

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **«Тепловологісний режим та теплотехнічні
характеристики пінобетонних стін»**

КРМ.192 БЦмд_21 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Технології будівельних конструкцій,
виробів і матеріалів» спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
ступеня вищої освіти магістр групи
192БЦмд_21
Яроцький Богдан Анатолійович
Керівник: Шультгін В.В.

Полтава 2024 року

	ЗМІСТ	С.
ВСТУП		4
РОЗДІЛ 1		6
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ		6
РОЗДІЛ 2		29
МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ		29
РОЗДІЛ 3		30
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ		30
3.1 Методика підбору складу пінобетону		30
3.2 Технологія виготовлення зразків		33
3.3 Розподіл вологості та температур в пінобетонній стіні		33
3.4 Дослідження теплопровідності пінобетону в установці ИТС-1		34
3.5 Дослідження теплотехнічних характеристик пінобетону в кліматичній камері		34
3.6 Глибина карбонізації пінобетону		37
3.7 Методика дослідження ступеня і характеристик пористості		38
3.8 Зміна міцності пінобетонних блоків із фрагмента огороджуючої конструкції в умовах експлуатації		39
РОЗДІЛ 4		40
ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ		40
4.1 Портландцемент		40
4.2 Кварцовий пісок		42
РОЗДІЛ 5		48
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ		48
5.1 Склад пінобетону		48
5.2 Результати дослідження розподілу вологості в пінобетонній стінці		48
5.3 Результати дослідження розподілу температур в пінобетонній стінці		52
5.4 Дослідження теплопровідності пінобетону в установці ИТС-1		55
5.5 Дослідження теплотехнічних характеристик пінобетону в кліматичній камері		58
5.6 Глибина карбонізації пінобетону		61
5.7 Ступень та характеристики пористості		63
5.8 Зміна міцності пінобетонних блоків із фрагмента огороджуючої конструкції із терміном експлуатації 5 років		65
РОЗДІЛ 6		69
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ		69
РОЗДІЛ 7		71
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ		71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		73

ВСТУП

Проблема енергозбереження в будівництві набула загальнодержавного значення. В умовах енергетичної кризи високі теплозахисні властивості будівельного матеріалу мають першочергове значення, тому що витрати на утримання будинків при постійно зростаючій вартості енергії все більше визначаються витратами на опалення й кондиціонування. Традиційні будівельні вироби: керамічна й силікатна цегла, легкобетонні блоки та панелі, з яких раніше будувався основний обсяг житлових і суспільних будинків, за теплотехнічними показниками і матеріалоемністю стали непридатними для влаштування одношарових зовнішніх стін. Для будівництва сучасних енергоекономічних жилих будівель потрібні матеріали та вироби із підвищеними теплозахисними показниками. Державна політика розвитку енергозбереження, складовою якої є підтримка і сприяння розвитку промислового виробництва енергоефективних, теплоефективних будівельних стінових матеріалів, спрямована, насамперед, на зменшення споживання енергоносіїв, зниження енергомісткості ВВП і підвищення конкурентоздатності національного виробника.

Як свідчить вітчизняний та зарубіжний досвід, одними з найбільш перспективних теплоефективних матеріалів, яким притаманні високі фізико-технічні та теплоізоляційні властивості, є ніздрюваті бетони. Саме тому сьогодні питанням їх виробництва і застосування в Україні приділяється надзвичайно велика увага. На даний час ніздрюватий бетон використовується в будівництві недостатньо, хоча за рядом характеристик є досить перспективним як для багатоповерхового, так і котеджного будівництва. Останнім часом невтопкований ніздрюватий бетон, одержуваний за пінною технологією, викликає підвищений інтерес із боку вчених-матеріаловедів і практиків-будівельників. У будівництві його можна використовувати як в якості конструкційного матеріалу, так і для завдань, коли потрібно зберігати тепло. Про довговічність необхідно сказати те, що з часом пінобетон тільки збільшує свої показники. При порівнянні пінобетону з іншими матеріалами треба враховувати, що:

- він екологічно чистий, паропропускний, негорючий;
- легко виробляється як у стаціонарних умовах, так і на будівельному майданчику;
- виготовляється з доступних у будь-якому регіоні компонентів;
- собівартість пінобетону невисока.

Перспективність виробництва теплоізоляційних будівельних стінових матеріалів, зокрема таких, як пінобетонні та газобетонні блоки, підтверджується існуванням державної програми розвитку виробництва виробів з ніздрюватого бетону і їх використання у будівництві на період 2005-2011 років. Розробники державної програми стверджують, що в найближчі роки це має поступитися своїми домінуючими позиціями на ринку будівельних стінових матеріалів пористому бетону як у зведенні висотних, так і малоповерхових будівель.

Ніздрюватий бетон має всі основні переваги, що відповідають сучасним вимогам до будівельних матеріалів, але при цьому він вимагає високої культури виконання будівельних робіт, урахування накопиченого досвіду та нормативних документів.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Історія виникнення і розвитку технології пінобетону

Ніздрюваті бетони вперше були отримані в 1889 році чеським ученим Гоффманом. Він додав до рихлих цементних і гіпсових розчинів хімічні речовини (кислоти, солі), що виділяли під час реакції газ [1]. Цей газ створював ніздрювату структуру в твердих розчинах. На жаль, патент Гоффмана не отримав практичного застосування. Наступний крок в цьому напрямку був зроблений в 1914 році американцями Аулсвортом і Дайлером, які запропонували використати в якості газоутворювача порошки алюмінію, цинку і деяких інших металів, котрі при взаємодії з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ виділяли водень і діяли як спучуючі добавки. Цей винахід можна вважати початком сучасної технології газобетону.

Знову спосіб отримання пінобетону шляхом змішування розчинів зв'язуючих речовин з піною запропонував датський інженер Байер в 1911 році. Але практичне виготовлення пінобетону цим способом почалось лише в 1923-1925 роках. Пінобетон був запатентований німецьким інженером Бауером в 1923 р., на підставі чого в 1924 р. початий випуск промислового пінобетону датською фірмою "Христиани й Нильсен" [2]. Відтоді було видано велику кількість патентів на способи отримання пінобетону з різних видів мінеральної сировини і з різними піноутворювачами. Пінобетон застосовувався багаторіч у вигляді збитого кладочного розчину з додаванням білкового піноутворювача - курячий жовток. Це дозволяло знизити тепловідність кладки, що важливо для нашого холодного клімату, підвищити її морозостійкість, міцність, повітронепроникність.

Після Першої світової війни шведський архітектор Аксель Ерік-Сон удосконалив рецептуру газобетону Ейлсворта й Дайлера, поділившись нею в 1923 р. з фірмою "Stovde Stenhuggeri og Kalkbrug", що початку промислового випуску виробів. В 1929 р. по нових патентах і під керівництвом Еріксона почате виробництво газобетонних виробів під фірмовою маркою Йтонг (Ytong - аббревіатура Yxhult i Betong) на основі вапна й сланцеві золи. До кінця 20-х рр. ХХ

в. в Америці і Європі працювало близько 100 малих виробництв з випуску газобетону [2].

З 1934 р. під фірмовою маркою Сипорекс на основі патентів інженера Ільару Еклунда почате виробництво цементного газобетону. З 1939 р. працює фірма "Хебель", що використовує змішане в'язуче.

У Німеччині масове виробництво пінобетону почате в 1929 р. різними фірмами під відповідними фірмовими назвами (Бетодел, Бетопорит, Целлобет, Изобет, Поренбетон, Ипоритбетон, Термобет, Аерокрет, Шимабетон, Целоліт, Бебаліт і т.д.). Така тенденція давати виробам якогось виробництва особливу назву як відгомін "дитячої хвороби технологій" зберігається дотепер, заважаючи будівельникам орієнтуватися в ринку й стандартах.

Роботи з пінобетону початі в 1922 р. інженерами Л.С. Песельником, що уже в 1923 р. одержав ніздрюватий ґрунтобетон, П.Г. Фреймарком, Гензелем і в 1929 р. грунто Н.В. Богданова, А.А. Брюшкова й ін. по піно- і газобетонах. У зв'язку з відсутністю в країні виробництва алюмінієвої пудри вибір був зроблений на користь пінобетону, масове виробництво якого почалося в країні з 1930 р. для заміни коркового утеплювача. В двадцяті роки пінобетон вже широко використовувався для монолітної теплоізоляції покрівель промислових будівель [3].

З 1929 р. заробили заводи по випуску виробів з автоклавного пінобетону (в основному у вигляді плит покриттів промбудівель і стінових блоків, які особливо розгорнулися в післявоєнний період, даючи потужний імпульс індустріальному великоблочному й великопанельному дообудівництву. На основі досвіду будівництва першого будинку (м. Березники, 1953 р.) була розроблена 439-я серія пятиповерхівок з переречними несучими стінами, що широко впроваджувалася в Уральському і інших регіонах. Вартість березниковських стін у грошовій оцінці становила 60-69% від вартості стін із цегли [2].

Але оскільки при автоклавній обробці пінобетон показав недостатню тріщиностійкість, в подальшому перевага була віддана газобетонам, особливо

країні був ліквідований дефіцит алюмінієвої пудри, і газобетон виявився вигіднішим за пінобетон. Луганський комбінат ніздрюватобетонних конструкцій, побудований з використанням польського обладнання, став першим великим (потужність - 180 тис. м³/рік) виробником ніздрюватобетонних виробів в Україні.

Згодом на основі досвіду виготовлення ніздрюватобетонних виробів з використанням польського технологічного обладнання в Україні було побудовано ще чотири великих спеціалізованих підприємства по виготовленню виробів з ніздрюватого бетону.

- Білгород Дністровський експериментальний завод ніздрюватих бетонів і виробів потужністю 130 тис. м³/рік;
- Миколаївський комбінат силікатних виробів потужністю 140 тис. м³/рік;
- Славутський завод силікатних стінових матеріалів потужністю 180 тис. м³/рік;
- Сумський завод силікатних стінових матеріалів потужністю 140 тис. м³/рік [1].

Заводи пінобетону поступово закривались. Ця теплоізоляція пройшла успішні експлуатаційні випробування впродовж строка років роботи з слядних ґрунтових умовах міста та слугує до сих пір.

Впродовж 60-х будувались десятки заводів із виробництва виробів та конструкцій із автоклавного газобетону уже по досконалим вітчизняним технологіям. Що стосується пінобетону, то увійшло тільки Славутська КПД, збудований за проектом, який розробив для 108-ї і типову серію пінобетонних будівель (108 серія), що сформувала нове місто.

Не зважаючи на домінування газобетону, науково-дослідницькі та дослідницько-конструкторські роботи по пінобетону продовжувались та набагато випередили роботи західних учених [2].

Було розроблено, досліджено та нормовано багато конструкцій із пінобетонів (як прискореного, так і природного твердження), в тому числі стінові блоки та панелі, елементи каркасу (колони, ригелі, рами підвалу), багатопустотні

попередньо напружені панелі перекриття, фундаментні підлоги, теплоізоляція підземних трубопроводів, палі.

У післяперебудовний час (з 1985 року) у зв'язку із різким зростанням цін на енергоносії, коли автоклавна обробка стала економічно не вигідною, а вимоги до теплозахисту будівель виростили більше ніж у 3 рази, знову відродився інтерес до неавтоклавного пінобетону при збереженні виробництва автоклавного ніздрюватого бетону. З 1995 року починається стрімке нарощування обсягів виробництва неавтоклавного пінобетону з використанням більш ефективних піноутворювачів і спеціальних повітрязатягуючих домішок [3].

На сьогоднішній день найбільш відомими великими виробниками ніздрюватих пінобетонних виробів в Україні є наступні підприємства [1]. :

- ВАТ “Обухівський завод пористих виробів” (м. Обухів, Київська обл.);
- ВАТ “Житомирський завод силікатних виробів”;
- ВАТ “Білгород-Дністровський експериментальний завод пористих бетонів” (м. Білгород-Дністровський, Одеська обл.);
- ТОВ “Силікатобетон” (м. Суми);
- ВАТ “Купальський завод будівельних матеріалів”.

1.2 Сучасний стан та перспективи галузі пінобетону

В червні 2019 року наказом Мінрегіонбуду була затверджена Галузева програма підвищення енергоефективності у будівельній галузі на 2020 - 2025 роки. Серед головних завдань реалізації цієї програми зазначені такі: сприяння впровадженню в нере багатоквартирне житлове будівництво сучасних енергоефективних стілових виробів; зменшення енергоємності виробництва будівельних матеріалів; утеплення огорожувальних конструкцій [1].

