші з високим водотвердим відношенням ($V/T=0,6-0,7$) при литтєвій технології потребує співставлення у часі швидкості гашення вапна, газовиділення, кінетики гідратації клінкерної складової мінерального в'язучого до швидкого набору газобетонним сирцем пластичної міцності.

Подовжена витримка відформованих газобетонних масивів до моменту завантаження в автоклав впливає на графік роботи автоклавного відділення, подовжує технологічний цикл виробництва газобетону та приводить до зниження кінцевої міцності газобетону на 5,5–84 % [12].

Таким чином, при різальній технології зберігається конфлікт цілей окремих технологічних процесів виробництва автоклавного газобетону:

- надлишкова витримка відформованих масивів в часі до автоклавної обробки суттєво впливає на кінцеву міцність газобетону та на графік роботи автоклавного відділення підприємства;

- впровадження різальної технології передбачає необхідність витримки відформованого сирця до тих пір, поки не буде досягнута така пластична міцність, яка дозволяє транспортувати і здійснювати продольні і поперечні його розрізи на окремі стінові вироби;

- реалізація заходів зменшення клінкерної складової мінерального в'язучого та витрат вапна у складі сировинної суміші, шляхом введення до її складу ДГШ та інших добавок, практично завжди приводить до подовження терміну набору пластичної міцності сирця необхідної для розрізання масиву. Як наслідок – подовжується термін його доавтоклавної витримки і по суті всього технологічного процесу виробництва автоклавного газобетону.

Аналіз літературних даних та актуальних запитів сучасних виробництв автоклавного газобетону дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення досліджень, присвячених вирішенню цих конфліктів.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка оптимальних технологічних параметрів виробництва автоклавного газобетону за різальною технологією з використанням малоклінкерних в'язучих. Використання такої сировини дасть можливість зменшити енергоємність та інтенсифікувати процес виробництва шляхом мінімізації клінкерної складової у сировинній суміші та налагодити серійне виробництво виробів низької щільності з підвищеним коефіцієнтом конструктивної якості.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

– дослідити особливості різальної технології виробництва та визначити можливостей реалізації технологічних заходів націлених на інтенсифікацію виробництва;

– оцінити можливі параметри оптимізації складу в'язучого у сировинній суміші;

– провести дослідження впливу добавки ДГШ та гіпсу на реологічні властивості сировинної суміші та властивості готової продукції.

4. Особливості різальної технології виробництва газобетону

В 70–80 роки провідні світові фірми («Ітонг», «Хебель», «Верхан» (Німеччина) «Кальсілокс» (Данія), «Durex» (Нідерланди), «Чорі» (Японія), «Уніполь» (Польща) відмовились від запарювання газобетону в індивідуальних формах і перейшли на різальну технологію виробництва. В Радянському Союзі в рамках «наздоганяння» дещо з запізненням було запущено виробництво обладнання «Універсал – 60» и «Силбетблок», «Бобруйск – 1,2», «Конрекс 90/240».

Європейські виробники обладнання для виробництва автоклавного газобетону: «Wehrhahn» (Німеччина); «Aircrete» (Нідерланди); «Hess» (Нідерланди); «Masa Henke» (Німеччина) та інші тривалий час для забезпечення якості продукції передбачають використання різальної технології виробництва газобетону з певними технологічними особливостями. При відродженні промисловості виробництва автоклавних газобетонів, після її руйнації при трансформації економіки до ринку, в колишніх радянських республіках побудовані сучасні європейські заводи, які замінюють застарілі лінії «Універсал 60» і «Силбетблок». На нових заводах реалізована різальна технологія, яка передбачає високоточну розрізку масиву на окремі стінові блоки до автоклавної обробки. Вона гарантує високу точність лінійних розмірів стінових блоків (± 1 мм), забезпечує влаштування стику «паз-гребень» для зменшення промерзання стін та влаштування «захватів» для рук для зручності виконання кладки.

На відміну від формування та запарювання виробів в індивідуальних формах, при використанні різальної технології зростає оборотність форм, зменшується їх металоємність більше ніж в 2 рази збільшується коефіцієнт заповнення автоклава до 0,4–0,45. Вважається, що при цьому зменшуються на 20–30 % питомі енерговитрати на автоклавну обробку 1 м³ газобетону. Оскільки автоклавна обробка газобетонних виробів здійснюється без бортоснастки – на спеціальній запарочній решітці, то газобетонні блоки краще прогриваються. Це сприяє кращому синтезу низькоосновних гідросилікатів кальцію, які є основними носіями міцності автоклавних силікатних матеріалів. Бічні борти оснастки використовуються для переміщення і кантуватися масива-сирця. Пластична міцність сирця для його розрізки має бути достатньою для виконання різальних технологічних операцій і кантування масиву та повністю виключати можливість його деформації та появи тріщин.

Калібрування масиву передбачає вирівнювання поверхні і відбувається шляхом зрізання з боків приблизно на 3–5 см. зайвого шару сирця за допомогою спеціальних ножів і струн, таким чином формуються бічні поверхні сирого масиву. Потім масив розрізається в двох напрямках з влаштуванням в газобе-

тонних блоках системи «паз/гребінь». Різальний комплекс монтується над приямком, в якому розташована ємність для приготування і збору зрізаного сирця, або частіше передбачається система транспортерів для його подачі до приймальної ємності зворотного шламу. Різальна технологія є загально прийнятою в практиці європейських виробників обладнання газобетонних заводів хоча кожний виробник обладнання має певні технологічні відмінності.

5. Визначення можливих параметрів оптимізації складу в'язучого у сировинній суміші

Як було зазначено вище, головною цілю науковців та виробників автоклавного газобетону і по сьогодні залишається підвищення ККЯ, зменшення енергоємності виробництва, забезпечення високої міцності та точності геометричних розмірів стінових блоків.

Для зниження щільності бетону на кожні 50 кг/м^3 необхідно збільшити його пористість приблизно на 3,5...4 %. При цьому на кожен відсоток збільшення пористості міцність бетону знижується приблизно на 3...4 %. [13]. Автоклавний газобетон – це відносно новий будівельний матеріал, який масштабно використовується в будівництві з 1950–1960 років, це відокремлює питання його довговічності в окрему площину та є особливо важливим [14, 15] На сьогодні на будівельному ринку України затребуваний переважно газобетон густиною 400 та 500, швидко набуває популярності марка D300, а газобетон густиною 600–700 кг/м^3 і вище взагалі не виробляється.