У зв'язку із постійним зростанням цін на енергоносії шорочний економічний ефект від використання теплоізоляції, і ніздрюватих бетонів зокрема, як матеріалу, що найбільше відповідає нормам теплоізоляції, буде зростати. За даними А. Павліка, директора Кнауф Інсулейшн Україна, за перші три квартали 2021 року порівняно із аналогічним періодом 2020-го року зростання ринку ТІМ

склав приблизно 25% [12]. «Це один з найвищих показників у порівнянні з іншими сегментами ринку будівельних товарів і послуг. Тому є кілька причин. Незважаючи на зниження загального обсягу виконуваних будівельних робіт, більша частина об'єктів, що здавалися в 2020-2021 рр., були зведені в попередній період. Останні два роки на цих об'єктах велися опоряджувальні роботи, у тому числі монтаж утеплювачів. Після прийняття нових будівельних норм в 2018 р. жоден об'єкт нового будівництва не може відповідати нормативним вимогам, якщо при його спорудженні не використовувалися теплоізоляційні матеріали».

Тому очікується, обсяг ринку теплоізоляції виросте на 20-25% і в кількісному вираженні, швидше за все, досягне рівня 2022 р. - приблизно 8 млн. куб. м.

Зважаючи на все, Україна так чи інакше підеш за кроками західних країн, де споживання ТІМ росло в міру підвищення цін на енергоносії. Навіть Польща в рік споживає більше 10 млн. куб. м утеплювача і щорічно її ринок росте на 10-15% [12]. Дані, оголошені асоціацією «Укрцемент», говорять про те, що міцнірваті бетони у 2021 році показали впевнене зростання [13].

Неавтоклавний пінобетон користується особливою популярністю в Германії, Голандії, Скандинавських країнах, Чехії. Причому в Чехії блоки з нього називають «біоблоками» через високі екологічні показники.

Для покращення позицій пінобетону в Україні важливим є питання підвищення якості неавтоклавного пінобетону. Для цього необхідно при організації виробництва використовувати всі існуючі технологічні прийоми, які дозволяють виробляти високоякісну продукцію з високою міцністю й великою довговічністю. Необхідно приділяти увагу поліпшенню структури пінобетону на стадії формування та тепловологісної обробки з регульованими параметрами температури й вологості середовища, зниження залишкових вологості бетону і подальшої усадки. Комплексний підхід до дотримання технології неавтоклавного виробництва міцнірватого бетону дозволяє наблизити фізико-механічні характеристики цього виду матеріалу до автоклавного бетону.

1.3 Загальні технічні характеристики пінобетону

Ніздрюваті бетони являють собою штучні кам'яні матеріали, що мають поряд зі звичайними порами (пори гелю, контракційні, капілярні, умовно-замкнуті) цементного каменю, мікропори коміркового виду. Останні виходять у результаті затвердіння поризованої після затворення водою суміші цементу, тонкодисперсного кремнеземистого компочента й пороутворювача, іноді з додаванням вапна й гіпсу.

За способом пороутворення ніздрюваті бетони поділяються залежно від способу створення пористої структури: газоутворенням (газобетони, газосилікати); піноутворенням (пінобетони, піносилікати); аеруванням (аерований ніздрюватий бетон або силікат). Можливі сукупні комбінації даних способів: спучування газоутворенням у вакуумі (невелике розрідження); аеруванням маси під тиском (бароблудування її стисненням повітрям) з наступним зниженням тиску до атмосферного (баротермальний спосіб) [4].

Залежно від співвідношення компонентів, ніздрюваті і, з тому числі, пінобетони можуть бути [3]:

- теплоізоляційними, з щільністю у висушеному стані 200-600 кг/м³,
- конструкційно-теплоізоляційними (для огорожуючих конструкцій), 600-900 кг/м³,
- конструкційними (для залізобетону), $\rho=900-1300$ кг/м³.

Залежно від вимог до виробів та технології виробництва в якості зв'язуючої речовини можуть застосовуватись цемент, вапно-гіпс або їх композиції, а в якості дисперсної – пісок (мелкий чи немолотий) або зола ТЕЦ.

За видом застосовуваного режиму твердіння ніздрюваті бетони можуть бути автоклавні, прогарні та природного твердіння.

Отже, до основних видів ніздрюватих бетонів належать газо- та пінобетон і газо- та піносилікат. Меншого застосування дістали газо- та пінозолобетон, газо- та пінозолосилікат, газо- та піносилікальцит, газо- та піношлакобетон, газо- та пінослучезолобетон та інші різновиди ніздрюватих бетонів за застосовуваною

в'язуючою речовиною. Розглядаючи пінобетон, необхідно звернути увагу на такі його основні переваги [5]:

1 Високі теплоізоляційні властивості - завдяки пористій структурі пінобетон є конструкційним і теплоізоляційним матеріалом. Його теплоізолююча здатність в 3-3,5 рази вище, ніж у цегляної стіни. Коефіцієнт теплопередачі пінобетону марки за середньою густиною D700 становить $0,23 \text{ Ккал/кв.м час}^\circ\text{С}$, тоді як глиняної цегли - $0,8 \text{ Ккал /кв.м годину }^\circ\text{С}$. Порівняльна діаграма середньої теплопровідності пінобетону та інших матеріалів у сухому стані [9] приведена на рисунку 1.

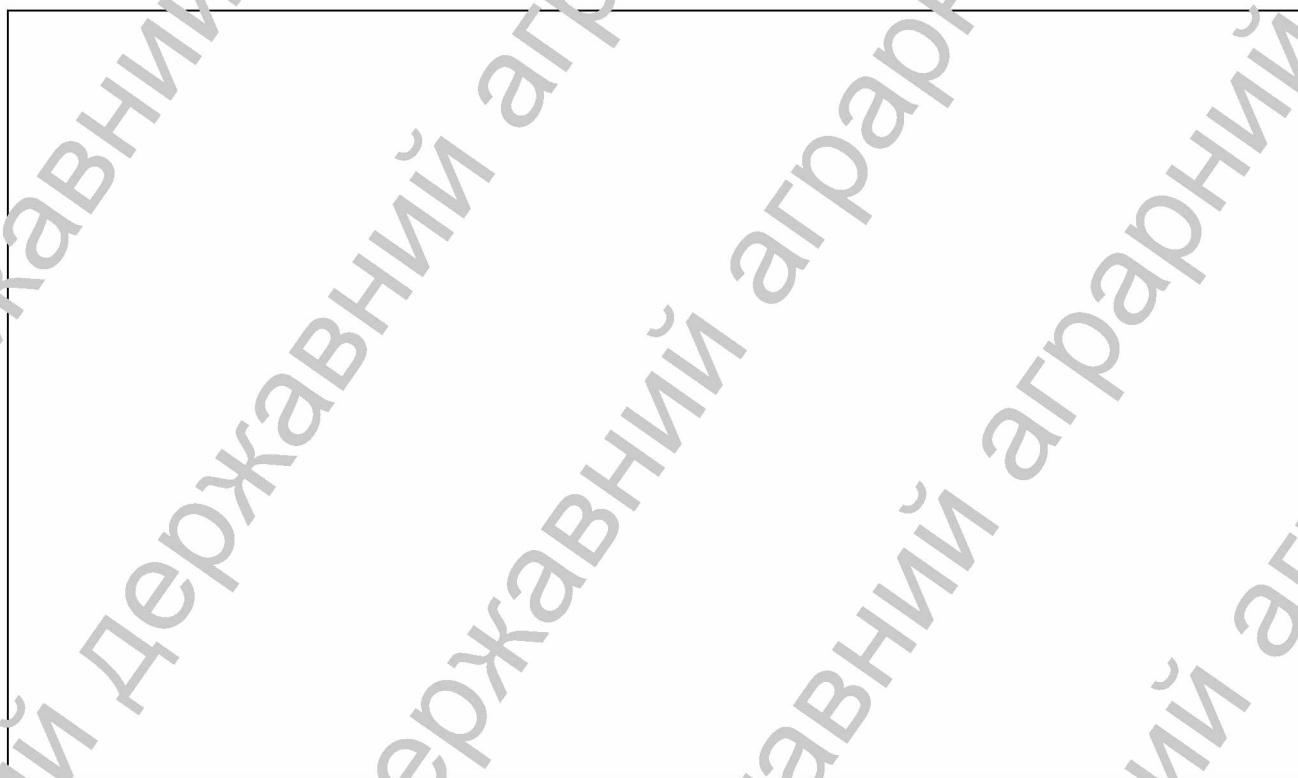


Рисунок 1 - Теплопровідність будівельних матеріалів

2 Легкість блок пінобетону марки D700 практично втричі легше керамзитобетону. Стандартний дрібний блок розміром $200 \times 188 \times 388$ має масу всього 11 кг, що дозволяє значно знизити транспортні та монтажні витрати, знизити трудомісткість робіт.

3 Міцність - При низькій об'ємній масі пінобетон має достатньо високу міцність на стиск (3,5-5,0 МПа). Максимальна поверховість будівлі з несучими стінами з пінобетону D900 - три поверхи. При застосуванні певних конструкторських рішень (в'язгуння залізобетонного або металевого несучого каркасу), можливе використання пінобетону у висотних будівлях без обмеження поверховості.

4 Морозостійкість. Висока морозостійкість F50-F100 пояснюється дрібнопористою структурою пінобетону, із закритим характером пор, що зменшує сорбційну вологість, забезпечує резервний об'єм для міграції води при її замерзанні.

5 Вогнестійкість - пінобетон відноситься до негорючих матеріалів, витримує односторонній вплив вогню протягом не менше 5-7 год.ч.

6 Біостійкість і екологічна безпека - пінобетон не схильний до гниття і старіння. Екологічна чистота вживаних сировинних матеріалів гарантує повну безпеку пінобетонних виробів для людини. Середня питома активність радіонуклідів складе 15,5 Бк /кг і не перевищує нормовану величину 370 Бк/кг [5].

7 Широкий діапазон одержуваних густин - залежно від призначення пінобетонних виробів і їх умов експлуатації можливо виготовлення пінобетону щільністю:

- від 200 до 600 кг /м³ для отримання теплоізоляційних виробів;
- від 600 до 1100 кг / м³ для отримання теплоізоляційно-конструкційних виробів (блоків, плит, переличок і ін);
- від 1100 до 1600 кг / м³ для отримання конструкційних виробів.

8 Простота обробки. Велике значення має така властивість пінобетону, як легка обробляемість найпростішими інструментами. Він легко пилиться, свердлиться, пререзується, а елементи обробки та декору можна кріпити до нього за допомогою звичайних цвяхів. Матеріал дійсно технологічний: бригада із двох робітників може впоратися із збіркою дому площею 36 м² усього за днів [6].

Серед недоліків пінобетону основними є: недостатня міцність теплоізоляційного неавтоклавної пінобетону, що ускладнює транспортування та монтаж виробів з нього; великі витрати цементу, що збільшуються із зменшенням щільності; коливання об'ємної маси та міцності внаслідок нестабільності пін та ін.

Щодо питання порівняння піно- та газобетону, слід відзначити, що єдиною перевагою газобетону є його міцність при одній щільності. Але пінобетон вигідно вирізняється по-перше низькою ціною. Собівартість пінобетону на 20-25% нижча [8], що пояснюється тим, що вартість піноутворювачів набагато нижча вартості газу виробачів. За теплопровідністю матеріали практично рівнозначні, а за водопропускністю газобетон поступається пінобетону. Собівартість обладнання практично однакова, тому початкові вложення в виробництво також суттєво не відрізняються.

По-друге, пінобетон є більш екологічним матеріалом. Для виготовлення газобетону використовується вапно, яке має прореагувати із алюмінієвою пудрою. Але на практиці повного гасіння не відбувається, отже газобетон є постійним джерелом вапна, яке відноситься до речовин II класу безпеки, що означає «речовини високо небезпечні». Компоненти пінобетону не виділяють небезпечних речовин. Будівлі, зведені із використанням цього матеріалу, насправді дуже комфортабельні. За даними зарубіжних та вітчизняних досліджень, вони поступаються (і то несуттєво) тільки дерев'яним, займаючи друге місце в рейтинзі найсприятливіших для життя [6].

Проте технологія газобетону простіша та дозволяє отримати матеріал зниженої об'ємної ваги із стабільними властивостями. Ціна ж не відрізняється стабільністю, що викликає коливання об'ємної маси та міцності матеріалу [7].

В таблиці 1 наведені нормовані показники фізико-технічних властивостей ніздрюватих бетонів за ДСТУ Б В.2.7-45:2010 [10].

Таблиця 1 Нормовані показники фізико-технічних властивостей ніздрюватого бетону

Галузі застосування пінобетону:

– виробництво будівельних блоків для класичного будівництва цоколів та перегородок (рисунок 3);

– монолітне будівництво;

– тепло- та звукоізоляція стін, підлог, перекриттів;

– заповнення будь-яких порожнин, об'ємів – пінобетон дуже

текучий матеріал, і їм можна заповнювати будь-які порожнини, навіть через невеликі отвори (подоконники, труби і т.і.);

– теплоізоляція кровель – пінобетон нізкої щільності надає ізоляції відмінні теплові властивості;

– заповнення траншейних порожнин – пінобетон не осідає, не вимагає віброущільнення та має чудові характеристики по розподілу навантаження, забезпечуючи заповнення високої якості;



Рисунок 3 - Двоповерхова будівля з пінобетонних блоків

– використання в тунелях – пінобетон використовується для заповнення порожнин, які виникають при прокладанні тунелів;

– теплоізоляція трубопроводів (як при виробництві труб, так і безпосередньо на об'єктах, у спеціальну опалубку) [3].

У таблиці 2 наведена порівняльна характеристика конструкцій із пінобетону та керамічної цегли за [3]

Таблиця 2 Порівняльна характеристика конструкцій стін із пінобетону та керамічної цегли

3			
3			
3			
3			
3			

1.4 Технологія виготовлення

Основа виробництва будь-яких ніздрюватих бетонів - це одержання ніздрюватої структури. Це після твердіння дає систему із твердим середовищем і газовою дисперсною фазою - твердої піни. До твердіння міцність і стійкість ніздрюватої структури визначається властивостями плівкового каркаса. Згодом, плівки між

пухирцями тоншають внаслідок стікання рідини і якщо не відсувається твердіння каркаса, пухирці лопаються, а ніздрювата структура руйнується. Стійкість ніздрюватої структури залежить від в'язкості й температури розчину, рН рідкої фази й присутності в ній електроліту, причому підвищення в'язкості розчину поліпшує стійкість ніздрюватої структури, а підвищення дисперсності пухирців газу поліпшує ніздрювату структуру [4]. Вимоги до матеріалів для ніздрюватих бетонів викладені у відповідних технічних вимогах та вказівках.

Для приготування пінобетону використовують наступні види в'язучих:

- портландцемент;
- вапно негашене кальцієве;
- цементно-вапнякове в'язуче на основі цементу або вапна;
- шлак доменний гранульований молотий змієсно із активізаторами твердіння або в складі змішаного в'язучого.

В якості кремнеземистого компоненту для пінобетону можуть бути використані:

- пісок кварцевий або польвошпательний;
- кремнеземисті вторинні продукти промисловості (зола-винос ТЕС, зола гідровидалення, вторинні продукти збагачення різних руд та інш.) [4].

Технологія приготування пінобетону в цілому достатньо проста. Існує декілька її варіацій, три з яких на сьогоднішній день отримали найбільше розповсюдження.

1 Класичний. За цим методом спочатку готують цементне тісто або цементно-пісчаний розчин, а потім в нього додають спеціально приготувану піну із піногенератора. Розчин в бетонозмішувачі змішується із піною та утримується пінобетонна суміш, яка при подальшому твердінні утворює пінобетон.

Для даного методу зазвичай використовуються органічні піноутворювачі, змішувачі із поєднаним змішуванням компонентів та спеціальні піногенератори.

Цей спосіб можна назвати найбільш відлагодженим та надійним, що відображено в його назві. Технологічна схема виробництва пінобетонних блоків із масивів наведена на рисунку 1.



и
і

Рисунок 4 – технологічна схема виробництва пінобетонних блоків

2. **Суша мінералізація.** За цим способом пінобетонна суміш отримується при суміщенні сухих компонентів із низьократною піною, що неперервно подається піногенератором. При цьому утворюється стійка пінобетонна суміш із малою кількістю вільної води. Висока насиченість ПАР поверхні розділу «повітряна пора – дисперсійна середа» визначає формування гладкої глянцевої поверхні стінок пор. Такий метод найчастіше використовується при безперервній технології виробництва пінобетону.

Для даного методу використовується піноутворювач СДО, піногенератори та спеціальні змішувачі.

3 Баротехнологія. За цим методом пінобетон отримується під надмірним тиском суміші усіх сировинних компонентів. У барозмішувач спочатку заливається вода із піноутворювачем, потім подаються усі компоненти. Після цього у барозмішувач компресором нагнітається повітря, створюючи тиск всередині. Пінобетонна суміш отримана в пінобетонозмішувачі, під тиском транспортується із змішувача до місця вкладання у форми або монолітну конструкцію.

Для цього методу застосовують синтетичні піноутворювачі та спеціальні бароустановки.

Інші способи приготування пінобетонних сумішей описані в літературі, не знайшли широкого практичного застосування, хоча закладені в них принципи мають перспективу.

Наступна стадія формування виробів із пінобетонних сумішей здійснюється із дотриманням основної вимоги – отримання поризованої маси із добре організованою пористістю. Якщо заливати пінобетон на будівництві в опалубку, то окрім установки що працює за однією із цих технологій, нічого не потрібно. Якщо виготовляти пінобетонні блоки, то в цьому випадку необхідно буде використовувати особливі технологічні прийоми та відповідну оснастку.

Існує три способи отримання блоків:

- заливання пінобетону в касетні металеві форми. Залитий пінобетон застигає протягом 10 годин, після чого форма розбирається та з неї дістають готові блоки. Одну форму можна використовувати 2 рази на добу. При об'ємах виробництва до 40 м³ блоків на добу технологія розливання по формах економічно найдоцільніша. Плюси: порівняно невеликі вкладення та простота виробництва. Мінуси: складно виготовляти великі об'єми; прив'язаність до типорозмірів.

- різка пінобетонних масивів на різальних установках. Спочатку пінобетон заливається в форми без перегородок, де отримується великий масив об'ємом 2-3

м³. Приблизно через 14 годин пінобетон подається на різку, де із нього випилюються блоки потрібного розміру (цей процес автоматизований). Даний метод відрізняється високою виробничою продуктивністю та технологічністю. Причому при нарізанні пінобетону можна отримувати блоки будь-яких типорозмірів. Мінуси: велика вартість та відходи 0,5% у вигляді кришок від пилення.

– розливка пінобетону у спеціальні форми та наступне їх автоматичне розпалублення. Спочатку пінобетон заливається у спеціальні форми із перегородками, де при застиганні отримуються готові блоки. Приблизно через 14 годин форми подаються в установку автоматичного розпалублення, де блоки видавлюються на європіддон, а форми при цьому замацуються. Даний метод простий та продуктивний. Основний недолік – прив'язаність до одного типорозміру випущених блоків. Установку автоматичного розпалублення неможливо перенастроювати на виробництво блоків інших типорозмірів.

За сучасними уявленнями ніздрюваті бетони поділяють на два класи: повітряного та автоклавного твердіння. Виробництво виробів із автоклавних ніздрюватих бетонів уже давно і широко розвивається. Для автоклавного ніздрюватого бетону найбільш доцільно використовувати портландцемент разом із вапном-кишляком (змішана в'язуча речовина) у відношенні 1:1 за масою [21]. В автоклаві при температурі 175...190 °С та тиску пари 0,8...1,2 МПа гідроксид кальцію інтенсивно взаємодіє із кремнеземистим компонентом. При цьому утворюється гідросилікат кальцію, що володіє достатньо високою міцністю та довговічністю [20]. Для ніздрюватих бетонів неавтоклавного твердіння застосовують цемент марки не менше М400. При цих умовах досягається в короткий строк необхідна стійкість пористої маси до її тепло-вологісної обробки. Застосовувати пуццолановий портландцемент і шлакопортландцемент, що відрізняються уповільненими строкami схоплювання, без дослідженої перевірки не рекомендується. Вони можуть стати також причиною підвищеної усадки пінобетонної маси після заповнення форми.

1.5 Фізичні основи теплоізоляційних властивостей пінобетону

Теплопровідність – найважливіша теплофізична характеристика теплоізоляційних та теплоізоляційно-конструкційних матеріалів. Вона залежить від наступних факторів:

1. фізичного стану та будови, які визначаються фазовим станом речовини; ступінню кристалізації та розмірами кристалів; анізотропією теплопровідності кристалів та напрямком теплового потоку, об'ємом пористості матеріалу та характеристиками пористої структури;
2. хімічного складу та наявності домішок;
3. умов експлуатації, що залежать від температури, тиску, вологості матеріалу.

Розглянемо фактори, що є вирішальними для набуття пінобетоном високих теплоізолюючих властивостей.

Пористість. Теплопровідність, як і будівельно-експлуатаційні властивості пінобетону у вирішальній мірі залежать від об'єму пористості, виду пористої структури, характерних пор та твердої фази. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу складається з коефіцієнтів теплопровідності основи матеріалу і повітря, що утримується в порах, пропорційно об'ємним концентраціям цих компонентів.

Поризація матеріалів значно знижує теплопровідність. Відомо, що найменшою теплопровідністю володіють гази у спокійному, тобто червоному, стані. Повітря, що знаходиться у порах теплоізолюючого матеріалу, може вважатися спокійним, і має дуже незначну у порівнянні із основною речовиною матеріалу величину, що залежить головним чином від розмірів та форми пор, наприклад від $\lambda=0,021$ при розмірі пор біля 0,1 мм до $\lambda=0,027$ при розмірі пор біля 2 мм. Тепло в основі матеріалу передається тільки теплопровідністю. Тепло через повітряний шар передається теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням. Передача тепла в замкнених повітряних прошарках кращим чином, аніж в твердих тілах. Термічний опір прямо пропорціональний його товщині, δ , отже, кількість тепла, що проходить крізь нього, при постійній різниці температур на поверхнях пропорційно його товщині. У повітряному прошарку такої залежності немає. Теплопередача в ній

здійснюється не тільки теплопровідністю, і відповідно, тепловий потік визначається як

$$q_{ст} = q_T + q_K + q_L,$$

где q_T – потік тепла за рахунок теплопровідності,

q_K и q_L – потоки за рахунок конвекції повітря і випромінювання поверхніми прошарку.

Пористість матеріалів із ніздрюватою структурою утворюється ніздрюватою пористістю (макропористістю) і пористістю міжпорочих перегородок (мікропористістю). Із загального об'єму пористості на долю ніздрюватої припадає біля 90 % [17]. Об'єм ніздрюватої пористості визначається нерівномірним розподілом пор (упакуванням), розподілом пор по розмірах (суміщенням пор різних розмірів), максимальним та середнім розміром пор, їх формою, товщиною міжпорочих перегородок. Найбільші значення пористості досягаються в умовах гесметрично правильної щільної укладки (упаковки) форм, до яких відносяться кубічна та гексагональна.

В перегородках пінобетону формується розвинута мережа мікропористої структури, що включає капілярну та гелеву пористість. В теплоізоляційних пінобетонах об'єм капілярної пористості складає 5-12%, гелевої – 1,5-2,5% [14]. Із підвищенням об'ємної ваги пінобетону збільшуються і значення капілярної та гелевої пористостей, так як збільшується вміст цементу в матеріалі. Об'єми капілярної та гелевої пористості враховують при розрахунку необхідних значень ніздрюватої пористості.

Морозостійкість та водотримання залежать від величини і характеру пористості ніздрюватою бетону та щільності стінок пор. Найкращі показники у ніздрюватою бетону вібраційного формування, так як виробобка руйнує крупні пори та ущільнює стінки пор, що залишаються [17].

При такому способі поризації будівельних матеріалів формування ніздрюватої структури відбувається в умовах зниженого поверхневого натягу розчинів, обумовлених наявністю в сумішах ПАР. Знижений поверхневий натяг,

підвищена в'язкість і механічна міцність цього шару, відсутність помітної різниці тиску в порах, динамічні впливи в процесі поризації суміші (перемішування) забезпечують виконання одного з головних принципів термодинамічної стійкості системи - створення найменших поверхонь на границі роздязнула: газ - дисперсійне середовище. Тому в матеріалах, отриманих способом піноутворювання, пориста структура краще, ніж у матеріалах, отриманих газовим спучуванням: пори мають менший розмір і однорідно розподілені в об'ємі виробу, відсутні контактні дірки й тріщини на міжпорових перегородках, а внутрішня поверхня пор гладка й щільна. Остання обставина істотно знижує концентрацію напруг у матеріалі при його навантаженні, що забезпечує одержання виробів з підвищеною міцністю. Пінний спосіб поризації має можливість спрямованого регулювання об'єму пористості й характеристик пористої структури матеріалу, зокрема створення поліфракційних пор [4].

Принципово необхідно прагнути до максимально можливого зниження капілярної пористості. Це положення приймає особливу важливість із зменшенням густини пінобетону, коли об'єм твердої фази виробів малий і невелика зміна її фізико-технічних властивостей чинить вирішальний вплив на кінцеві властивості матеріалу. Збільшення об'єму капілярної пористості при постійному значенні загальної пористості не викликає суттєвої зміни теплопровідності матеріалів в сухому стані, однак значно знижує міцність та довговічність виробів. Крім того, пропорційно зростанню капілярної пористості зростає і водопоглинання виробів, що підвищує теплопровідність нідруюватих матеріалів [17].

Крім пористості на величину коефіцієнта теплопровідності впливають також розмір пор та структура матеріалу. При однаковій пористості величина λ буде тим більше, чим крупіші пори матеріалу, так як із збільшенням розміру пор підвищується коефіцієнт теплопровідності повітря в порах. Наприклад, пінобетон із об'ємною вагою 350 кг/м^3 в залежності від розміру пор має наступні величини λ : при 45 колірахах на 1 см^2 - $\lambda=0,13 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$; при 125 - $\lambda=0,1 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ [16].