Виробництво та використання автоклавного газобетону постійно націлене на зменшення його густини. Зниження густини газобетонних стінових блоків до сьогоднішніх показників ($400\text{--}300 \text{ кг/м}^3$), при збереженні високих фізико-механічних характеристик матеріалу, забезпечує цілу низку переваг, на стадії виробництва і особливо на стадії експлуатації. Особливу нішу в структурі стінових матеріалів займає конструкційно-теплоізоляційний автоклавний газобетон з щільністю 300 кг/м^3 . Ця марка теплоізоляційно-конструкційного матеріалу з'явилася на будівельному ринку відносно недавно. Його коефіцієнт теплопровідності в сухому стані становить $0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, а міцність на стиск 2,5 МПа. Газобетон з такими характеристиками у великому обсязі випускається на заводах Німеччини. В країнах СНД лише декілька заводів освоїли його виробництво. В Україні виробництво газобетону D300 розпочала компанія «Аерок», яка на сьогодні є єдиним виробником цих виробів.

З 2013 р. на заводах ТОВ «Аерок» розпочали серійне виробництво теплоізоляційного газобетону густиною 150 кг/м^3 .

Зниження густини газобетонних стінових блоків до сьогоднішніх показників ($400\text{--}300 \text{ кг/м}^3$), при збереженні високих фізико-механічних характеристик матеріалу, забезпечує цілу низку переваг, на стадії виробництва і особливо на стадії експлуатації.

Проте при переході на виробництво виробів з меншою густиною зростають питомі витрати цементу для забезпечення міцності міжпорових перегородок матеріалу.

На рис. 1 приведені розрахункові показники питомих витрат цементу в кг, які визначені на одиницю об'єму (1 м^3) силікатного матеріалу автоклавного газобетону марок D150; D300; D400 і D500. Зрозуміло, що додатковий приріст міцності автоклавного газобетону крім цементу забезпечує добавка вапна та природного гіпсу, який одночасно виступає регулятором гідратації вапна. Зворотній шлам, крім того, виконує функцію кристалічної затравки, підвищує седиментаційну стійкість суміші, забезпечує однорідність густини, міцності по всій висоті формовки.

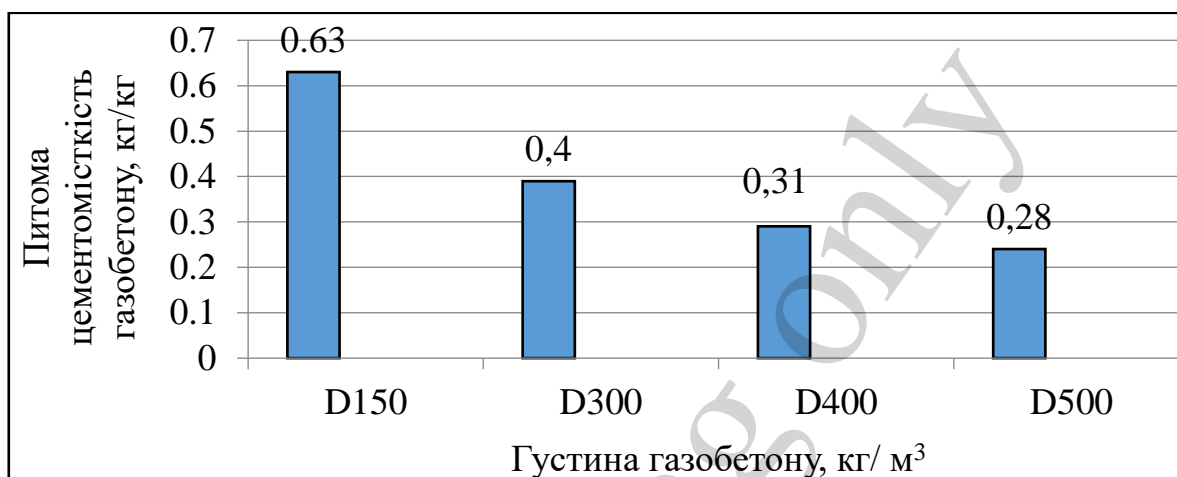


Рис. 1. Залежність енергоємності (витрат цементу) в кг. до приведенного газобетону різної густини, кг. цементу/кг. сухих компонентів сировинної суміші

Як видно з рис. 1, по мірі зменшення густини газобетону зростають витрати цементу на 1 м^3 газобетону. Це являється додатковим аргументом щодо доцільності досліджень зменшення енергоємності виробництва автоклавного газобетону шляхом використання ДГШ, паливних шлаків у виробництві. Це також обґрунтовують багаточисельні наукові дослідження ще з 60–80 років [15, 16], що заміна частини портландцементу ДГШ в автоклавних бетонах не тільки є рівноцінною портландцементу, але й призводить до додаткового зростання міцності та морозостійкості газобетону.

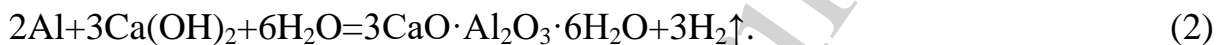
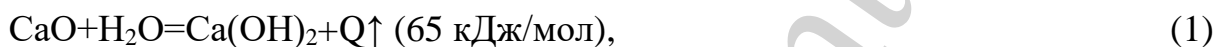
В виробничих умовах ТОВ «Аерок» після формовки масивів, вони витримуються в камерах набору пластичної міцності приблизно 2,5–3 години при температурі приблизно $50\text{--}55 \text{ }^\circ\text{C}$ для прискорення зростання часу пластичної міцності, достатньої для транспортування, та калібровки масиву.

В процесі формування партії завантажених автоклавних вагонеток до моменту переміщення їх в автоклав порізані масиви зберігаються в камерах тимчасової витримки. Важливість такого технологічного прийому, як наявність камер набору пластичної міцності та тимчасової витримки газобетону, цілком доцільна. Оптимальна пластична міцність масиву залежить від складу газобетонної суміші і буде різною для різних складів сумішей. Газобетонний масив відправляють на різку при наборі пластичної міцності до 340 Па.

В СН 277-80 при виробництві автоклавного газобетону передбачено використання цементу з термінами початку тужавіння не пізніше 2-х годин, та кін-

цем тужавіння не пізніше 4 годин. Як відомо, мінералогічний склад традиційного портландцементу представлений чотирма мінералами: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF і добавкою гіпсового каменю. По спадаючій швидкості гідратації мінерали розташовуються в наступний ряд: $C_3A > C_4AF > C_3S > C_2S$. Найбільшу міцність для всіх термінів твердіння цементу забезпечує C_3S , а за швидкістю гідратації – C_3A . Саме тому в СН 277-80 передбачений вміст C_3S не менше 50 %, а C_3A – не більше 6 %.