Оптимальною нідруюватою структурою слід вважати рівномірно розподілену в об'ємі матеріалу пористість у вигляді полідисперсних за розміром, замкнутих,

деформованих у правильні багатогранні ки пор, розподілених товстими та щільними, однаковими у зрізі міжпоровими перегородками із гладкою поверхнею пор. Форма пор має наближатися до правильного додекаедру (дванадцятигранник). Максимально досяжні у виробничих умовах значення ніздрюватої пористості і мінімальні показники об'ємної ваги – 86-89% і 140-170 кг/м³ відповідно.

Для досягнення високх значень пористості та раціональної її будови, що забезпечить підвищені будівельно-експлуатаційні властивості теплоізоляції, необхідно оптимізувати однорідність розподілу пор в об'ємі матеріалу, товщину і щільність міжпорових перегородок, форму і характер внутрішньої поверхні пор, замкнутість ніздрюватої структури. Бадача отримання пористої структури, близької до «ідеальної» - технологічно виконувана. Для цього необхідно реалізувати в промислових умовах наступний комплекс технологічних заходів:

- підвищити однорідність багатоконпонентних сумішей;
- знизити водотверде відношення до значення, близького до необхідного для гидратції в'язучої речовини;
- оптимізувати гранулометричний склад суміші із урахуванням не тільки реакційної поверхні складових, а й щільного упакування композиції в сухому та вологому стані,
- створити умови для інтенсивного ущільнення та злиснення твердої фази матеріалу.
- підвищити однорідність розподілу піноутворювача в масі та оптимізувати його концентрацію в матеріалі [17].

Вологість. Будівельні матеріали в експлуатаційних умовах мають певну вологість. Волога, що потрапила в матеріал, утримується в порах. З підвищенням вологості теплопровідність теплоізоляційних матеріалів підвищуються залежно від характеру локалізації в них вологи. Оскільки роль газів, укладених у порах, велика, то у випадку зміщення їх водою, коефіцієнт теплопровідності пінобетону значно підвищується. Теплопровідність води складає 0,58 Вт/(м·°С), що у 20 разів більше за коефіцієнт теплопровідності повітря в порах середнього розміру [16]. Крім того, вода в порах збільшує розміри контактних площадок, що збільшує ефективний

коефіцієнт теплопровідності. Тому тепловтрати через зрештою огороджуючі конструкції зростають, а у зимовий період можливе їхнє промерзання. При температурі нижче температури початку замерзання рідини в порах матеріалу утворюється кріофаза (іній, лід), що призводить до збільшення теплопровідності системи основа – рідина–кріофаза. Теплопровідність льда біля $2,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, що в десятки разів більше за повітря. При утворенні в порах матеріалу інею величина коефіцієнта теплопровідності системи може знижуватися, оскільки теплопровідність сухого інею менша теплопровідності води і льоду і становить $0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. [23].

В результаті деструктивного впливу льоду зростає і кількість дефектів матеріалу, що також призводить до підвищення водопоглиблення і теплопровідності матеріалу.

Температура фазового переходу вода – лід у порах матеріалу залежить від енергії зв'язку вологи з основою матеріалу, а отже і від його вологості. Причому чим більше енергія зв'язку, тим нижче температура замерзання рідини. Або тим сильніше зволожений матеріал, тим більше рідини перетвориться в лід за інших рівних умов. При малій вологості матеріалу волога в порах може не замерзати і при $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ [23].

Механізм заповнення матеріалу вологою такий, що більш інтенсивно заповнюються дрібні капіляри. Чим дрібніші капіляри, тим інтенсивніше відбувається капілярне всмоктування рідини. Тому якщо розглядати залежність теплопровідності від вологості, то найбільш інтенсивне збільшення коефіцієнта теплопровідності відбувається на початковій стадії зволоження, коли заповнюються найдрібніші капіляри, які є найбільш ефективними теплоізоляторами матеріалу в сухому стані.

Наявність залежності коефіцієнта теплопровідності від вологості вимагає нормування коефіцієнта теплопровідності для різних умов. В таблиці наведені значення коефіцієнтів теплопровідності для різних марок залежно від вологості [18].

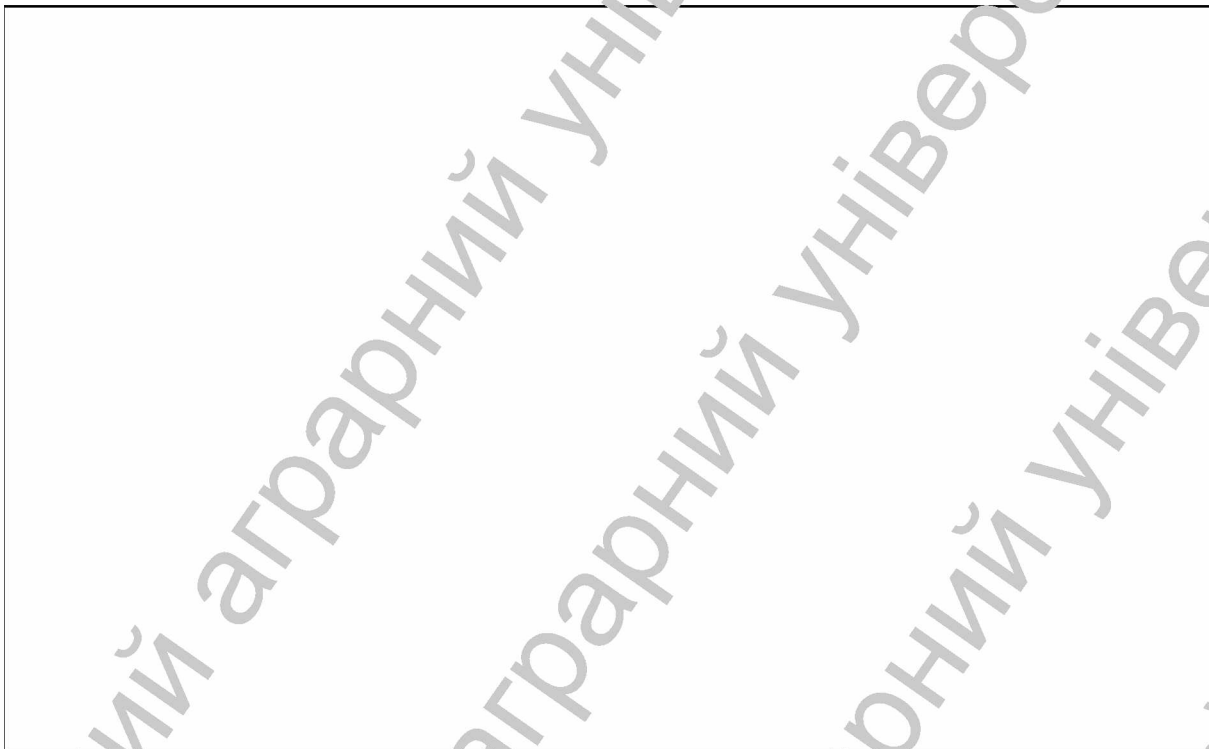


Рисунок 5 – Криві сорбції різних матеріалів

Для зменшення всотування вологи із повітря зовнішні поверхні виробів із ніздрюватих бетонів захищають фактурним шаром щільного тинькувального розчину, покривають перхлорвініловими, акриловими або цементними фарбами або просочують гідрофобізуючими сумішами. Для стін підвалів, цоколів та інших частин будівель, де можливе сильне зволоження бетону, застосування пінобетону, як і інших видів ніздрюватих бетонів, забороняється [20].

Для руху повітря пори пінобетону замкнуті, а для проникнення води — відкриті. Тому водопоглинання ніздрюватого бетону досить високе і морозостійкість відповідно знижена в порівнянні з бетонами щільної структури [19].

Дані про величину коефіцієнта теплопровідності матеріалів у сухому стані, тобто величину коефіцієнта теплопровідності системи: основу матеріалу – повітря, наведені в [1,6]. Для оцінки впливу величини вологості в криофазі на теплопровідність матеріалу необхідно використовувати методику, наведені в підручнику [5].

Температура. Теплопровідність будівельних матеріалів зростає при підвищенні температури, що пов'язано зі збільшенням кінетичної енергії молекул основи матеріалу. Крім цього при збільшенні температури також зростає

теплопровідність повітря, що знаходиться в порах будівельних матеріалів, а також інтенсивність передачі тепла в порах матеріалу випромінюванням.

Зміна теплопровідності внаслідок коливань температури має невелике значення в будівельній практиці, тому що перепади температур при експлуатації конструкцій не перевищують 100 °С. При застосуванні будівельних матеріалів для теплоізоляції поверхонь, що мають високу температуру, вплив температури на коефіцієнт теплопровідності доводиться враховувати. Вплив на теплопровідність вологого пінобетону в різних температурах було розглянуто вище.

РОЗДІЛ 2

МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета роботи - розробка комплексного підходу до оцінки теплотехнічних параметрів пінобетону з урахуванням його поведінки в умовах реальної експлуатації. Запровадження рекомендацій щодо оптимізації складу пінобетону для різних кліматичних умов з метою зменшення енергоспоживання та підвищення комфортності будівель

Задачі досліджень:

- розрахунок тепловологісного стану конструкції із застосуванням пінобетону;
- виробування матеріалів для виготовлення зразків згідно діючих державних стандартів,
- підбір складу пінобетону марок за середньою густиною 350, 600, 900;
- дослідження впливу вологості на теплопровідність пінобетону при позитивних температурах і вологості до 12% .
- дослідження теплотехнічних характеристик пінобетону при вологості до 25%.

Предмет дослідження-міцність, вологість, пористість і глибина карбонізації, теплопровідність пінобетону.

Об'єкт дослідження - фрагмент огорожуючої конструкції з пінобетону в умовах експлуатації, пінобетонні зразки

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методика підбору складу пінобетону

Завданням підбору складу пінобетону є визначення такого співвідношення між окремими компонентами, яке б забезпечувало отримання бетону заданої об'ємної ваги із найбільшою міцністю при найбільшому коефіцієнті використання піноутворювача.

Оптимальне значення співвідношень між кремнеземистим компонентом та в'язучою речовиною (С) залежить від виду добавки, в'язучої речовини, умов твердження бетону та підбирається дослідним шляхом.

Зазвичай підбір ніздрюватих бетонів проводиться за розрахунково-експериментальним методом, одним для газо- та пінобетонів, запропонованим А. Т. Барановим, К. І. Бахтіяровим та Л. М. Розенфельдом.

Підбір проводять з три етапи.

Перший етап – експериментальний (на цементно-кремнеземистих розчинах). Визначають оптимальне значення відношення кремнеземистого компонента до в'язучої речовини (С) – водотверде відношення (В/Т). Для цього випробовують міцність розчинових зразків, для яких згідні співвідношення С приймаються рівними для цементної в'язучої речовини 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75.

При виготовленні зразків вода береться у кількості, 3.1 текучість розчину, необхідну для отримання об'ємної ваги бетону, дослідним шляхом підбирають згідне водотверде відношення на розчині із знайденим оптимальним значенням С при температурі не менше 20 °С. Водночас визначають об'ємну вагу цієї розчинової суміші.

K_c - коефіцієнт, що враховує кількість хімічно зв'язаної води по відношенню до ваги сухих компонентів; для розрахунку K_c приймається рівним 1,1.

Витрата піноутворювача визначається за формулою:

$$P_{пор} = \frac{V_{пор}}{K \cdot \alpha},$$

де $V_{пор}$ - необхідний об'єм пор в ніздрюватобетонній суміші:

$$V_{пор} = 1000 \cdot \frac{P_{вяж}}{T_{вяж}} - \frac{P_{кр}}{T_{кр}} - B.$$

P - питома пороутворююча здатність 1 кг пороутворювача в л;

α - коефіцієнт використання пороутворювача; для розрахунку береться значення α рівне 0,85.

Вказані розрахунки витрати матеріалів та пороутворювача виконують для прийнятого значення В/Ц та В/Т, що відрізняються від нього на $\pm 0,02$ і $\pm 0,03$.

Потім готують дослідні заміси ніздрюватої суміші, по яких визначають фактичні значення об'ємної ваги розчину (γ_p) та ніздрюватої суміші ($\gamma_{ояс}$) для всіх В/Т.

Для кожного замісу підраховують фактичну пористість

$$V_{пор}^{факт} = 1 - \frac{\gamma_{ояс}}{\gamma_p}$$

$$\alpha = \frac{V_{пор}^{факт}}{K \cdot P}$$

За результатами розрахунків значень α вибирають оптимальне водотверде відношення (при максимальному α) та встановлюють оптимальний склад ніздрюватої бетону.

Третій етап проводиться для уточнення складу бетону. Виготовляють зразки оптимального складу ніздрюватої бетону, після твердіння яких визначають міцність, середню пористість та розраховують коефіцієнт кількості хімічно зв'язаної води [17].

3.2 Технологія виготовлення зразків

Пінобетонні зразки виготовляються після теоретичного розрахунку складу та експериментальних уточнень. Виготовляються зразки середньої густини 350, 550, 850 кг/м³. Зразки середньої густиною 550 і 850 кг/м³ готуються на суміші цементу і піску, середньої густини 350 кг/м³ – на цементі. Дотримується наступна послідовність приготування зразків:

1. Підготовка матеріалів та оснащення. Пісок просіюється крізь сито із розміром отворів 0,315 мм. Збирають та змащують форми.
2. Дозування матеріалів. Цемент та пісок дозуються за масою, вода та піноутворювач – за об'ємом. Відміряну воду підігрівують до температури близько 40 °С.
3. Приготування цементно-пісочної та пінової сумішей. Перемішування відбувається в різних ємностях протягом 5 хв.
4. Приготування пінобетонної суміші. Піноча суміш заливається в ємність із розчиною сумішшю, і вони змішуються 2 хв.
5. Заповнення форм виконується в 1-2 прийоми. Температура розчинової суміші в момент вивантажування з форми складає близько 25°С.
6. Твердження. Зразки бетону тверднуть в формах дві доби, при цьому поверхню виробів захищають від інтенсивного висихання. За дві доби вироби розпалублюють [32].

Для визначення теплопровідності зразки мають бути рівнотовщинними, для чого вони шліфуються до досягнення рівної поверхні із відхиленнями товщини не більше 1 мм.

3.3 Розподіл вологості та температур в пінобетонній стіні

Дослідження проводиться на фрагменті огорожувачої конструкції із пінобетонних блоків, в умовах, близьких до експлуатації огорожувачих конструкцій. Моніторинг змін температур та вологості в стінці проводять періодично, для вологості – кожен місяць, для температури – 3 рази на тиждень.

Значення температур в стіні вимірюються за допомогою термопар, вбудованих при монтажі конструкції послідовно через декілька проміжків по одному з поперечних перерізів. ТермоЕРС, що виникає між термопарою та нульовим проводом, фіксується за допомогою потенціометру / мілівольтметра, та за допомогою таблиць термоЕРС для даного виду термопар, у редакторі формул Microsoft Excel переводиться у температури.

Для дослідження вологості необхідно періодично здійснювати відбір проб по всій товщі конструкції, з фіксуванням координати кожної проби, яких має бути не менше восьми. Кожну пробу зважують, висушують до постійної маси і знову зважують. Вологість проби за масою W_v %, визначають за формулою:

$$W_v = \frac{m_{\text{вол}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100\%,$$

де $m_{\text{вол}}$ і $m_{\text{с}}$ - маса проби в стані експлуатації та абсолютно сухому стані відповідно.

У редакторі формул Microsoft Excel підраховується відносна вологість кожної проби, усереднена вологість шару конструкції та всієї конструкції та інші показники; будуються графіки розподілу вологості. Підчас відбору проб за допомогою психрометра визначається відносна вологість повітря всередині та назовні приміщення.

3.4 Дослідження теплопровідності пінобетону в установці ИТС-1

Пінобетонні зразки із середньою густиною 350, 550 і 850 кг/м³ випробовуються на коефіцієнт теплопровідності. Кожен з трьох зразків однієї середньої густини досліджується по чотири рази: у стані середньої вагової вологості 11 – 12%, у двох станах проміжної вологості та в абсолютно сухому стані.

Дослідження проводяться на приладі ИТС-1, відповідно до вимог [34].

3.5 Дослідження теплотехнічних характеристик пінобетону в кліматичній камері

Випробування проводяться у кліматичній камері відповідно до ДБН В.2.6-31:2016 [18]. Кліматична камера має дозволяти задавати температуру повітря

у діапазоні від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Схема кліматичної камери із розташуванням зразків та термопар наведена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 Схема кліматичної камери

На теплопровідність у кліматичній камері випробовуються три пінобетонні зразки середньої густини 850 кг/м^3 . Кожен зразок досліджується три рази: у стані середньої вільної вологості 25%, 15%, 5%. Зазначена вологість досягається висушуванням зразків, насичених водою протягом двох діб.

Масу зразка, до якої його необхідно зволожити, щоб одержати значення, що відповідає w_p визначають за формулою

$$m_{w_p} = m_0 (1 + 0,01 w_p).$$

Дослідження проводяться із урахуванням вимог [34], із перепадами температури повітря 10;20;30 °С; при температурі ззовні камери 20 °С.

Під час теплових випробувань у лабораторних умовах задані значення температури і відносної вологості повітря у відсіках кліматичної камери підтримують за допомогою програмно-технічних засобів автоматизації та контролюють з похибкою ± 1 К та ± 5 % відповідно.

Після настання усталеного або близького до нього режиму, формування якого визначають за контрольними графіками поверхневої температури, вимірюють значення поверхневої густини теплового потоку крізь ОК, температури зовнішньої та внутрішньої поверхонь ОК та повітря межових шарів по обидва боки ОК. Кількість вимірів на стадії усталеного режиму повинна бути не менше десяти.

За результатами вимірювання поверхневої густини теплового потоку з застосуванням первинних перетворювачів теплового потоку і вторинного вимірювального прилада визначають густину теплового потоку $q_{\text{вим}}$ як добуток показань вторинного вимірювального приладу $E_{\text{ПТП}}$ (мВ) на градуовальний коефіцієнт (коефіцієнт перетворення) ПТП $K_{\text{ПТП}}$ (у Вт/(м²·мВ)):

$$q_{\text{вим}} = K_{\text{ПТП}} \cdot E_{\text{ПТП}}.$$

Кодивання результатів вимірювань кожного параметра в умовах усталеного теплового потоку не повинні перевищувати границь допустимих основних похибок ПТП.

За результатами визначення коефіцієнта теплопровідності та термічного опору зразків будуються графіки залежностей теплопровідності від вологості пінобетону, від температури повітря в холодному відсіку камери, від середньої товщини зразка.

3.6 Глибина карбонізації пінобетону

Глибина карбонізації оцінюється для блоків фрагменту пінобетонної огорожуючої конструкції із середньою густиною 850 кг/м^3 і для зразків-кубиків пінобетону із середньою густиною 1200 , 850 і 350 кг/м^3 .

Для оцінки глибини карбонізації в блоках із фрагмента стіни підготовлюються два з'явіх зрізу матеріалу, в напрямку, перпендикулярному до поверхонь блоків, що складали внутрішню та зовнішню поверхню стіни. Зразки-кубики виготовляються по дві штуки кожної середньої густини. Глибину карбонізації співставляють із часом, тобто має бути отримана величина швидкості карбонізації незахищених від впливу атмосферного повітря зразків. Дослідження проводяться на свіжих зрізах, перпендикулярних до поверхні зразків, що була верхньою при їх виготовленні.

Визначення глибини карбонізації бетону проводять по зміні величини в'язного показника R_f .

У випадку якщо бетон сухий, змочують поверхню відколу чистою водою, якої повинно бути стільки, щоб на поверхні бетону не утворилася видима плівка води. Надлишок води видаляють чистим фільтрувальним папером. Вологий і повітряно-сухий бетон зволоження не вимагає.

На відкол бетону за допомогою крапельниці або піпетки наносять $0,1\%$ -ий розчин фенолфталеїну в етиловому спирті. При зміні R_f від $8,3$ до 14 фарбування індикатора змінюється від безбарвної до яскраво-малинової. Свіжий зліг зразка бетону в карбонізованій зоні після нанесення на нього розчину фенолфталеїну має сірий колір, а в некарбонізованій зоні здобуває яскраво-малинове забарвлення.

Приблизно через хвилину після нанесення індикатора вимірюють лінійкою з точністю до $0,5 \text{ мм}$ відстань від поверхні зразка до границі яскраво пофарбованої зони в напрямку, нормальному до поверхні. Виміряна величина і є глибина карбонізації бетону. У бетонах із рівномірною структурою пор границя яскраво пофарбованої зони розташована звичайно паралельно зовнішньої поверхні. У бетонах з нерівномірною структурою пор границя карбонізації може бути

звивистої. У цьому випадку необхідно виміряти максимальну і середню глибину карбонізації бетону [35].

3.7 Методика дослідження ступеня і характеристик пористості

Для визначення пористості пінобетонних зразків, отриманих в ході виконання магістерської роботи, аналізуються 8 зображень поверхонь зрізів зразків, отриманих за допомогою сканера. Для цього зразки розрізаються на 4 частини, як наведено на рисунку.



Рисунок – Схема розрізання зразків для визначення пористості пінобетону

Отримані зображення оброблюються за допомогою програми Microsoft Office Picture Manager та аналізуються у програмі Adobe Photoshop із використанням функції («Photoshop Extended»). Області пор відокремлюються для підрахунку кількості та площі за кольоровим діапазоном як «тіні». Із оброблених зображень обирають зображення поверхонь кращої якості для визначення пористості.

Photoshop проведе підрахунок по виділеним областям та зробить запис в стовбці «Лічильник» журналу замірів. Журнал замірів можна експортувати до текстового файлу, а звіти – перенести у табличний редактор MS Excel, де визначається ступінь пористості, найменший і середній діаметр пор, кількість пор на 1 см^2 . Величину середньої пористості порівнюють із наведеною в розділі 2 довідковою величиною, і робиться висновок стосовно точності даного методу.

Результати визначення пористості пов'язуються із теплопровідністю зразків, визначених на зразках різної густини в абсолютно сухому стані; будується діаграма залежності коефіцієнта теплопровідності від пористості матеріалу.

3.8 Зміна міцності пінобетонних блоків із фрагмента огорожуючої конструкції в умовах експлуатації

Дослідження зміни міцності пінобетону по шарах конструкції проводиться на основі даних по міцності пінобетону, встановлених для блоків однієї партії під час монтажу фрагмента огорожуючої конструкції. Блок розрізається за тією ж схемою, із випилюванням зразків-кубиків розмірами $7 \times 7 \times 7$ см із середини та біля зовнішньої і внутрішньої поверхонь блоку.

Будуються графіки зміни міцності для окремих зразків та для усереднених результатів, визначається середня зміна міцності по шарах конструкції.

РОЗДІЛ 4

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Портландцемент

В даній роботі для приготування зразків застосовується портландцемент. Для виготовлення ніздрюватих бетонів портландцемент має бути марки не нижче М400 із вмістом трьохкальцієвого силікату не менше 50% і трьохкальцієвого алюмінату не більше 6%. Початок тужавіння має наступати не пізніше 2 годич, а кінець – не пізніше 4 годич після затворення. Питома поверхність цементу має бути 2500—3000 см²/г для конструктивно-теплоізоляційного і 3000—4000 см²/г для теплоізоляційного ніздрюватого бетону [32]. За іншими властивостями цемент має задовольняти вимогам ДСТУ Б В.2.7-46 [33].

Цемент випробовуємо на такі показники:

- нормальна густина (згідно ДСТУ Б В.2.7-185: 2009 [26]);
- строки тужавлення (ДСТУ Б В.2.7-185: 2009 [26]);
- нормальна консистенція (ДСТУ Б В.2.7-46 [33]);
- міцність на згин та стиск (ДСТУ Б В.2.7-187: 2009 [27]);
- питома поверхня (ДСТУ Б В.2.7-188: 2009 [28], інструкція до приладу ПСХ 4).

Визначення питомої поверхні методом повітропроникності

Цемент випробовують методом повітропроникності для визначення питомої поверхні згідно з інструкцією до приладу ПСХ. Тонкість помелу цементу визначають шляхом вимірювання часу, за який проходить певна кількість повітря крізь ущільнений шар цементу заданих розмірів та пористості.

Пробу цементу висушують у сушильній шафі за температурою від 105°C до 110°C протягом 2 год та охолоджують в эксикаторі. При визначенні питомої поверхні для розрахунку маси наважки цементу застосовують величину його густини, визначену за допомогою приладу ЛС-Шательє.

Масу наважки цементу розраховують із виразу:

$$m = 3.33 \rho_m,$$

де ρ_m - густина цементу.

В кювету приладу ПСХ-4 помістити кружок фільтрувального паперу, вирізаного по внутрішньому діаметру кювети, і засипати на нього наважку. Порошок розрівняти та покрити другим кружком із фільтрувального паперу та ущільнити плунжером сильним натисненням руки впродовж 2-х хвилин.

При закритому крані в порожнині манометру створюється за допомоги гумової груші розрідження. Далі кран закривається та відкривається кран, що поєднує кювету із манометром. Повітря починає просочуватися через шар порошку та рівень рідини в манометрі понижується. Час проходження рідини між двома рисками манометра замірюється за допомоги секундоміра. Виконують два паралельних визначення питомої поверхні з однієї наважки цементу.