В композиційному в'язучому швидкість гідратації CaO впливає на швидкість гідратації цементу. Насичений розчин вапна сповільнює майже в два рази терміни тужавіння цементу. Екзотермічна реакція гідратації вапна відбувається з виділенням теплової енергії (1), при цьому газобетонний масив нагрівається та обезводжується і супроводжується реакцією газовиділення за рахунок наявності в суміші добавки алюмінієвої пудри (2):



З рівняння реакції (2) видно, що 2 граммолекули алюмінію (54 г) при взаємодії з вапном виділяють 3 молекули водню. В нормальних умовах одна граммолекула займає об'єм в 22,4 л. Отже, при вступі в реакцію 1 гр алюмінію, виділяється приблизно $1,244 \text{ л. водню } (3 \times 22,4) / 54$.

Українські виробники газобетону використовують алюмінієву пудру з вмістом активного алюмінію – 85–93 %, та пасти російського, польського, китайського та німецького виробництва з вмістом активного алюмінію в твердому залишку 75–92 %. Оскільки заливка газобетонної суміші у форму в промислових умовах відбувається при температурі приблизно 40 °С, то з врахуванням температурного фактора закону Гей-Люссака водню (v – об'єм водню) виділиться відповідно до (3):

$$V_{\text{водню}} = 1,244 \cdot \left(1 + \frac{40}{273} \right). \quad (3)$$

Температура гашення вапна в газобетонні суміші залежить від багатьох факторів – його активності, водотвердого відношення, дисперсності помелу, температурних умов процесу, складу в'язучого і суміші і т.п. Вапно для виробництва автоклавного газобетону має мати термін гашення 5–25 хв. і активність ($CaO + MgO$) не менше 80 % [17].

В результаті реакції гідратації вапна виділяється значна кількість тепла (Q)=1160 кДж на 1 кг. оксиду кальцію. [18]. За даними [19] в процесі автоклавної обробки гідроксид кальцію забезпечує додатковий нагрів силікатної маси при взаємодії з силікатними компонентами і утворенні гідросилікатів кальцію (80 кДж/кг для тоберморіту і 45 кДж/кг – для ксонотліту). Це приводить до додаткового підвищення температури в середині газобетонної суміші, що відпо-

відно може бути враховано в подальшому при впровадженні енергозберігаючих режимів автоклавної обробки газобетону. Також може бути передбачена завчасна утилізація цієї теплової енергії для потреб виробництва (перепуск пари в інші автоклави, нагріву камер попереднього дозрівання сирця, додаткового підігріву води, опалення, інші цілі).

6. Вплив добавки ДГШ та гіпсу на реологічні властивості сировинної суміші та властивості готової продукції

Проведені дослідження впливу добавки ДГШ та гіпсу в складі автоклавного газобетону на реологічні властивості суміші після формовки проводилось в декілька етапів. На першому етапі були проведені лабораторні дослідження з досить широким діапазоном сировинних компонентів та дозуванням ДГШ, після проведення яких склад суміші корегувався і на подальших етапах були випущені експериментальні формовки газобетонної суміші в промислових умовах діючого підприємства.

В якості базової сировинної суміші був використаний склад газобетону D300 з наступними витратами сировинних компонентів:

- цемент – 128 кг/м³;
- вапно – 16,7 кг/м³;
- піщаний шлам (сухий залишок) – 157 кг/м³ з них пісок 141 кг/м³;
- гіпсовий камінь – 16 кг/м³;
- зворотній шлам (сухий залишок) – 53 кг/м³ або 15 % від всіх сухих компонентів;
- газоутворювач алюмінієва пудра – 0,53 кг/м³.

При проведенні досліджень використовувались портландцемент Волиньцемент ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна» згідно з ДСТУ Б В.2.7-46:2010 ПЦ П/А-Ш-500. Відповідно до Сертифіката якості цемент вже містить добавку ДГШ 6,0...20 % та має наступний мінералогічний склад: C₃S 62...70 %; C₂S 8,3...18 %; C₃A 6,3...7,7 %; C₄AF 10,0...12,6. Початок тужавіння 110...205 хв. кінець 165...270 хв. Вміст SO₃ становить до 3,5 %.

Додаткова добавка природного гіпсового каменю до газобетонної суміші вводилась при мокрому помолі піску та ДГШ в шаровому млині.

Газобетонна суміш з температурою 43,7 °C заливалась в форму, В/Т відношення становило 0,69. Розплив суміші по стандартному циліндру Суттарда становив 31 см.

Після заливки суміші протягом 0,2..0,5 хв. з залитої газобетонної суміші видалялось повітря, яке було залучене в суміш в процесі заливки форми. Для цього використовувалась вібраційна установка, яка занурювалась в суміш. З моменту заливки масиву і до його обробки в автоклаві вимірювалась температура масиву та пластична міцність сирця до його розрізки на стінові блоки.

На рис. 2 приведена динаміка росту температури після формовки масиву. Вона вимірювалась електронним термометром з точністю ±0,01 °C на відстані приблизно 50–60 см від краю борта форми через кожні 10 хвилин.

Як видно з рис. 2, після заливки газобетонної суміші протягом 175 хвилин має місце зростання температури за рахунок екзотермічної реакції гідrataції

вапна та цементу. Приблизно через три години температура масиву зростає до 77 °С. Одночасно з заміром температури вимірювалась пластична міцність газобетонного сирця. Вапно, яке використовувалось при випуску дослідних партій автоклавного газобетону, мало активність більше 80 %, час гашення 6 хвилин, температура 60 °С, загальний час гашення не більше 25 хвилин, тонина помелу вапна характеризувалась залишком на ситі 80 мкм не більше 4 %.

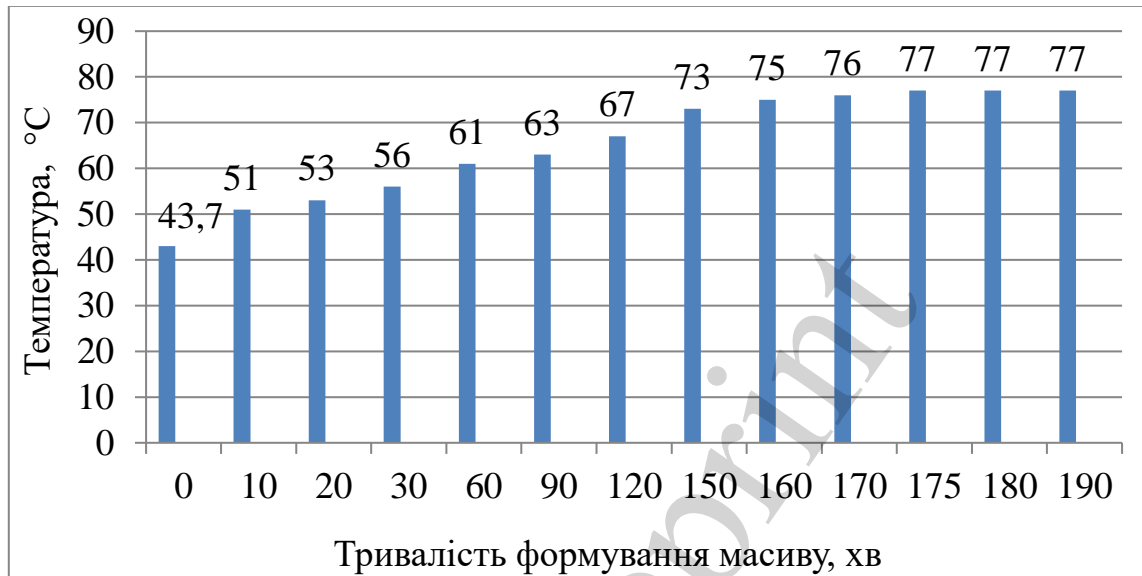


Рис. 2. Кінетика зростання температури масиву газобетонної суміші D300 після формовки