Питому поверхню обчислюють з точністю до $10 \text{ см}^2/\text{г}$ як середнє арифметичне значення двох визначень, розбіжність між якими не повинна бути більше ніж 1% середньоарифметичного значення.

Результати випробовування порцелядцементу

- Нормальна густина цементного тіста, %.

$\text{НГТ} = (115/400) * 100 = 28,75\%$.

- ступінь тужавіння:

Початок тужавлення – 2 год 20 хв.

Кінець тужавлення – 4 год 20 хв.

- міцність на стиск – 50 МПа;

- питома поверхня. Результати випробовувань питомої поверхні наведені в таблиці 3.1

Таблиця 4.1 Результати вимірювання питомої поверхні цементу

		τ

Зведені результати випробовувань портландцементу наведені в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 Характеристика портландцементу

4.2 Кварцовий пісок

В цій роботі для приготування пінобетону використовуємо кварцовий пісок за ДСТУ Б В.2.7-32-95 [28]. Пісок для ніздрюваних бетонів має задовольняти наступним специфічним вимогам:

- питома поверхня, $\text{cm}^2/\text{г}$, м'якого піску має бути 2300-2700 – для теплоізоляційних, 2000-2300 – для конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів;
- наявність зерен розміром від 5,0 мм до 10,0 мм не повинна перевищувати 5%;
- вміст зерен більшого 10 мм допускається до 0,5% за масою;
- максимальне допустимий вміст пиловидних і глинистих часток розміром менше 0,05 мм у відсотках за масою - 5, у тому числі глини у грудках - 0,5. При позитивних результатах напівпромислових виробувань допустимий вміст пиловидних і глинистих часток - 7% за масою;
- вміст вільного кварцу - не менше 70% за масою;
- вміст лугів в перерахунку на NaO_2 (вміст K_2O за калієвим польовим шпатом перераховується на вміст Na_2O за натрієвим польовим шпатом множенням на коефіцієнт 0,65) не повинен перевищувати у відсотках за масою 2,7.

Для піску для виробництва ніздрюватих бетонів вміст зерен, що проходять крізь сито N 016 зерновий склад не формується;

Отже, пісок випробовуємо на такі показники (за ДСТУ 53 2.7-232: 2010 [30]):

- насипна густина та порожнистість;
- істинна густина;
- питома поверхня;
- вміст пиловидних та глинистих часток;
- наявність органічних домішок.

Зерновий склад. Результати вимірювання зернового складу піску наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Результат визначення зернового складу піску

$$M_k = \frac{1,6 + 4,7 + 7,4 + 17,4 + 93,5}{100} = \frac{124,6}{100} = 1,246.$$

Отже, застосований пісок відноситься до категорії дуже дрібних пісків з модулем крупності 1,0-1,5. Крива просіювання піску наведена на рисунку 4.1



Рисунок 4.1 – Крива просіювання піску

Таблиця 4.4 Результати вимірювання питомої поверхні піску

		τ

Вміст пиловидних та глинистих часток:

$$P_{відм} = \frac{(1000 - 935)}{1000} \cdot 100 = 6,5.$$

Наявність органічних домішок. Колір рідини над піском виявився набагато темнішим за колір еталонного розчину, що наведено на рисунку .

Піщяна густина

$$\rho_n = \frac{8,05 - 0,25}{0,01} = 1600 \text{ кг / м}^3.$$

4.3 Випробування піноутворювача

Для виготовлення зразків пінобетону в даній роботі застосовується піноутворювач ПБ-2000, який являє собою водний розчин алкільсульфатів первинних жирних спиртів із стабілізуючими добавками.

За фізико-хімічними показниками піноутворювач ПБ-2000 має відповідати нормам та вимогам, вказаним в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Вимоги до піноутворювача ПБ-2000

Піноутворювач для виготовлення пінобетону повинен відноситися до 3 або 4-го класу речовин малонебезпечних. Він не повинен бути вибухонебезпечним або токсичним, а також має відповідати радіаційно-гігієнічним і санітарним вимогам.

Піноутворювач ПБ-2000 - невибухонебезпечна речовина. За ступенем впливу на організм людини за ДСТУ 12.1.001 відноситься до IV класу небезпеки - речовини малонебезпечні. Ступінь біорозкладання ПБ2000 перевищує 90%. Це набагато вище прийнятої норми біорозкладання (не менше 80%), що характеризує екологічну безпеку продуктів. Показником безпечності піноутворювача ПБ-2000 є водний показник.

Визначення кратності піни робочого розчину

Перед проведенням випробувань піноутворювач розігрівають до температури 20-30 °С та ретельно перемішують. 4,0 см³ піноутворювача вміщують в циліндр, доводять водою до 100 см³ та перемішують вміст скляною паличкою.

100 см³ приготованого розчину піноутворювача вміщують в чистий суху мірну ємність та включають мішалку із частотою обертання 4000 об/хв. Одночасно вмикають секундомір. Перемішування розчину проводять на протязі 30 с. Перемішування припиняють та, не вмикаючи секундомір, фіксують кінцевий об'єм отриманої піни.

Кратність піни (К) обраховують за формулою:

$$K = \frac{V_n}{V_p},$$

де V_n - об'єм отриманої піни, см³;

V_p - об'єм розчину піноутворювача, взятий для випробування (100 см³).

Випробування проводять 3-4 рази та обраховують середнє арифметичне паралельних визначень.

Допустиме відносне відхилення між паралельними визначеннями не має перевищувати норматива східності d , тобто

$$\frac{100 \cdot |K_1 - K_2|}{K_{\text{сеп}}} \leq d, \quad d = 1\%.$$

$$\frac{100 \cdot |C_1 - C_2|}{C_{\text{сеп}}} \leq d, \quad d = 3\%.$$

При невиконанні даної умови аналіз повторюють.

Визначення стійкості піни робочого розчину.

Стійкість піни в часі характеризується коефіцієнтом стійкості. Щоб виміряти коефіцієнт стійкості піни треба змішати в рівних об'ємах цементну масу й піноутворювач (на 1 літр гіпсу - 1 літр цементної маси) і одразу виміряти об'єм отриманої суміші. Через 2 хвилини потрібно виміряти отриманий обсяг пористої

маси. Відношення об'єму осілої суміші до об'єму первісної буде вважатися коефіцієнтом стійкості піни. У якісного піноутворювача коефіцієнт стійкості повинен бути не менш 0,95. Вважається припустимим і коефіцієнт 0,85.

Результати випробувань піноутворювача

Результати випробування піноутворювача наведені в таблиці 4.5

Таблиця 4.5 Результати випробувань піноутворювача ПБ-2000

Назва показника	Нормативний показник	Результат
1 Зовнішній вигляд при 20-25 °С	однорідна рідина від світло-жовтого до коричневого кольору	однорідна рідина світло-коричневого кольору
2 Густина при 20 °С кг/л	1000-1200	1010
3 Водневий показник (рН)	в межах 7,0-10,0	8,2
4 Кратність піни робочого розчину і об'ємною часткою 4%	не менше 7,0	11,5
5 Коефіцієнт стійкості піни	не менше 0,85	0,99

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Склад пінобетону

В ході виконання дипломної роботи було підбрало склад пінобетону середньої густини 350, 550, 850 та 1200 кг/м³. Склад пінобетону наведено в таблиці

Таблиця 5.1 Склад пінобетону

№	Назва	Склад				Густина, кг/м ³	Примітки
		Цement	Пісок	Піноутворювач	Вода		

5.2 Результати дослідження розподілу вологості в пінобетонній стіні

За результатами дослідження побудовано усередненні графіки розподілу вологості по шарах конструкції, наведені на рисунку 5.15.

Відносна вологість зовнішнього повітря – 85%



Відносна вологість зовнішнього повітря – 95%



Відносна вологість зовнішнього повітря – 76 %.



Відносна вологість зовнішнього повітря – 83 %.



Відносна вологість зовнішнього повітря – 82 %.



Відносна вологість зонілітного повітря – 85 %.



Відносна вологість зовнішнього повітря – 75 %.



Рисунок 5.1 - Графік розподілу вологості по товщині конструкції

Отримані значення вологості матеріалу дають змогу зробити наступні висновки:

1. Вологість шарів конструкції змінюється стрибкоподібно, що зумовлено великою паропроникністю матеріалу і його незахищеністю від атмосферних впливів. Подібний характер розподілу вологи в ніздрюватих бетонах є типовим, що підтверджується іншими дослідженнями [36].
2. Середня відносна вологість конструкції за період дослідження – 3,14%, що значно менше від розрахункового вмісту вологи за ДН В.2.6-31:2021 для умов експлуатації Б – 8%. Це пояснюється значним термом перебування конструкції в умовах експлуатації (більше 5 років). Вологістий режим конструкції можна вважати квазістаціонарним.
3. Максимальна вологість шару – 4,84% що трохи більше за середню вологість для нормального вологісного режиму – вологості повітря до 60 %, для пінобетону середньої густини 850 кг/м^3 - 4,7 %; отже в конструкції відбувався незначний процес конденсації вологи. Проте волога конденсувалася лише в шарі №7 (координати 300-350 від внутрішньої сторони конструкції), що можна вважати припустимим для теплоізоляційних властивостей конструкції.

4. Період максимального зволоження - січень, середня вологість у період максимального зволоження – 3,17%. В цей період температура повітря всередині приміщення була найнижчою за період проведення досліджень. Отже, в житлових приміщеннях при дотриманні нормального теплового режиму вологість найвірогідніше буде ще нижчою.

5. Шар максимального зволоження – 7 (координати 300-350), з середньою відносною вологістю 3,16%. Це свідчить про характер міграції вологи в конструкції – зсередини в напрямку зовнішньої сторони. Зовнішній шар матеріалу майже завжди має меншу вологість, що пояснюється постійним підсушуванням його сонячною радіацією, вітровим впливом та сіткою усадкових тріщин.

6. Процес накопичення вологи в холодний період року в конструкції незначний, і складає 0,82 %, що задовольняє вимоги ДСТУ В.2.6-31:2016, за яким допустиме накопичення вологи в холодний період року для ніздрюватих бетонів - 1,2%.

7. Вологісний режим конструкції – задовільний.

5.3 Результати дослідження розподілу температур в пінобетонній стінці

Коливання температури зовнішнього повітря впродовж періоду дослідження показане на рисунку 5.2.



Рисунок 5.2 – Коливання температури зовнішнього повітря впродовж періоду дослідження

В результаті досліджень було отримано графіки розподілу температур для періоду жовтень - квітень по товщі конструкції (координати 0-500). Характерні графіки наведено на рисунку 5.3.

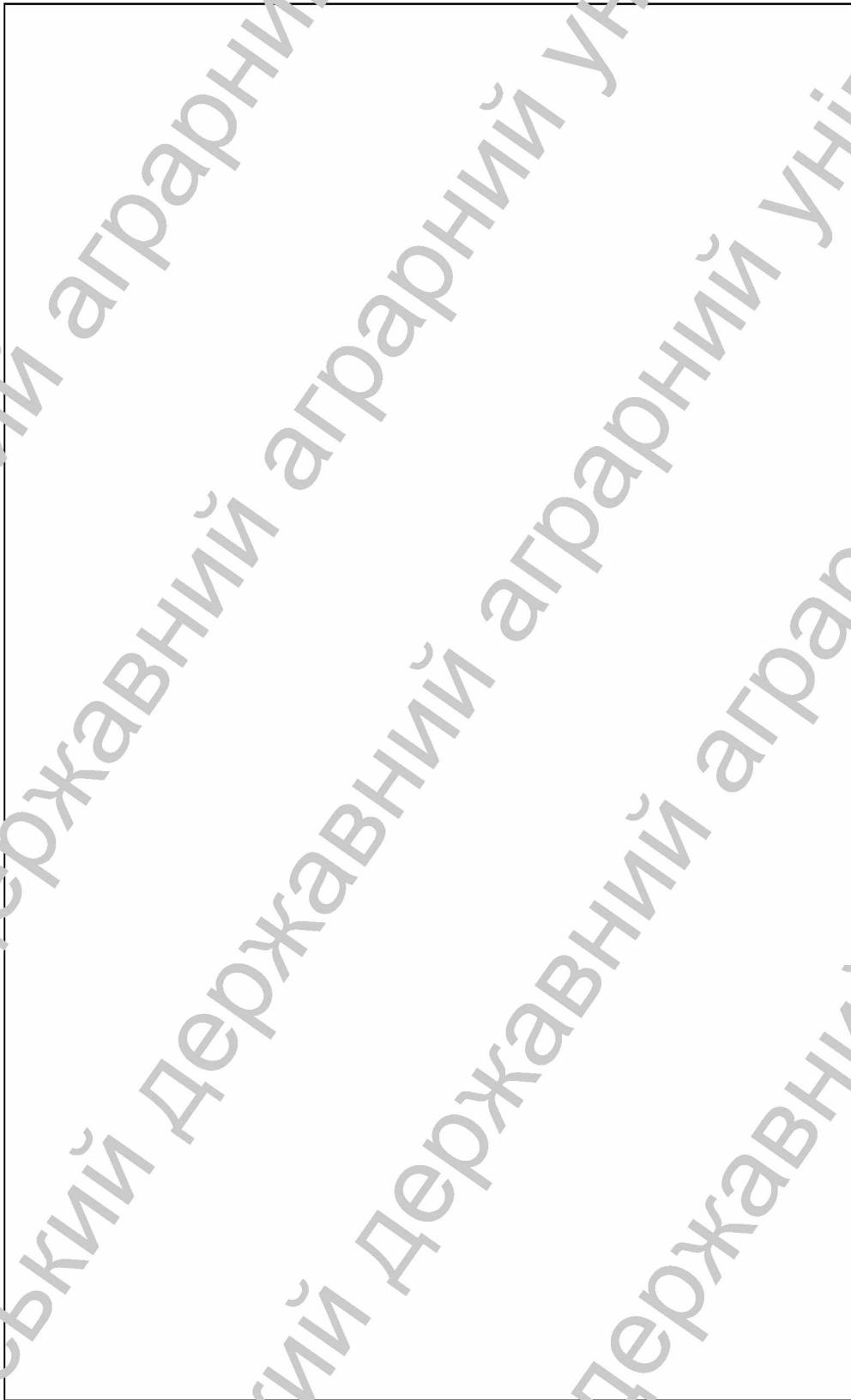


Рисунок 5.3 – Характерні графіки розподілу температур в пінобетонній стінці

За результатами дослідження розподілу температур по товщі огорожуючої конструкції можна зробити висновки.

1 Найбільша координата знаходження нульової ізотерми в матеріалі в холодний період року від зовнішньої поверхні складала мм, тобто % матеріалу перебувало в зоні від'ємних температур.

2 Матеріал володіє значною тепловою інертністю, тобто здатен обмежувати коливання температури в приміщенні при коливанні температур зовнішнього та внутрішнього повітря, впливу сонячної радіації, вітру тощо.

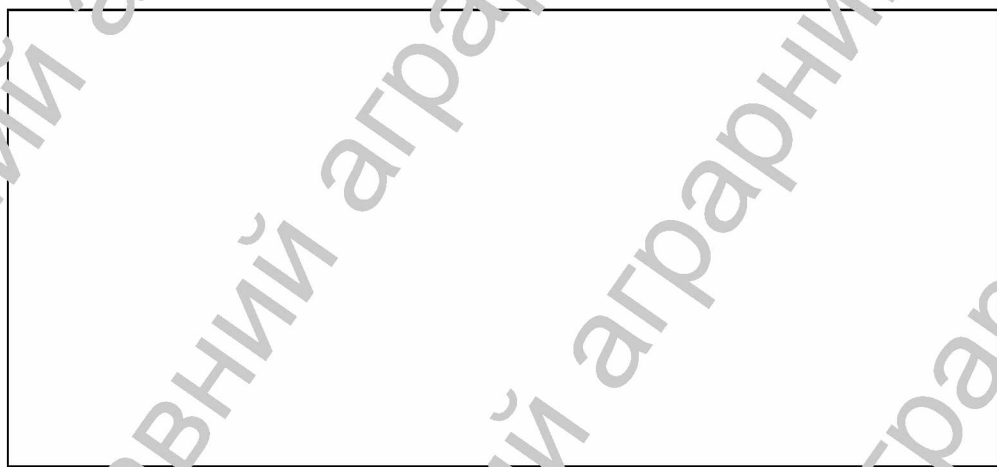


Рисунок 5.4 – Коливання температур впродовж періоду дослідження

Результати кореляції температур по товщі стінки впродовж дослідження із зовнішньою та внутрішньою температурою наведені в таблиці та на рисунку 5.5.

Таблиця 5.2 Кореляція температур в огорожуючій конструкції із зовнішньою та внутрішньою температурою.



Рисунок 5.5 – Кореляція температур в огороджуючій конструкції із зовнішньою та внутрішньою температурою.

5.4 Дослідження теплопровідності пінобетону в установці ИТС-1

Результати досліджень наведені в додатку.

На рисунку 5.6 показано залежність коефіцієнта теплопровідності пінобетону від вологості за експериментальними даними та за даними ДБН В.2.6-31:2016.



Рисунок 5.6 - залежність коефіцієнта теплопровідності пінобетону від вологості за експериментальними даними та за даними ДБН Б.2.6-31:2006.

Залежність коефіцієнта теплопровідності від вологості для теплоізоляційних матеріалів:

- для $\rho = 543 \text{ кг/м}^3$:

$$\lambda = 0,15 + 0,0075W \quad (1)$$

- для $\rho=373 \text{ кг/м}^3$:

$$\lambda = 0,118 + 0,0026W \quad (2)$$

Узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності від густини матеріалу і вологості:

$$\lambda = 0,064 + 0,00014\rho - 0,00366W + 0,0000185\rho W \quad (3)$$

При $\rho=862$ рівняння (3) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,064 + 0,00014 \cdot 862 - 0,00366W + 0,0000185 \cdot 862 \cdot W = \\ &= 0,140 + 0,0064W, \end{aligned}$$

При $\rho=543$ рівняння (3) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,064 + 0,00014 \cdot 543 - 0,00366W + 0,0000185 \cdot 543 \cdot W = \\ &= 0,140 + 0,0064W, \end{aligned} \quad (4)$$

Отримана залежність близька до (1).

При $\rho=373$ рівняння (3) набуває вигляду:

$$\lambda = 0,116 + 0,0032W \quad (5)$$

Отримана залежність подібна до (2). Отже отриманою формулою (3) можна користуватись.

Узагальнена залежність для ширшого діапазону марок за даними ДБН має вигляд:

$$\lambda = 0,064 + 0,00014\rho - 0,0044W + 0,00002\rho W, \quad (6)$$

Що загалом недалеко від експериментальної залежності (3). Порівнюючи залежності (3) і (6), отримуємо близькі результати. Але експериментальна залежність трохи слабкіше реагує на зміни густини і трохи сильніше – на зміни вологості.

Для практичного використання можемо рекомендувати залежність із округленими коефіцієнтами, яка також досить близька до (3) і до (6):

$$\lambda = 0,064 + 0,00014\rho - 0,004W + 0,00002\rho W \quad (7)$$

З порівняння експериментальних та нормативних залежностей видно, що ДБН в основному знижує коефіцієнт теплопровідності, але в межах, цілком допустимих для теплотехнічних розрахунків.

5.5 Дослідження теплотехнічних характеристик пінобетону в кліматичній камері

Результати випробувань пінобетону у кліматичній камері наведені в додатку .

Дослід №1 проводився при заданій температурі повітря в холодному відсіку камери $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, дослід №2 – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, дослід №3 – $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. За результатами вимірювання температур на поверхнях зразка було розраховано орієнтовний розподіл температур по товщі зразка і визначено відсоток об'єму матеріалу, що знаходився у зоні від'ємних температур. На рисунку 5.6 показано результати розрахунків.



Рисунок 5.6 – Орієнтовний розподіл температур в пінобетонних зразках

На рисунку 5.7 наведені діаграми залежності коефіцієнта теплостійкості пінобетону від вологості та температур.





Рисунок 5.7 – Діаграми залежностей коефіцієнта теплопровідності: а – від вологості зразків, б – від температури повітря в холодному відсіку камери; в - від середньої температури зразка.

Як видно із рисунка 5.7 в, при збільшенні середньої температури зразка із масовою вологістю 5% із 2,1 до 8,6 °С коефіцієнт теплопровідності зменшується з 0,539 до 0,529 Вт/м·°С, тобто на 1,83 %. При збільшенні середньої температури зразка з 8,6 до 12,7 °С коефіцієнт теплопровідності зменшується з 0,529 до 0,388 Вт/м·°С, тобто на 26,65 %.

При збільшенні середньої температури зразка із масовою вологістю 15% із 0,7 до 3,9 °С коефіцієнт теплопровідності зменшується з 0,569 до 0,548 Вт/м·°С, тобто на 3,78 %. При збільшенні середньої температури зразка з 8,6 до 12,7 °С коефіцієнт теплопровідності зменшується з 0,548 до 0,445 Вт/м·°С, тобто на 18,80 %.

При збільшенні середньої температури зразка із масовою вологістю 25% із 1,5 до 8,2 °С коефіцієнт теплопровідності зменшується з 0,655 до 0,592 Вт/м·°С, тобто на 9,32 %. При збільшенні середньої температури зразка з 8,2 до 11,9 °С

коефіцієнт теплопровідності зменшується з 0,592 до 0,566 Вт/м·°С, тобто на 4,34 %.

Отже, результати дослідження теплотехнічних характеристик вологого пінобетону підтверджують гіпотезу, що була сформульована у розділі 2. Коефіцієнт теплопровідності вологого пінобетону зростає із зменшенням середньої температури зразків і збільшенням їх вологості. За даними експериментів, зростання коефіцієнта теплопровідності із зміною температур для однакових значень вологості може складати до 39%.

5.6 Глибина карбонізації пінобетону

На зрізах пінобетонних блоків із огорожуючої конструкції з терміном експлуатації 5 років чітко прослідковується границя карбонізованої зони. Карбонізований шар бетону відрізняється світло-жовтуватим відтінком (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Границя карбонізованої зони на зламі пінобетону середньої густини 850 кг/м³

Значення глибини карбонізації, виміряні за зміною водневого показника, наступні.

Отже, за 5 років експлуатації карбонізація проникла в середньому на 23,5 мм

Для зразків-кубиків глибина пористості через 43 доби склала:

Середньої густини 350, кг/м³ – 8 мм;

Середньої густини 850, кг/м³ – 2 мм;

Середньої густини 1200, кг/м³ – відсутня.

Границя карбонізованої і некарбонізованої зони для середньої густини 350 кг/м³ чітко не прослідковується, вона розмита і значення отримане визначенням середньої глибини карбонізації.

За отриманими даними можна зробити висновок, що в конструкційно-теплоізоляційному цинбетоні середньої густини 850 кг/м³ процес карбонізації проходить інтенсивно лише у поверхневих шарах матеріалу. Подібно до процесів карбонізації у важких бетонах, кальцит, що є основним продуктом карбонізації у нормальних умовах, підвищує густину поверхневого шару і утворює карбонатну плівку, яка чинить опір подальшому поширенню процесу. При визначенні швидкості для повної карбонізації конструкції із середньою густиною матеріалу 850 кг/м³ в таких умовах знадобилось би не менше 25 років (блоки товщиною 50 см), що більше ніж значення, наведені в літературі. Проте швидкість поширення процесу карбонізації набагато менша за визначену, оскільки процес має затухаючий характер.

Пов'язуючи результати дослідження карбонізації із зміною міцності блоків конструкції, можна зробити висновок, що карбонізаційна рідка в поєднанні із іншими факторами, призвела до зниження міцності матеріалу по краях блоків. Але матеріал середньої зони блоків не зазнав шкідливої дії карбонізації навіть у незалитому стані.

5.7 Ступінь та характеристики пористості

На рисунку 5.9 наведені отримані зображення поверхні пінобетонних зразків середньої густини 850 кг/м^3 .



Рисунок 5.9 - Скановане і редаговане в програмі Microsoft Office Picture Manager зображення зрізу пінобетонного зразка середньої густини 850 кг/м^3

На рисунку 5.10 наведені зображення 1 см^2 поверхонь пінобетонних зразків середньої густини $350, 550$ та 850 кг/м^3 .



Рисунок 5.10 – зображення 1 см^2 поверхонь пінобетонних зразків різної середньої густини, кг/м^3 а - 350 ; б - 550 ; в - 850 ; г - 850 (із фрагменту огорожуючої конструкції)

Результати визначення характеристик пористої структури пінобетону наведені в таблиці.

Таблиця 5.3 Характеристики пористої структури пінобетону

				3
	3	3	3	
2				

2				
2				

* - без урахування дефектів структури – пор діаметром більше 5 мм.

Наведені дані показують деякі тенденції зміни характеристик пористості із зростанням середньої густини пінобетону:

- збільшення пористості (рисунок 5.11);
- зменшення діаметру пор;
- збільшення кількості пор на одиницю площі.



Рисунок 5.11 – Залежність пористості пінобетону від середньої густини

Різниця характеристик пористості однієї середньої густини $\rho_{\text{сер}}=850 \text{ кг/м}^3$, пояснюється тим, що зразки були виготовлені в різних умовах – в лабораторних і заводських. Структура пористості зразків, виготовлених в заводських умовах

близька до оптимальної структури, яка характеризується великою кількістю пор при відсутності значних дефектів структури.