Для оцінки впливу добавки гіпсового каменю на гідратацію вапна були проведені стандартні дослідження. Використовувалось вапно українського виробника – Любомирського силікатного заводу – активністю (CaO+MgO) 80 %. Наявність в складі газобетонної суміші додаткової добавки гіпсового каменю приводить до гальмування процесу гідратації вапна (рис. 3).

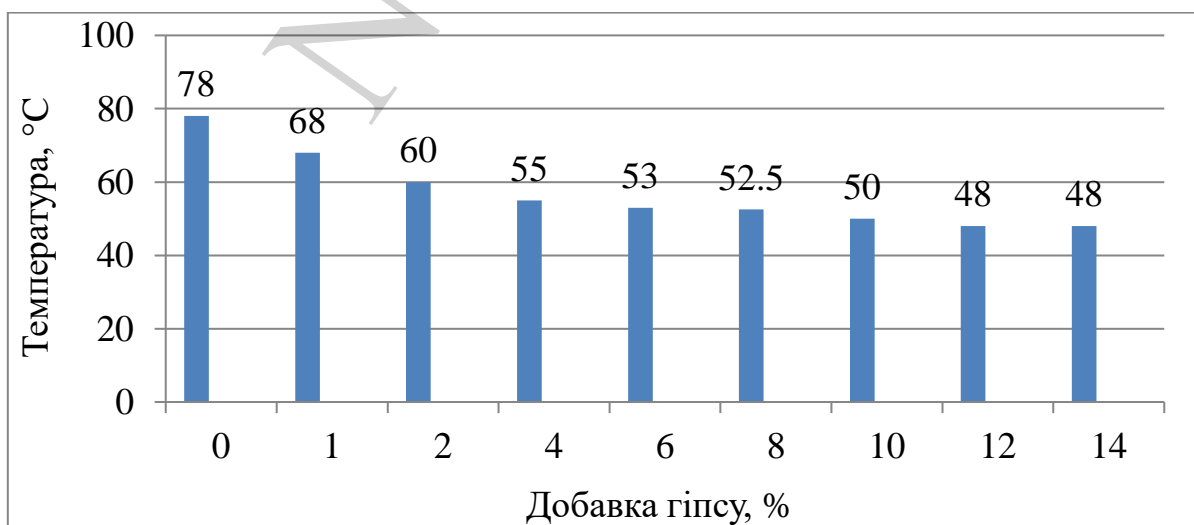


Рис. 3. Вплив добавки гіпсу на температуру гашення вапна

Як видно з рис. 3, при дозоровці гіпсу до 6 % відбувається стрімке зниження температури гідратації вапна.

Добавка гіпсового каменю при литтвовій технології формування масивів спочатку уповільнює початкову реакцію гашення вапна та гідратацію клінкерної складової мінерального в'язучого. Це позитивно впливає на реологію суміші, в'язкість якої забезпечує рівномірне зростання масиву за рахунок виділення водню та формування макропористості сирцю. По мірі закінчення газовиділення прискорюється гідратація цементу. Додатковим фактором стабілізації макропористості газобетону є утворення високоосновної форми гідросульфоалюмінатів кальцію, які ущільнюють та армують міжпорові перегородки газобетону та забезпечують фіксацію макроструктури відформованої суміші.

На рис. 4 приведена динаміка зростання пластичної міцності газобетонного сирцю. Як видно з графіку, при досягненні пластичної міцності 200–250 кПа і більше масив переміщається для калібрування та подальшої різки на вироби. Пластична міцність газобетонного сирцю вимірялась за допомогою стандартного конусного пенетрометра, заміри проводились на відстані 50–60 см від краю борта форми.

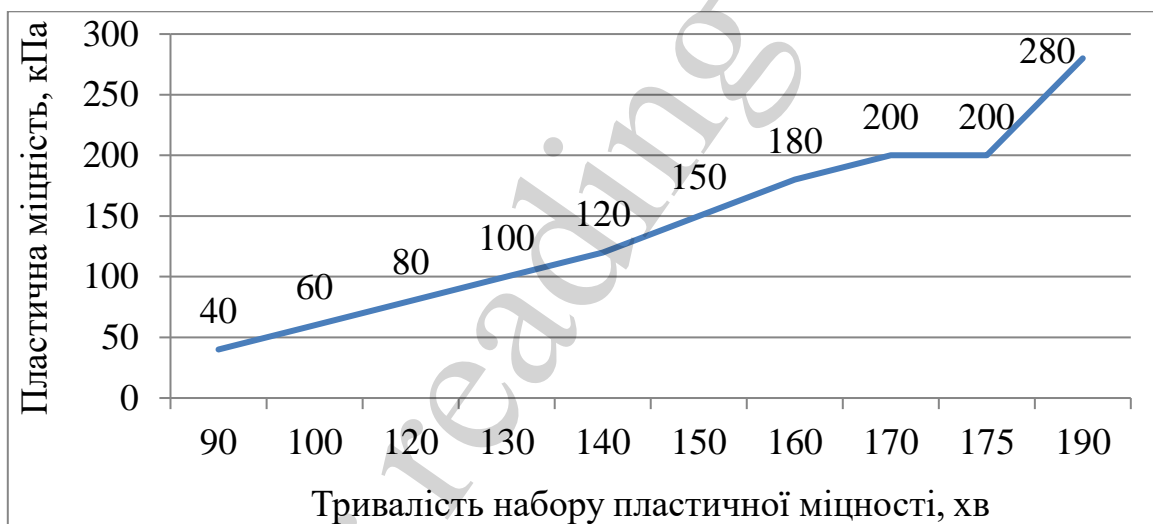


Рис. 4. Динаміка зростання пластичної міцності газобетонного сирцю

За даними [18], гіпс, незалежно від того, увійшов він до складу гідросульфоалюміната, чи ні, в автоклаві перетворюється в ангідрит CaSO_4 . При температурі 180°C він гідратується і переходить в напівводний сульфат кальцію, а при $120\text{--}130^\circ\text{C}$ – в гіпс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Ці процеси супроводжуються локальним збільшенням обсягу твердої фази, яка ущільнює мікроструктуру міжпорових перегородок газобетону, оскільки прийняте нами В/Т відношення суміші є досить високим і становить 0,65 для газобетону марки D300. Гіпс при наявності в суміші $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і SiO_2 сприяє прискореному синтезу гідросилікатів кальцію, так як підвищує ступінь пересичення рідкої фази іонами кальцію. Крім того, маючи більш високу розчинність по іонам Ca^{2+} в порівнянні з вапном, він підвищує ємність рідкої фази за цими іонами, що додатково стимулює синтез гідросилікатів кальцію. Автоклавна обро-

бка масивів проводилась при температурі 200 °С в середовищі насиченої пари при надлишковому тиску 14 бар за стандартним режимом прийнятим на підприємстві «Аерок».

Отримані результати узгоджуються з результатами досліджень авторів [3]. Формування фазового складу новоутворень автоклавного газобетону підпадає під загально відомі та досліджені процеси гідратаційного твердіння складових мінерального в'язучого автоклавного газобетону.

З теоретичних досліджень відомо, що при обезводненні природного гіпсу спочатку утворюється напівводний гіпс, при обезводненні якого отримують розчинний ангідрит γ -CaSO₄, який при температурах вище 170 °С переходить в нерозчинний β -CaSO₄ [20, 21]. В існуючих умовах гідратації вапна в середовищі насиченої пари напівводний гіпс CaSO₄·0,5H₂O можливо не обезводжується, і не кристалізується, зберігаючи свої властивості. Він не переходить в нерозчинну форму та зберігає свої хімічні властивості.

Вплив етtringіту на властивості цементних матеріалів завжди сприймався неоднозначно і залежить як від складу мінерального в'язучого, так і від зовнішніх факторів експлуатації цементних матеріалів. Відомо, що якщо етtringіт кристалізується в середовищі, яке насичене гідроксидом кальцію, він викликає розширення матеріалу та його ущільнення і може приводити до руйнування. При концентрації гідроксиду кальцію в поровій рідині матеріалу нижче 0,5 г/л, етtringіт кристалізується без істотного розширення, армує і зміцнює його структуру. При підвищених температурах понад 80–90 °С він перетворюється в моносольфатну форму 3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O.

Доцільність введення додаткової добавки гіпсу до складу газобетонної суміші при помолі кварцового піску на підприємстві ТОВ «Аерок» узгоджується з досвідом європейських виробників газобетону та рекомендаціями автора [3], які зазначають позитивну і негативну дію цієї добавки і пропонують обмежити її витрати для литв'язової технології – до 7 %, для ударної – до 2,5 %.

Високодисперсні продукти гашення вапна і утвореного напівводного гіпсу підвищують міцність автоклавного газобетону на основі цементу, піску та вапна з добавкою природного гіпсу в 1,5 рази в порівнянні з бездобавочними сумішами композиційного в'язучого. При цьому співвідношення компонентів: вапно-пісок-цемент-алюмінієва паста становило 1–3,2–0,8–0,0048 [18].

Особливість формування новоутворень на стадії зростання пластичної міцності сирця до автоклавної стадії формування газобетонної суміші пов'язана з її багатокомпонентністю. При цьому одночасно відбувається декілька хімічних процесів: гідратація вапна з виділенням тепла; гідратація цементу, яка пов'язана з мінералогічним складом клінкеру, перш за все з алюмінатною фазою (С₃А). Цей мінерал характеризується найбільшою швидкістю гідратації з утворенням гідроалюмінатів кальцію, які миттєво заповнюють поровий простір.

При цьому за рахунок наявності активаторів гідратації ДГШ розпочинається гідратаційне твердіння складових шлаку. Активаторами твердіння ДГШ служить сам цемент, гідроксид кальцію. Крім того, доречно звернутись до наукових напрацювань розробок [15, 16] сульфатно-шлакового цементу, в якому ДГШ активується гіпсом при наявності незначного вмісту Ca(OH)₂. Активність

ДГШ залежить від вмісту і структури шлакового скла, яке більш інтенсивно реагує з водою, ніж кристалічна фаза того ж самого складу. Максимальна гідравлічна активність ДГШ досягається при вмісті кристалічної фази до 5 %.

В звичайних умовах в цементних бетонах при гідратації C_3A утворюються гідроалюмінати змінного складу C_4AH_x , які в залежності від температури і вологості середовища можуть мати від 19 до 7 молекул води. При зміні рН рідкої фази цементного каменю або температури поступово переходять в кубічний більш стабільний C_3AH_6 , що створює напругу в структурі цементного каменю в звичайних умовах і знижує його міцність [22]. При наявності гіпсового каменю процес гідратації уповільнюється і на поверхні зерен C_3A утворюється оболонка етtringіту.



Етtringіт, як первинний продукт стабільно існує лише до того часу, поки існує достатня кількість сульфатів. Багатьма дослідженнями доведено, що як тільки концентрація SO_3 в розчині зменшується, етtringіт стає нестабільним і перетворюється в моносульфат:



При певній концентрації етtringіту, гідромоносульфоалюмінату кальцію та гідроксиду кальцію встановлюється рівновага між продуктами гідратації, що позитивно впливає на властивості утвореного цементного каменю. Порівняння з портландцементним каменем потенціал самозаліковування мікротріщин в газобетоні підвищується зі зростанням долі шлаку [6, 11].

На рис. 5 приведена міжпорова перегородка автоклавного газобетону в якій представлені продукти гідратаційного твердіння багатокомпонентного в'язучого. Проведення рентгенофазового аналізу зразків автоклавного газобетону показало, що новоутворення є традиційними для автоклавних бетонів, вони представлені: кварцем (SiO_2), піками $Ca(OH)_2$, $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ і гідросилікатами групи тоберморіту. На зразках з добавкою гіпсового каменю знижується інтенсивність піків, характерних для SiO_2 і зростає інтенсивність ліній характерних для низькоосновних гідросилікатів кальцію типу тоберморіта і гідросульфоалюмінатів кальцію. Це є логічним і повністю відповідає загальним положенням гідротермального синтезу новоутворень силікатних матеріалів з ідентичним складом компонентів.

При наявності гіпсу в складі портландцементу, зворотному шлам і окремій додатковій добавці, яка вводиться в млин при помелі кремнеземистого компоненту, для утворення етtringіту необхідна додаткова добавка Al_2O_3 (рис. 6).

Джерелами надходження Al_2O_3 до складу газобетонної суміші є сама алюмінієва пудра (один гр. якої приводить до утворення 46,5 гр. етtringіту), портландцемент (ДСТУ Б В.2.7-46:2010 ПЦ II/A-III-500 відповідно до Сертифіката якості цемент містить добавку ДГШ 9,0...16 % та C_3A 6,3...7,7 %), ДГШ (в

складі якого відповідно до Сертифіката ПАО «АрселорМіттал міститься від 7,5 до 12 % Al_2O_3).

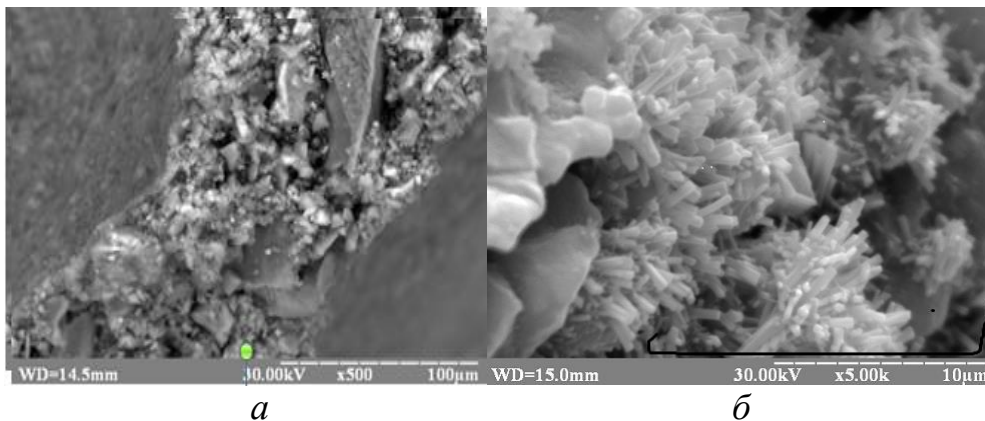


Рис. 5. Міжпорова перегородка автоклавного газобетону: *a* – 100 нм; *б* – 10 нм

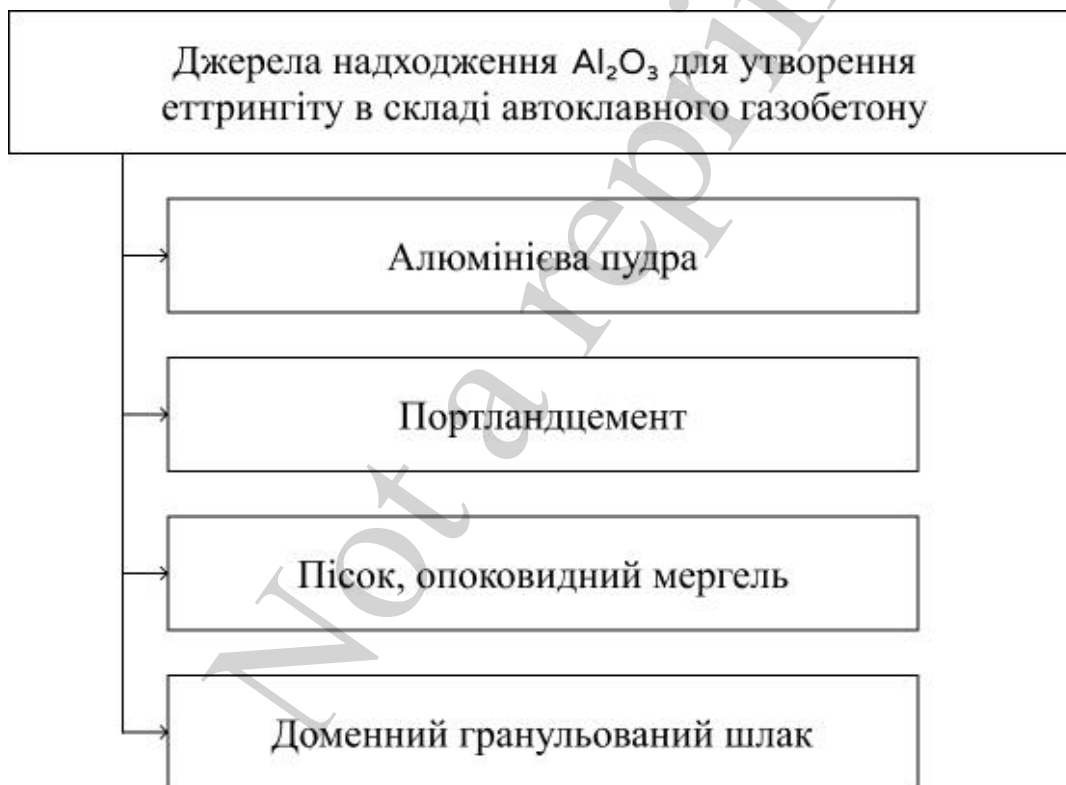


Рис. 6. Основні джерела надходження Al_2O_3 до складу автоклавного газобетону для синтезу еттрингіта

У роботі [3] рекомендується сумарний граничний вміст Al_2O_3 обмежити 7 %, але це потрібно ув'язувати з оптимальним дозуванням ДГШ та додатковим вмістом гіпсу в складі газобетонної суміші. Молотий ДГШ заміняє портландцемент (5; 10; 15; 20 и 25 %), виконує функцію вяжучого і частково кремнеземистого компонента, а також одночасно є джерелом Al_2O_3 для утворення еттрингіту при додаванні підвищеної добавки гіпсового каменю в газобетону суміш (рис. 7).

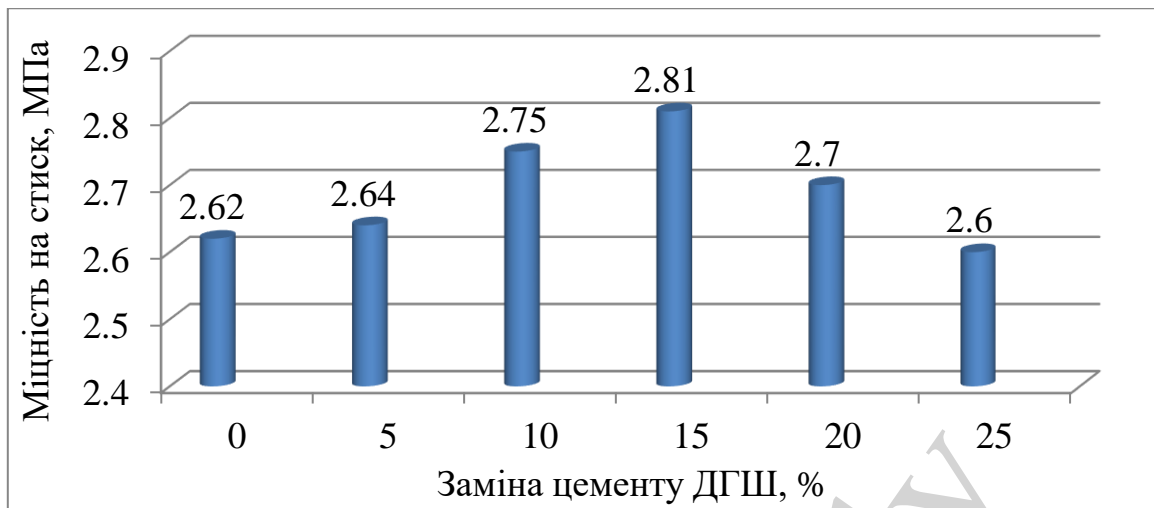


Рис. 7. Вплив заміни портландцементу добавкою ДГШ і гіпсу на міцність автоклавного газобетону D300.

Як видно з рис. 7, заміна 10–15 % цементу ДГШ одночасно вирішує декілька важливих практичних задач.

Ефективність добавки ДГШ в змішаному в'язучому складається з частки, що відповідає ефекту від заміни частини цементу, і частки від зміни міцності самого в'язучого. Для оцінки ефективності шлаку з урахуванням оцінки цих двох ефектів, може бути використана формула запропонована в [11]

$$\mathfrak{E}_m = \frac{100 \cdot \left(\frac{C_1}{R_1} - n \cdot \frac{C_2}{R_2} \right)}{\frac{C_1}{R_1}}, \quad (4)$$

де: C_1 – витрати цементу без шлаку в бетоні певного складу, кг;

R_1 – міцність бетону на вихідному цементі, МПа;

C_2 – витрати змішаного в'язучого, кг;

R_2 – міцність бетону на змішаному в'язучому, МПа;

n – частка вихідного цементу в змішаному в'язучому.

Причому, така оцінка ефективності добавки ДГШ не є повною. Враховуючи специфіку виробництва автоклавного газобетону, не враховується ефективність добавки ДГШ і додаткової добавки гіпсового каменю на стадії формування макропористості газобетонного сирця та фактора підвищення морозостійкості матеріалу, який є загально відомим та характерним для бетонів, що містять ДГШ.

Цілеспрямоване швидке утворення гідросульфоалюмінатів на стадії формування газобетонної суміші при високому В/Т відношенні забезпечує формування якісної макроструктури газобетону позитивно впливає на міцність матеріалу. В процесі автоклавної обробки висоководний еттрингіт трансформується в стабільні моноссульфогідроалюмінати, які мають більш високу міцність і додатково армують та ущільнюють низькоосновні гідросилікати кальцію.

7. Обговорення результатів дослідження використання малоклінкерних в'язучих при виробництві автоклавного газобетону за різальною технологією

На початковому етапі формування газобетонної суміші додаткова гіпсова добавка 2–6 % [3] знижує температуру гашення вапна (рис. 3) і подовжує цей термін його гасіння. Приблизно через 150–170 хвилин, саме за рахунок екзотермії переважно вапна, температура масиву зростає до 77 °С, хоча стандартний термін гасіння вапна становить 6 хвилин.

Завдяки високій температурі масиву частина води випаровується з нього, а алюмінатна складова, що міститься в цементі (C_3A), в газоутворювачі (алюмінієві пудрі), в ДГШ при наявності гіпсової добавки сприяє утворенню еттрингіту [18]. Кристали його у вигляді довгих тонких голок, що нагадують під мікроскопом деякі бацили (саме тому в технічній літературі він відомий, як «цементна бацила»), зв'язує вільну вологу, забезпечує тужавіння і зміцнення структури та умовно «армує» газобетонну суміш [18]. Як видно з рис. 4, приблизно через 170 хвилин суміш набуває пластичної міцності 280 кПа і більше, що дозволяє транспортувати її, розкривати борти, кантувати масив на 90 градусів, зрізати «горбушку» і бокову стружку та розрізати масив на стінові блоки. Таким чином забезпечується інтенсифікація технологічного процесу приросту пластичної міцності сирця газобетонної суміші до рівня, який забезпечує можливість зняття опалубки, кантування масиву та розрізки його на стінові блоки. Адаже перетримка відформованої газобетонної суміші до автоклавної обробки [12] може приводити до зниження міцності кінцевого продукту обробки газобетонної до 80 %.

Додатковим позитивним ефектом підвищеного вмісту гіпсової добавки в газобетонні суміші є збалансування у часі кінетики процесів її тужавіння з кінцем завершення процесу газовиділення. Це є особливо важливим і чутливим фактором формування якісної макропористості газобетону низької густини D150 та D300 при високому (0,65) В/Т відношенні за умови заміни частини цементу ДГШ. Саме правильна форма макропор та міцність силікатної маси забезпечують міцність газобетону.

Завдяки поліфункціональності дії гіпсової добавки [6, 7] в умовах автоклавної обробки газобетонної суміші за рахунок сульфатно-лужної активізації ДГШ в композиції, яка містить продукти гідратації портландцементу, вапна, зворотній шлам, порушується термодинамічно нестійка рівновага шлакового скла, пробуджується його гідравлічна активність та зростає кількість низькоосновних гідросилікатів кальцію [16, 18], які забезпечать скорочення витрат мінерального в'язучого та підвищення міцності автоклавного газобетону.

На рис. 5 а приведена міжпорова перегородка автоклавного газобетону, в якій представлені новоутворення, які є традиційними для автоклавних бетонів – гідросилікати групи тоберморіту, кварц (SiO_2), $Ca(OH)_2$, $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ і крупні частинки ДГШ. Гідравлічний потенціал ДГШ, через відносно низьку його дисперсність не може бути повністю вичерпаний, ДГШ розмелюється в промисловому млині мокрого помелу разом з піском і його дисперсність мала б бути значно вищою і становити 4000–5000 cm^2/g [3]. Європейський досвід використання

ДГШ свідчить про те, що він переважно реалізується в уже в розмеленому вигляді та готовий для використання в різноманітних цементних матеріалах.

Проведені дослідження не дали конкретної відповіді щодо внеску зворотнього шламу (до 20 % в складі газобетонної суміші), в зростання міцності газобетону. На сучасних заводах через замкнутий цикл безвідходної технології виробництва газобетону зворотній шлам повсюдно присутній для повторного використання. Як відомо, він виконує функцію кристалічної «затравки» та забезпечує однорідність властивостей газобетону по висоті формовки суміші і в певній мірі сприяє приросту міцності та економії клінкерної складової. Направлений синтез низькоосновних гідросилікатів кальцію CSH (I), тобермориту 11,3 Å, які здатні до зрощування, сприяє формуванню більш досконалої мікроструктури високоміцного цементного каменю.

Запропоноване технологічне рішення використання малоклінкерного в'язучого забезпечує масштабне виробництво на ТОВ «Аегос» (Україна) газобетону D300 з класом міцності в межах C1,5–C2,5 та автоклавного теплоізоляційного газобетону D150, який не виробляється в країнах СНГ і ЄС і є альтернативою традиційним теплоізоляційним матеріалам.

Подальший розвиток даного дослідження передбачає вивчення можливості подальшого зменшення клінкерної складової за рахунок використання мінеральних добавок гідралічної і пуцоланової дії в складі в'язучого автоклавного газобетону.

9. Висновки

1. У зв'язку з необхідністю підвищення вимог енергозбереження та прогнозованим потенційним вдосконаленням номенклатури виробів із автоклавного газобетону визначено переваги та особливості використання різальної технології при виробництві. Визначено технологічні рішення, що дадуть змогу отримати матеріал меншої густини та розширити можливості щодо використання сировинної бази. Зокрема необхідність після формовки масивів витримки в камерах набору пластичної міцності на протязі 2,5–3 годин при температурі 50–55 °C для прискорення зростання часу набору пластичної міцності. Доведена необхідність використання камер попередньої тимчасової витримки порізаних масивів сирцю на етапі формування партії завантажених автоклавних вагонеток до моменту переміщення їх в автоклав. Це сприяє кращому синтезу низькоосновних гідросилікатів кальцію, які є основними носіями міцності автоклавних силікатних матеріалів.

2. Визначені необхідні параметри для оптимізації сировинної суміші автоклавного газобетону в промислових умовах різальної технології що дадуть можливість використання малоклінкерного в'язучого та зберігання при цьому технологічного регламенту. Зокрема – залежність енергоємності витрат цементу до приведенного газобетону різної густини та динаміка зростання пластичної міцності масиву і необхідні температурні фактори при формуванні структури матеріалу. В промислових умовах використання різальної технології реалізована масштабна технологія виробництва автоклавного газобетону з використанням малоклінкерного в'язучого.

3. Заміна 10–15 % цементу добавкою ДГШ в складі газобетонної суміші при наявності додаткового вмісту гіпсового каменю 5–10 % в складі піщаного шламу забезпечує інтенсивне зростання пластичної міцності сирця до його розрізки та високу міцність кінцевого продукту після автоклавної обробки за умови збереження всіх технологічних процесів щодо забезпечення температурного режиму формування суміші.

Доведено, що реалізація примусового синтезу еттрингіту на стадії формування газобетонної суміші з високим В/Т відношенням прискорює тривалість доавтоклавної витримки масиву сирця забезпечує можливість використання мінеральних добавок та сприяє зростанню міцності кінцевого продукту.

Література

1. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель (2017). Київ, 37.
2. СН 277–80. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона (2001). М.: ГУП ЦПП, 47.
3. Кафтаева, М. В., Рахимбаев, Ш. М., Жуков, Д. А., Ковалевская, К. Ю., Шугаева, М. А., Марушко, М. В. (2014). Обоснование требований к сырьевым материалам для автоклавного производства газосиликатных бетонов. *Современные проблемы науки и образования*, 1.
4. Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113–127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>
5. Li, B., Ling, X., Liu, X., Li, Q., Chen, W. (2019). Hydration of Portland cements in solutions containing high concentration of borate ions: Effects of LiOH. *Cement and Concrete Composites*, 102, 94–104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.010>
6. Yang, J., Huang, J., He, X., Su, Y., Tan, H., Chen, W. et. al. (2019). Segmented fractal pore structure covering nano- and micro-ranges in cementing composites produced with GGBS. *Construction and Building Materials*, 225, 1170–1182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.016>
7. Малькова, М. Ю. (2005). Строительные материалы гидратационного твердения из низкоосновных доменных шлаков. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 103.
8. Рудченко, Д. Г. (2012). О роли гипсового камня в формировании фазового состава новообразований автоклавного ячеистого бетона. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*, 43, 47–54.
9. Пойкерт, С. (1976). Влияние гипса на свойства цементного раствора и цементного теста, подвергнутых кратковременной термической обработке. Т. 2, Кн. 2. М.: Стройиздат, 135–139.
10. Фомина, Е. В., Кудеярова, Н. П. (2006). Прочность смешанного вяжущего на извести предварительного гашения с добавкой природного гипса. *Известия вузов Северо-Кавказский регион. Технические науки*, S6, 17–19.
11. Huang, H., Ye, G., Damidot, D. (2014). Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 60, 68–82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.010>

12. Боженков, П. И., Кавалерова, В. И. (1961). Влияние режимов автоклавной обработки на свойства растворов и бетонов. Бюллетень технической информации Главленстройматериалов, 9, 64.
13. Солонина, В. А., Зимакова, Г. А., Баянов, Д. С., Шарко, П. В., Зелиг, М. П. (2017). Синтез структур ячеистобетонных композитов с наноразмерными компонентами. Вестник МГСУ, 12 (7 (106)), 724–732. doi: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.7.724-732>
14. Malolepszy, J., Laskawiec, K. (2017). The today and tomorrow of autoclaved aerated concrete. Cement Lime Concrete, 5, 358–370.
15. Łaskawiec, K. (2016). Skurcz betonu komórkowego - w teorii i praktyce inżynierskiej. MATERIAŁY BUDOWLANE, 1 (6), 224–225. doi: <https://doi.org/10.15199/33.2016.06.92>
16. Бутт, Ю. М., Рашкович, Л. Н. (1965). Твердение вяжущих при повышенной температурах. М., 224.
17. Сердюк, В. Р., Рудченко, Д. Г. (2015). Алюминиевые газообразователи в технологии производства ячеистого бетона. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 1 (18), 39–45.
18. Кудеярова, Н. П., Ожерельева, А. Ю. (2019). Влияние добавки гипса на качество композиционного вяжущего для изделий ячеистой структуры. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 6, 96–101. doi: https://doi.org/10.34031/article_5d0a380978a0d8.85307277
19. Кафтаева, М. В., Рахимбаев, И. Ш. (2013). Тепловыделение при синтезе гидросиликатной связки автоклавного газобетона. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 10-3, 373–376.
20. Бутт, Ю. М., Сычев, М. М., Тимашев, В. В. (1980). Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 472.
21. Шпынова, Л. Г. (1985). Исследование свойств извести. Строительные материалы, 6, 26–27.
22. Шейкин, А. Е. (1974). Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. М.: Стройиздат, 191.