Виміряні пори мають діаметр від 0,08 мм, отже даний метод враховує тільки ніздрюваті пори і не враховує капілярні та гелеві. Оскільки основні властивості пінобетону визначаються саме характером ніздрюватої пористості, метод підходить для визначення характеристик структури ніздрюватобетонних виробів, для підбору оптимального складу пінобетону, порівняння якості пінобетону, виготовленого різними технологіями та ін. Для уточнення досліджень можливо використовувати знімки, отримані через мікроскоп. В такому випадку можна буде оцінити за зльну пористість матеріалу.

5.3 Зміна міцності пінобетонних блоків із фрагмента огороженої конструкції із терміном експлуатації 5 років

Після 5 років експлуатації блоки мають рівну, гладку поверхню, чіткі кути та грані.

Поверхневий шар матеріалу ззовні має мережу неглибоких тріщин.

Із блоку розмірами 200x300x500 мм було викиляно 15 зразків кубиків за схемою, наведеною на рисунку 5.12.



Рисунок 5.12 – Схема випилювання зразків кубиків розмірами 60x60x60 мм із пінобетонного блоку

В таблиці наведені результати визначення міцності зразків, а також усереднені дані по шарах конструкції.

Таблиця 5.4 Міцність зразків-кубиків із пінобетонного блоку середньою густиною 850 кг/м³

Міцність за роки експлуатації змінилась не рівномірно по товщі конструкції. Діаграма зміни міцності зразків представлена на рисунку 5.13.



Рисунок 5.13 – Зміна міцності пінобетону по зразках

Відсутність закономірності в величині та розташуванні пор призводить до того, що при випробуванні зразки із одного шару мають неоднакові показники міцності розкид міцності. Узагальнюючи результати визначення міцності для зразків пінобетону, отримуємо криву міцності матеріалу по товщі конструкції (рисунк 5.14) в трьох точках – на відстані 5 см (2 см+3 см) від зовнішнього краю, посередині блоку і на відстані 5 см від внутрішнього краю.



Рисунок 5.14 - Крива міцності матеріалу по товщі конструкції на початку дослідження і через 5 років експлуатації

Графік міцності на початку дослідження має практично лінійний характер. Зміна міцності по товщі конструкції пояснюється неоднорідністю пінобетонних блоків за середньою густиною в межах однієї партії.

Графік зміни міцності через п'ять років експлуатації конструкції має параболічний вигляд, із максимумом для зразків із середині блоку. Міцність зразків із зовнішнього де приміщення боку нижча за міцність зразків із внутрішнього боку. Такі тенденції зміни середньої міцності зразків відображають вплив на матеріал фрагменту опоряджуючої конструкції наступних основних факторів:

- процес карбонізаційної усадки матеріалу, що походить по краях блоків і призводить до виникнення напружень і мережі тріщин.
- напруження від періодично змінюваних зовнішніх температур;

- вплив атмосферних факторів (сонячної радіації, вологості повітря, вітру і т.і.) на незахищену поверхню;
- сумісна дія від'ємних температур та вологості матеріалу,
- процеси гідратації цементу, що проходили в глибині матеріалу в сприятливих умовах, і призводили до зменшення пористості матеріалу міжпорових перегородок та зростання міцності.

Можна констатувати, що в незахищеній від впливу зовнішніх факторів конструкції міцність пінобетону знижується у поверхневих шарах на величину до 16,5%. При забезпеченні сприятливих умов міцність пінобетону (без урахування навантажень для несучих конструкцій) може зростати за рахунок продовження процесів гідратації бетону в матеріалі. Особливу важливість має контроль умов перебування матеріалу в перші роки експлуатації, коли підвищена вологість матеріалу в умовах позитивних температур може бути фактором, що сприяє гідратації цементу, а в умовах від'ємних температур – фактором погіршення стану матеріалу.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1 Ніздрюватий бетон азотклавного тверднення, а також матеріали, що використовують для зведення стін, повинні відповідати вимогам чинних нормативних документів і мати позитивний висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи.

6.2 Матеріали, що використовують для зведення стін, повинні відповідати вимогам згідно з ДБН В.1.4-1.01 за показником ефективної питомої активності природних радіонуклідів.

6.3 Роботи зі зведення стін необхідно виконувати згідно з вимогами ДБН А.3.2-2, ДБН Б В.2.6-163, ДСТУ-Н Б А.3.1-25, ДСП 201.

6.4 Вантажно-розвантажувальні роботи необхідно виконувати згідно з ДСТУ.

6.5 Технологічний процес та обладнання, що використовують для зведення стін, повинні відповідати вимогам відповідно до ДСТУ. Вибір електрообладнання здійснюють згідно з НПАОП 40.1-1.32.

6.6 При транспортуванні і складуванні блоків та комплектуючих виробів стін на підприємстві повинні виконуватися загальні правила техніки безпеки згідно з ДСТУ.

6.7 Все технологічне обладнання повинно бути заземлене згідно з ДСТУ, комунікації повинні бути заземлені від статичної електрики згідно з ДСТУ.

6.8 Технічна експлуатація електроустаткування під час зведення стін повинна здійснюватися відповідно до ДСТУ 7237.

6.9 При зведенні стін робочі місця повинні бути забезпечені освітленням відповідно до ДБН В.2.5-28 та необхідними огорожами згідно з ДСТУ.

6.10 Виробничі дільниці повинні бути забезпечені необхідними знаками безпеки згідно з ДСТУ ISO 6309.

6.11 Робітники повинні забезпечуватися засобами індивідуального захисту.

При роботі необхідно застосовувати спецодяг і засоби індивідуального захисту рук, обличчя, голови, органів дихання згідно з ДСТУ 7238, ДСТУ 7239.

6.12 За необхідності виконання фарбування стін, підбір фасадної лакофарбової системи виконують так, щоб забезпечити паропроникність стінової конструкції, атмосферостійкість і довговічність захисно-декоративно покриття. Роботи з фарбування стін повинні виконуватись згідно з НАПБА.01.001 та СП 991

6.13 Робітники повинні забезпечуватись санітарно-побутовими приміщеннями згідно з ДБН В.2.2-28.

РОЗДІЛ 7

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати проведення досліджень в ході виконання магістерської роботи дозволяють зробити наступні основні висновки.

1. Теплотехнічні характеристики пінобетону значною мірою залежать від вологості та середньої температури матеріалу під час випробувань. Приріст коефіцієнта теплепровідності із зміною температурних умов випробування за результатами експеримента досягає 39% і очікується подальше його зростання із зменшенням середньої температури пробків. Визначення теплотехнічних характеристик вологого пінобетону при від'ємних температурах можна проводити в кліматичній камері.

2. Досліди з оцінки пористої структури пінобетону за допомогою морфологічного аналізу сканованих зображень зрізів матеріалів показують зміну характеристик пористості із зростанням середньої густини матеріалу. Значення пористості, отримані за цим методом, менші за довідникові значення через неможливість вимірювання капілярної та осередкової пористості матеріалу міжпорових перепон. Метод підходить для дослідження ніздрюватої пористості матеріалу, оцінці якості пористої структури, визначенні оптимальних технологічних параметрів тощо.

3. Методика визначення глибини та швидкості, застосована в роботі, показує чітку зміну рН бетону в зоні карбонізації і залежність протікання процесів карбонізації в пінобетоні від середньої густини матеріалу. За результатами досліджень можна зробити висновок, що для конструкційно-теплоізоляційного пінобетону процес карбонізації становить меншу небезпеку ніж для теплоізоляційних бетонів і протікає в основному лише в поверхневому шарі матеріалу. За більше ніж 5 років експлуатації фрагменту огорожуючої конструкції процес карбонізації матеріалу поширився на глибину 24 мм від поверхні. Швидкість протікання реакції в подальшому буде затухати через утворення щільної плівки продуктів карбонізації в порах пінобетону.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Підчас виконання магістерської роботи отримані наступні основні наукові та практичні результати.

1. Проведена комплексна оцінка тепловологічного стану огорожуючої конструкції з пінобетонних блоків у незахищеному від зовнішніх впливів стані в умовах експлуатації: отримані закономірності розподілу вологості та температур по товщині стінки. Результати дослідження можна використовувати для проектування теплефективних огорожуючих конструкцій із застосуванням пінобетону.

2. Середня глибина каросцізації пінобетону середньою густиною 850 кг/м^3 - 24 мм.

3. Зменшення розміру зразків для проведення експерименту від стандартних до кубиків $2 \times 2 \times 2$ см позитивно впливає на термін замерзання і відтавання. Але при цьому збільшується коефіцієнт варіації до 0,3 – 0,4, що негативно впливає на результати отриманих досліджень. Межі розкиду міцності значно великі і це унеможливує точне визначення потрібних 15 % втрати міцності і 5 % втрати маси. Для уникнення цього недоліку в подальших дослідженнях необхідно збільшити вибірку.

4. Втрача міцності на зовнішніх стінках пінобетонних блоків складає 16,3 %.

5. Стримані формули залежностей міцності та морозостійкості від вологості зразків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Радько І. П., Наливайко В. А., Окушко О. В., Міщенко А. В., Антипов Є. О. Підвищення заходів з енергоефективності та енергозбереження у вищих навчальних закладах. Науковий вісник НУБіП України. 2018. № 283. С. 275 – 280.
2. Міщенко А. В., Шеліманова О. В., Антипов Є. О. Аналіз теплового комфорту у приміщеннях навчального корпусу №8 НУБіП України після термомодернізації будівлі. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2014. Вип. 194, ч. 1. С. 119 – 123.
3. Радько І. П., Наливайко В. А., Окушко О. В., Міщенко А. В., Антипов Є. О. Методика та обладнання для проведення енергетичного аудиту: [Електронний ресурс]. Енергетика та автоматика. 2018. № 1. С. 133–134.
8. Козирський В. В., Берга О. М., Шеліманова О. В., Антипов Є. О. Результати спрощеного енергоаудиту об'єктів НУБіП України. Енергетика і автоматика. 2017. № 1 (11). С. 55 – 63.
4. Ратушняк, Г. С. Р25 Будівельна теплофізика : практикум / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна. - Вінниця : ВНТУ, 2021. - 51 с. ISBN 978-966-641-335-0
5. ДСТУ-Н Б В.2.6-192:2013 Настанова з розрахункової оцінки тепловластивості огорожувальних конструкцій
4. Горніковська І.Б., Демчина Х.Б., Ковальчик І.І. Дослідження фізико-механічних властивостей пінобетону, армованого фіброю // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. № 37. 2010. С. 100–112.
5. Взаємний зв'язок міцнісних та деформаційних характеристик безавтоклавного пінобетону / В.Б. Верба, І.Б. Горніковська, Х.Б. Демчина, В.В. Волоцюга, П.О. Іолик // Вісник Донецької національної академії будівництва і архітектури «Сучасне промислове та цивільне будівництво». Т. 8. № 1. 2012. С. 28–35. ISSN 1819-432X.
6. Каганов В.О., Горніковська І.Б. Тривалістю стійкість пінобетонів безавтоклавного виробництва. Збірник наукових праць «Ресурсоекономічні

- матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Вип. 26. Рівне: НУВГП. 2013. С. 179–185. ISSN 2218-1873.
7. Krylov E. A., Martynov V. I. Analysis of Solid Phase Impact on Cellular Concrete Properties. *Meridian ingenieresc.* // Journal of technical university of Moldova and Moldavian engineering association, 2014, №2(57), P. 35–37.
 8. Krylov E., Martynov V., Mykolaiets M., Martynova O., Vietokh C. Influence of modification of the solid component on the properties of non-autoclaved aerated concrete. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol.3. No.6 (99). P.53–59. doi: 10.15587 / 1729-4061.2019.171012
 9. ДСТУ Б В.2.7-278:2011(ГОСТ 27005-86, MOD) Бетони легкі та ніздрюваті. Правила контролю середньої густини.
 10. ДСТУ Б В.2.7-45:2010 Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови
 11. ДСТУ Б В.2.7-164:2008 Вироби з ніздрюватих бетонів теплоізоляційні. Технічні умови
 12. ДСТУ Б В.2.7-58-95 (ГОСТ 17177-94) Будівельні матеріали. Матеріали та вироби будівельні теплоізоляційні. Методи випробувань.
 13. ДСТУ Б В.2.7-46-2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови.
 14. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності
 15. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетону і будівельних розчинів. Загальні технічні умови (EN 934-2:2001, UEQ)
 16. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Метод визначення міцності за контрольними зразками
 17. ДСН 3.3.6.037-99 Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку
 18. ДСН 3.3.6.039-99 Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації
 19. ДСН 3.3.6.042-99 Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень

20. ДСТУБ EN 771-4:2016 (EN771-4:2011+A1:2015, IDT) Камені стінові.
Частина 4. Вироби стінові з автоклавного газобетону.
21. ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск.
22. ДСТУ Б В.2.7-185:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густини, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму.
23. ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск.
24. НПА СД 49.1-1.32-01 (ДНА ОП 0.04-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних.
25. ДСТУ В.2.2-28:2010 Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення.