

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота/проект

другий магістерський рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Шляхи вдосконалення теплоізоляційних матеріалів

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-пцб-1
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)

освітньої програми промислове і цивільне будівництво
(код і назва освітньої програми)

Кучай Костянтин Валерійович
(прізвище та ініціали)

Керівник Шокарєв Є.О.
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Рецензент к.т.н. Мішук К.М.
посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали

Запоріжжя
2023

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язку креслень) 8 листів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Шокарев Є.О.		
Розділ 2	Шокарев Є.О.		
Розділ 3	Шокарев Є.О.		
Розділ 4	Шокарев Є.О.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Аналіз питання теплоізоляційних матеріалів		
2.	Методика проведення досліджень і характеристика сировинних матеріалів		
3.	Розробка складів і технологічних параметрів синтезу піноскла		
4.	Розробка технології виробів з піноскла і аналіз способів їх застосування		

Студент

(підпис)

Кучай К.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи/проекту

(підпис)

Шокарев Є.О.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено
Нормоконтролер

(підпис)

Данкевич Н.О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кучай Костянтин Валерійович. Шляхи вдосконалення теплоізоляційних матеріалів.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник Є.О. Шокарєв. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2023.

В даний час однією з найбільш актуальних проблем є пошук і створення можливостей економного використання ресурсів, за допомогою енергозберігаючих заходів і інженерних рішень щодо реалізації тепло- і технологічних процесів з мінімальними тепловими втратами. Велику роль в цьому грає знання теплофізичних властивостей теплоізоляційних матеріалів і виробів.

Недостатня теплова ізоляція є причиною втрати тепла, а внаслідок цього - зростаючих витрат за опалювання, а також ризику пошкодження стін із-за частого промерзання. Також дуже важливим є питання взаємодії сучасної теплової ізоляції з навколишнім середовищем, пошук матеріалів, які відповідатимуть екологічним вимогам і вимогам соціального комфорту.

Ключові слова: піноскло, фізико-механічні властивості, теплоізоляція, стінові панелі, теплотехнічний розрахунок.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	9
1.1 Сучасна ситуація в галузі теплоізоляційних матеріалів.....	9
1.1.1 Характеристики теплоізоляційних матеріалів.....	10
1.1.2 Способи отримання теплоізоляційних матеріалів.....	14
1.1.3 Види теплоізоляційних матеріалів.....	16
1.2 Технологічні особливості виробництва та застосування піноскла.....	25
1.2.1 Функції компонентів піноскляної шихти.....	26
1.2.2 Особливості формування структури піноскла при використанні різних пороутворювачів.....	28
1.2.3 Вироби на основі піноскляних матеріалів.....	35
1.3 Класифікація легких бетонів.....	36
1.4 Класифікація стінових панелей.....	41
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	46
2.1 Характеристика сировинних матеріалів.....	46
2.2 Методики випробувань та фізико-хімічних досліджень.....	47
3 АНАЛІЗ СКЛАДІВ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ ПІНОСКЛА.....	51
3.1 Вибір оптимального співвідношення компонентів пороутворювальної суміші для синтезу піноскла	51
3.2 Вплив температури та часу спінювання на структуру та щільність піноскла.....	56
3.3 Вплив фракційного складу на структуру піноскла.....	59
3.4 Вплив виду склобою на структуру та властивості піноскла.....	61

3.5	Вплив шлакових відходів ТЕС на структуру та властивості піноскла.....	62
4	ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ПІНОСКЛА І АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ.....	68
4.1	Аналіз режимів синтезу виробів із піноскла.....	68
4.1.1	Аналіз режиму синтезу плит з піноскла.....	68
4.1.2	Аналіз режимів синтезу піностекольних гранул.....	70
4.2	Визначення фізико-механічних властивостей піноскляних виробів.....	71
4.2.1	Визначення властивостей піноскляних гранул	71
4.2.2	Визначення властивостей плит з піноскла.....	78
4.3	Пошук шляхів щодо застосування піноскляних виробів у багатошарових будівельних панелях.....	85
4.3.1	Легкий бетон на основі піноскляних гранул.....	85
4.3.2	Порівняльний теплотехнічний аналіз багатошарових будівельних панелей.....	88
4.3.2.1	Типова тришарова стінова панель.....	89
4.3.2.2	Багатошарова будівельна панель.....	90
	ВИСНОВКИ.....	93
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	95

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. На теперішній час, серед кризи в багатьох сферах нашої країни виникають потреби у посиленні вимог щодо безпеки будівельних матеріалів та енергоефективності будівель, тому стає актуальною розробка негорючих довговічних теплоізоляційних матеріалів, на основі яких можливо створювати конструкційні елементи для швидкокомонтованих будівель.

Практично єдиним матеріалом, що задовольняє всі зазначені вимоги, є піноскло – ніздрювате скло, що володіє сукупністю ізоляційних та експлуатаційних властивостей (довговічність, інертність до впливу зовнішнього середовища та шкідників, повна пожежна безпека та ін.). Основним недоліком піноскла є його порівняно висока ціна, обумовлена використанням як основної сировини дефіцитного бою скла. Одним із найбільш перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є заміна склобою на вторинні матеріали, що дозволяє знизити як собівартість матеріалу, так і екологічне навантаження шляхом зменшення обсягів відвалів.

Особливості технології піноскла дозволяють отримувати на його основі широкий спектр виробів: блоки, плити, фасонні вироби, щебінь, гранули і т.д. Плитні та фасонні вироби використовуються для утеплення стін та поверхонь складної форми, гранули та щебінь – як заповнювач у дорожньому будівництві або для виготовлення легких бетонів. Отже, на основі виробів з піноскла можливе отримання як зовнішніх несучих, так і внутрішніх ізоляційних шарів панелей для будівництва, що швидко зводиться. Таким чином, дослідження з розробки технології виробів із піноскла із застосуванням вторинних сировинних матеріалів є актуальними.

Мета роботи: розробка шляхів вдосконалення складів та технології піноскляних матеріалів із застосуванням вторинної сировини для створення виробів для внутрішньої та зовнішньої теплоізоляції.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити наступні **завдання**:

- розробка шляхів удосконалення складів та технології піноскла на основі вторинної сировини;
- розробка шляхів удосконалення технології виробів на основі піноскляних матеріалів (плит з піноскла, піноскляних гранул), дослідження їх фізико-механічних властивостей;
- розробка пропозицій щодо застосування піноскляних виробів для отримання легких бетонів на пористих заповнювачах та багатошарових будівельних панелей;
- аналіз теплотехнічних та економічних параметрів пропонованих виробів на основі піноскла у порівнянні з сучасними аналогами.

Об'єктом дослідження шляхи удосконалення теплоізоляційних матеріалів для покращення теплоізоляційних властивостей огорожуючих конструкцій.

Предметом дослідження є теплоізоляційні матеріали на основі вторинної сировини.

Методи досліджень. В роботі використовувалися методи порівняння, узагальнення, методи системного підходу, експерименти, математичне планування і обробка результатів експериментів.

Апробація. Магістерська робота була представлена на III Всеукраїнській науково-практичній конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України».

Структура і об'єм магістерської роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, загальних висновків та пропозицій, списку використаних джерел. Основною темою текст викладено на 98 сторінках, з них 10 малюнків, 25 таблиць, та містить списки літератури зі 29 найменування праць вітчизняних та зарубіжних авторів.

1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Сучасна ситуація в галузі теплоізоляційних матеріалів

Теплоізоляційними називають будівельні матеріали та вироби, що мають високу пористість і, як наслідок, низьку теплопровідність і малу середню щільність. Вони призначені для мінімізації теплового обміну з навколишнім середовищем через огорожувальні конструкції житлових та виробничих будівель, поверхонь виробничого обладнання та теплових агрегатів (печей, трубопроводів та ін.). Середня щільність теплоізоляційних матеріалів не перевищує 600 кг/м^3 , а теплопровідність – $0,175 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [1].

Застосування теплової ізоляції в будівництві дозволяє відчутно знизити товщину і масу захисних конструкцій (стін, покрівлі), зменшити витрату основних будівельних матеріалів і, відповідно, знизити загальну вартість конструкції, зменшити витрату палива в експлуатаційний період і т.д.

В технологічному обладнанні теплоізоляція знижує тепловтрати, забезпечує необхідний температурний режим, знижує питому витрату палива на одиницю продукції та покращує умови праці.

Щоб отримати достатній ефект від застосування теплоізоляції, здійснюються теплові розрахунки, в яких задаються конкретні типи теплоізоляційних матеріалів та враховуються їх теплофізичні властивості. Ці заходи дають змогу успішно вирішувати проблему економії паливно-енергетичних ресурсів.

1.1.1 Характеристики теплоізоляційних матеріалів

Головною фізико-механічною характеристикою теплоізоляційних матеріалів є теплопровідність – здатність матеріалу передавати тепло. До інших параметрів, які характеризують теплоізоляційні матеріали, можна віднести щільність, морозостійкість, вогнестійкість, міцність на стиск, паропроникність, водопоглинання, сорбційну вологість та ін. Облік цих параметрів у розрахунках систем теплоізоляції дозволяє досягти значної економії будівельних матеріалів та зниження витрати енергії на опалення.

Теплоізоляційні матеріали з теплопровідності поділяються на три класи: А – малотеплопровідні, Б – середньотеплопровідні та В – підвищеної теплопровідності.

Класи відрізняються величиною теплопровідності матеріалу, а саме: за середньої температури 25°C матеріали класу А мають теплопровідність до 0,060 Вт/(м·К), класу Б – від 0,060 до 0,115 Вт/(м·К), класу В – від 0,115 до 0,175 Вт/(м·К). За інших середніх температур вимірювання теплопровідності матеріалу зростає відповідно до наступної залежності:

$$\lambda_t = \lambda_0 / (1 + \beta t), \quad (1.1)$$

де λ_t – теплопровідність за температури t °С; λ_0 – теплопровідність за температури 0°C; β – температурний коефіцієнт, що виражає збільшення теплопровідності матеріалу при підвищенні його температури на 1°C і дорівнює 0,0025 (до 100 °С - за даними О.Є. Власова) [1, 2].

На величину теплопровідності пористих матеріалів, у тому числі і теплоізоляційних, впливають вигляд, розміри та розташування пір, щільність матеріалу, хімічний склад та структура твердої фази, коефіцієнт випромінювання обмежують пори поверхонь, вид і тиск заповнює пори газу.

Однак переважний вплив на величину теплопровідності мають його температура та вологість. Теплопровідність матеріалів збільшується зі зростанням температури, проте, набагато більший вплив при експлуатації

надає вологість.

Відмінною ознакою теплоізоляційних матеріалів є властива їм висока пористість. Повітря в порах має меншу теплопровідність, чим оточуючі його конденсовані фази (тверді або рідкі). При величині пір 0,1...2,0 мм теплопровідність повітря в них становить 0,023...0,030 Вт/(м·К). Пористість теплоізоляційних матеріалів може становити до 90...98 %, а дуже тонкого скляного волокна – до 99,5 %. Тим часом, пористість таких матеріалів, як важкий бетон, становить 9...15 %, граніт, мрамур – 0,2...0,8 %, керамічна цегла – 25...35 %, сталь – 0 % тощо. Оскільки пористість прямо впливає на величину середньої щільності, теплоізоляційні матеріали зазвичай розрізняють не по пористості, а по щільності. Їх ділять на три групи: особливо легкі ОЛ (найбільш пористі), що мають марку по середній густині (кг/м³) у сухому стані 15, 25, 35, 50, 75 та 100; легкі (Л) - 125, 150, 175, 200, 225, 300 та 350 та важкі (В) – 400, 450, 500 та 600. Матеріали, що мають середню щільність між зазначеними марками, відносять до найближчої більшої марки. При середній щільності 500...700 кг/м³ матеріали застосовують з урахуванням їх несучої можливості у конструкціях, тобто як конструкційно-теплоізоляційні [1, 2].

Водопоглинання – здатність поглинати, а водоутримуюча здатність – здатність утримувати воду при контакті з нею. Разом з іншими властивостями – гігроскопічність, водостійкість, водопроникність – вони відображають важливі якості теплоізоляційних матеріалів.

При зволоженні теплоізоляційних матеріалів їхня теплопровідність різко зростає, т.я. теплопровідність води становить 0,58 Вт/(м·К), тобто приблизно в 25 разів вище, ніж у повітря. Вода негативно впливає і на теплоутримуючі властивості, та довговічність матеріалу в конструкціях.

При замерзанні зволоженого теплоізоляційного матеріалу відбувається збільшення теплопровідності, оскільки теплопровідність льоду становить вже 2,32 Вт/(м·К). Крім відмінності теплоізоляційних матеріалів щодо теплопровідності та середньої щільності вони поділяються також:

- за типом вихідної сировини – на неорганічні та органічні. До неорганічних належать мінеральна та скляна вата та вироби з них, спучений керамзит, вермикуліт та перліт, пористі бетони, керамічні теплоізоляційні вироби, піноскло та ін.; до органічних - деревностружкові та деревноволокнисті плити, очерет, теплоізоляційні полімери та ін.;

- за формою матеріалів – штучні (цегла, плити, сегменти, блоки, циліндри), рулонні (картон, мати, матраци, смуги), шнурові (джгути, шнури) та сипучі матеріали (спучений перліт, мінераловатна суміш та ін.);

- по стисливості під навантаженням (щодо деформації стиснення) – м'які (М), стисливість понад 30 % під питомим навантаженням 2 кПа, напівжорсткі (НПЖ) – 6...30 %, жорсткі (Ж) – до 6 %, підвищеної жорсткості – до 10 % під питомим навантаженням 4 кПа і тверді - до 10% під питомим навантаженням 10 кПа.

До теплоізоляційних матеріалів пред'являються й інші вимоги – стабільність фізико-механічних і теплотехнічних властивостей, гранично допустима кількість токсичних речовин, що виділяються, вимоги пожежної безпеки, економічності. Теплова ізоляція повинна витримувати дію високої температури та відкритого полум'я протягом заданого часу. Гранична температура застосування теплоізоляційних виробів: керамічних – до 1200...1300 °С, пористого бетону та піноскла – до 400 °С, органічних – 75...100 °С [1, 2].

Структура теплоізоляційних матеріалів характеризується наявністю твердої та газоподібної фаз; може бути і рідка фаза. Газова та конденсовані фази беруть участь у передачі теплоти; крім того, тепло передається через стінки пір з твердою речовиною. Теплопередача пір складається з теплопровідності газу в порах, конвективної передачі тепла та випромінювання газу. В порах діаметром менше 5 мм конвекція практично відсутня і може не враховуватися, але при більшому діаметрі пір або їх безперервності вона зростає. Теплове випромінювання залежить від чорноти стінок пор, їх розміру та форми, а також температури. Величина

випромінювання має важливе значення при передачі тепла в порах, особливо за високих температур, так як вона пропорційна кубу температури. В результаті теплопередача при високій температурі високопористих виробів може бути вищою, ніж менш пористих. Тверда фаза має вищу теплопровідність і за її безперервності, теплопровідність матеріалу виявляється у 2,0...2,5 рази вище, ніж за безперервності пір. У волокнистих теплоізоляційних матеріалах безперервними в структурі є як тверда фаза, так і пори, тому їхня теплопровідність значно залежить від променистої складової теплопровідності.

До інших важливих властивостей теплоізоляційних матеріалів, що істотно впливають на їх експлуатаційні показники, можна віднести:

- морозостійкість – здатність матеріалу витримувати багаторазове поперемінне заморожування та розморожування в насиченому водою стані без ознак руйнування та без значного зниження міцності. Від цього показника суттєво залежить довговічність усієї конструкції;

- механічна міцність, тобто здатність матеріалів чинити опір руйнуванню під дією зовнішніх сил, що викликають деформації та внутрішні напруги в матеріалі. Розрізняють міцність теплоізоляційних матеріалів на стиск, вигин, розтяг, що залежать від структури, міцності твердої складової та параметрів пористості. Так жорсткий матеріал із дрібними порами міцніший, ніж матеріал з великими нерівномірними порами.

- довговічність – інтегральний показник, що залежить від цілого ряду інших властивостей: хімічна, біологічна та вогнева стійкість, фазово-мінералогічний та хімічний склад та ін.

1.1.2 Способи отримання теплоізоляційних матеріалів

З урахуванням фізичних факторів, що впливають на загальну чи ефективну теплопровідність у гетерогенних пористих тілах, були запропоновані основні способи отримання наступних теплоізоляційних матеріалів: пористоволокнистих (мінеральна та скляна вата, деревоволокнисті матеріали з застосуванням азбесту та ін.), пористо-зернистих (перлітові, вермикулітові, вапняно-кремнеземисті та ін.); пористих (газобетони, пінобетони, піноскло, пінопласти та ін.). Відмінність між ними полягає як у складі та структурі кінцевого продукту, так і в технологічному способі поризації.

До основних штучних способів спінювання матеріалів з метою надання їм теплоізоляційних властивостей відносяться:

1) Спосіб газотворення, заснований на введенні у сировинну суміш компонентів, здатних викликати хімічні реакції з виділенням великої кількості газової фази. Гази, прагнучі вийти з обсягу матеріалу, що виготовляється на етапі твердіння пластичної маси, власним тиском формують пористу структуру. Таким способом отримують газобетон, газосилікат, газокераміку, комірчасте скло (піноскло), газонаповнену пластмасу та ін.

2) Спосіб пороутворення, заснований на введенні у воду пороутворюючих речовин для замикання в'язучих. Стабілізовані бульбашки піни являють собою повітряні пори, що формують структуру пінобетону, піносилікату, пінокераміки та ін. Пороутворювачами є солі жирних кислот – натрієві та калієві мила, клеєканіфольний пороутворювач; алюмосульфонафтенний пороутворювач; гідролізована кров. Як стабілізатори піни для підвищення її стійкості до моменту затвердіння в'язучого застосовуються столярний клей, сірчаноокислий глинозем, смоли та ін.

3) Спосіб підвищеного водозатворення, що полягає у застосуванні великого об'єму води при приготуванні формувальних мас і подальшого її випаровування зі збереженням пор при висушуванні. Цей спосіб застосовують у виготовленні деревноволокнистих плит, торф'яних та інших матеріалів.

4) Спосіб спучування, що полягає у нагріванні деяких видів шлаків та гірських порід до високих температур. З сировини за рахунок хімічно пов'язаної чи цеолітної води виділяються водяні пари чи газу. При способі спучування сировиною служать вермикуліт, перліт, обсидіан, деякі різновиди глини, що особливо містять легкоплавкий оксид заліза (II). Після спучування у обертовій або шахтній печі при швидкому підйомі температури до 800...1000 °С та подальшому охолодженні, ці та деякі інші сировинні матеріали формують відповідні теплоізоляційні матеріали з розвиненою пористою структурою – спучені керамзит, вермикуліт, перліт, шлакову пемзу та ін.

5) Спосіб розпушування, заснований на виготовленні з щільної мінеральної сировини безформної маси волокнистого матеріалу з наступним додаванням форми виробів. Цей спосіб найбільш поширений у виробництві мінеральної та скляної вати та виробів з них. Сировиною для мінеральної вати служать гірські породи та металургійні шлаки, а для виготовлення скляної вати застосовують скляний бій та відходи скла. Органічні теплоізоляційні матеріали також отримують способом розпушування – бавовняну і вовняну вату, ватяні вироби та ін. Способом розпушування також отримують азбест, а потім азбестовий матеріал, що є хорошим теплоізоляційним матеріалом, особливо у вигляді азбестового паперу та картону.

б) Спосіб вигоряючих органічних речовин, що вводяться в сировину як пороутворюючі добавки. До керамічної сировини (діатоміту, трепелу, глині тощо) додають тирсу, подрібнене вугілля та ін. Цей спосіб дозволяє використовувати не спучуючу сировину, враховуючи дефіцитність спучуючих глини.

1.1.3 Види теплоізоляційних матеріалів

Органічні теплоізоляційні матеріали виготовляють із застосуванням рослинної сировини та побічних продуктів лісового та сільського господарства. Для таких матеріалів використовують деревну стружку, тирсу, очерет, торф та ін.

Другим поширеним видом органічних теплоізоляційних матеріалів є полімерні, одержувані на основі полімерних термопластичних матеріалів. До основних теплоізоляційних матеріалів із застосуванням рослинної сировини відносяться деревностружкові, деревоволокнисті, фіброліт, арболіт, очерет, торф'яні, повстяні [1, 2].

Деревностружкові плити – штучний будівельний конгломерат (ШБК) у формі плит, що виготовляється гарячим пресуванням подрібненої суміші деревної стружки з полімерними речовинами, що виконують функції сполучного компонента [3]. Як сполучний використовують смоли: мочовиноформальдегідні, фенолоформальдегідні та ін. Для поліпшення властивостей плит в них вводять гідрофобізуючі та антисептуючі добавки.

Деревноволокнисті плити - вид ІСК, що виготовляється з відходів деревини шляхом її подрібнення та розщеплення в волокнисту масу. До деревної маси додають гідрофобізуючі або антисептуючі речовини, і з неї відливають плити. Їх пресують і сушать при температурі до 165...180 °С. Деревноволокнисті плити використовують в будівництві як ізоляційний матеріал, не уражений будинковими грибами, для обшивки стін та стель, утеплення покрівельних покриттів, дверних отворів тощо. [1, 2].

Фіброліт є ІСК, одержуваним на основі неорганічних в'язучих речовин із застосуванням деревної вовни – тонку деревну стружку стрічкоподібного виду спеціального призначення – як армуючий компонент.

Деревну вовну піддають «мініралізації» (обробці хлористим кальцієм, рідким склом або сірчаноокислим глиноземом), після чого її змішують з

в'яжучою речовиною та водою. З цієї суміші під тиском до 0,5 МПа формують плити. Відформовані плити протягом доби твердіють у пропарювальних камерах при нормальному тиску та температурі 30...35 °С з подальшим їх сушінням до вологості не більше 20 %. Використовують фіброліт для утеплення стін та покриттів.

Арболіт – ІСК, що отримується із суміші цементу, деревного заповнювача, води та хімічних добавок. По структурі це різновид легкого бетону, матричною частиною якого є цементний камінь. Цей матеріал застосовують у стінових конструкціях та як теплоізоляцію у стінах, перегородках будівель, особливо малоповерхових сільськогосподарського призначення.

Очерет одержують із стебел очерету та троснику шляхом пресування та скріплення сталевим дротом упоперек стебел. Як антисептуючі речовини використовують фтористий натрій, кремнефтористий амоній та ін. Очерет застосовується для заповнення каркасних стін та перегородок. З теплоізоляційних матеріалів очерет найдешевший, але менш вогнестійкий, хоча, будучи спресованим, він не горить відкритим полум'ям, але може тривалий час тліти. Його істотні недоліки - схильність до псування гризунами, загниваність і погана цвяхість.

Торф'яні теплоізоляційні матеріали (плити, шкаралупи і сегменти) отримують з торфу, що мало розклався та зберіг волокнисту будову. Для цього торф'яну масу змішуванням доводять до однорідного стану з додаванням антисептиків та гідрофобізаторів, заповнюють нею форми та пресують. Спресовані вироби піддають термообробці за нормальної температури 120...150 °С. В процесі обробки з торфу виділяються смолисті речовини, що склеюють волокна без внесення додаткових в'яжучих речовин. Торф'яні плити використовують для утеплення стін та перегородок, а також для ізоляції поверхонь промислового обладнання та трубопроводів при температурах від мінус 60 до плюс 100 °С.

Повстяні матеріали отримують з грубої вовни з домішкою лляної паклі - сплутаного волокна, одержуваного як відхід при виробництві льону. Повсть використовують при утепленні стін та стель, поміщаючи його під штукатурку, при утепленні віконних та дверних коробок, зовнішніх дверей та кутів у рубаних будинках.

Полімерні теплоізоляційні матеріали характеризуються малою теплопровідністю, значною легкістю та достатньою механічною міцністю.

Особливий інтерес представляють «заливальні» пінопласти на основі фенолформальдегідних, пінополістирольних та поліуретанових полімерів. Утворення теплоізоляційного прошарку пінопласту безпосередньо при виготовленні стінових панелей значно спрощує та здешевлює роботи.

Пінополістирол має пористу структуру із замкнутими осередками, заповненими повітрям чи газом. Сировиною є суспензійний полістирол і порофор як спінюючий компонент. Пінополістирол не схильний до гниття, легко цвяхується і склеюється з багатьма будівельними матеріалами. Він використовується в конструкціях покрівель, в будівництві холодильників, при влаштуванні внутрішніх перегородок, міжповерхових перекриттів, вентиляційних каналів, утепленні стін [1, 2].

Дуже ефективним матеріалом є екструзійний пінополістирол, що спучується через розплав в екструдері. Він характеризується максимальною стабільністю теплотехнічних та фізико-механічних властивостей у часі. Він застосовується як утеплювач основ автомобільних доріг та залізничного полотна, підземних частин будівель та споруд, у конструкціях покрівлі, у зонах вічної мерзлоти тощо.

Пінополівінілхлорид – жорсткий, еластичний або напівеластичний пінопласт, стійкий до дії лугів, кислот, води та може застосовуватись в інтервалі температур від -60 до $+60$ °С. Пінополівінілхлорид широко використовують для теплоізоляції холодильників, а також для звукоізоляційних цілей.

Пінополіуретани - газонаповнені пінопласти, що виходять на основі поліефірів та застосовувані в інтервалі температур $-60...+170$ °С як тепло- та звукоізоляційний матеріал; фасонні вироби широко використовують для ізоляції трубопроводів гарячого та холодного водопостачання.

Сотопласти – тепло- та звукоізоляційні матеріали, які отримують шляхом гарячого формування гофрованих листів паперу, тканини або деревного шпону, попередньо просочених фенолформальдегідним резольним полімером.

Фізико-механічні властивості сотопластів залежать насамперед від форми і розмірів сот, а також від природи утворює стінки порожнин матеріалу. Через низьку вартість і малу теплопровідність найбільш широке застосування в будівництві отримали сотопласти з наповнювачем з бавовняних тканин та паперу.

До групи неорганічних теплоізоляційних матеріалів відносяться: мінеральна та скляна вата та вироби з них; комірчасте скло (піноскло); легкі бетони із застосуванням спученого заповнювача; пористі теплоізоляційні бетони; азбестові та азбестовмісні матеріали; керамічні теплоізоляційні вироби та вогнетривкі легковаги. Головною особливістю неорганічних теплоізоляційних матеріалів є їхня висока вогнестійкість, мала теплопровідність, низька гігроскопічність, несприйнятливості до загнивання.

Мінеральна вата застосовується для теплоізоляції холодних (до -200 °С) та гарячих (до $+600$ °С) поверхонь. Укладання вати шаром - дуже трудомісткий процес, тому при засипній ізоляції її частіше перетворюють на гранули. Основними типами виробів з використанням мінеральної вати є напівжорсткі та жорсткі плити на бітумному або синтетичному сполучному. Волокна мінеральної вати змішують зі сполучною речовиною, та з отриманої маси внаслідок нагрівання під тиском формують вироби [1, 2].

Скляна вата і вироби з неї мають практично ті ж властивості, що і мінеральні. Цей вид вати застосовують для теплоізоляції конструкцій, що захищають будівель, поверхонь промислового обладнання при температурі

до +200...450 °С, трубопроводів з температурою до +450 °С. Зі скляної вати формують вироби у вигляді плит, матів, шкаралуп.

Спучені перліт і вермикуліт є теплоізоляційними матеріали у вигляді гранул для засипання порожнин, і особливо як заповнювачів легких бетонів і розчинів для монолітного і збірного будівництва. Зі спученого перліту із застосуванням мінеральних або органічних сполучних речовин виготовляють різні види перлітобетону, в тому числі жаростійкий (500...700 °С), а також вироби з керамзитоперлітобетону, силікатоперлітові, перлітобитумні вироби і т.д. Зі спученого вермикуліту отримують плити, шкаралупи та сегменти на основі сполучних речовин із застосуванням азбесту та інших добавок. Вермикулітобетон застосовують для виготовлення тришарових панелей. З використанням спучених перліту та вермикуліту можна отримувати матеріали трьох груп: звичайна ізоляція з температурою застосування до +200 °С – пісок та пудра, перлітопластбетони, ін.; середньотемпературна ізоляція (до +600 °С) – перлітоцементи, випаловий легковаговик, ін.; високотемпературна ізоляція (800...1000 °С) – перлітокерамічні вироби, жаротривкий перлітобетон, перлітові вогнетриви та ін.

Ніздрюваті бетони та силікати використовують як теплоізоляційні матеріали та вироби при їх щільності нижче 400 кг/м³. На вигляд застосовуваного пороутворювача і в'язучої речовини їх називають пінобетонами, піносиликатами, газобетонами, газосилікатами. Можливе використання змішаного пороутворювача, у такому разі їх називають піногазосилікатами, піногазобетонами, керамзитопенобетонами тощо. Плити з пористих бетонів застосовують для теплоізоляції стін та перекриттів, покриття поверхонь обладнання та трубопроводів.

Азбестові та азбестовмісні теплоізоляційні матеріали представлені азбестовим папером, картоном, плитами, шкаралупами, сегментами, шнурами та ін., мастичними ізоляціями із застосуванням азбестових

порошків. Дані матеріали застосовують для теплової ізоляції обладнання та трубопроводів при температурі до +450 °С. Представниками цієї групи матеріалів є азбестотрепельні і т.д. Використовуючи ці матеріали, зазвичай отримують мастичну ізоляцію. Особливо часто такі вироби використовують за температур не вище 550 °С.

Піноскло – тепло- та звукоізоляційний матеріал, що є спіненою скломасою (комірчасте скло). Для його виробництва використовується здатність силікатного скла розм'якшуватися і (у разі наявності газоутворювача) пінитися при температурах 900...1000 °С. В міру наростання в'язкості при охолодженні спіненої скломаси до кімнатної температури піна, що вийшла набуває істотної механічної міцності.

Детальний порівняльний аналіз найбільш поширених на сучасному ринку, наведено в таблицях 1.1...1.2.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика блокових теплоізоляційних матеріалів

Параметр	Од. вим.	Піноскло	Плити з мінер. вати	Пінополістирол	Екструдований пінополістирол	Пінополіуретан	Пінобетон
Середня щільність	кг/м ³	200...600	50...200	40...150	33...40	32...80	400...1100
Коефіцієнт теплопровідності	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	0,063...0,14	0,048...0,07	0,038...0,05	0,031...0,038	0,030...0,041	0,09...0,29
Товщина матеріалу для забезпеч. $R_0 = 2,7 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	мм	170	130	103	84	81	243
Міцність на стиск	МПа	1,5...7,5	0,03...0,15	0,04...0,2	0,12...0,2	0,15...0,3	0,9...7,5
Усадка	%	$\leq 0,1$	≤ 10	≤ 30	$\leq 0,5$	≤ 1	$\leq 0,5$
Горючість НГ	група	НГ	НГ-Г2 (негорючі – помірно горючі)	Г2-Г3 (помірковано – нормально горючі)	Г1 (слабко горючі)	Г3-Г4 (нормально – сильно горючі)	НГ
Займистість	група	-	В1-В2	В2-В3	В2-В3	В3	-
Морозостійкість	циклів	більше 100	не більше 5	не більше 15	не більше 20	не більше 15	не більше 50
Водопоглинання, не більше	об. %	2...20	34	4	0,4	8	5...10
Температурний інтервал експлуатації	°С	-100...+500	-200...+650	-180...+80	-50...+75	-160...+130	-50...+450
Строк служби	років	> 100	< 15	< 15	< 20	< 15	< 50
Середня вартість у 2022 р.	тис. грн. за м ³	12,5 - 16,5	2,2 - 7,0	2,5 - 5,0	4,5 - 16,0	4,0 - 15,0	1,5 - 3,0

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика гранульованих теплоізоляційних матеріалів

Параметр	Од. вим.	Гранульоване піноскло	Керамзит	Спучений перліт	Спучений вермікуліт	Пінополістирол гранульований
Насипна щільність	кг/м ³	150...400	200...800	50...600	100...200	6...30
Коефіцієнт теплопровідності	$\frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$	0,045...0,1	0,1...0,18	0,052...0,093	0,055...0,065	0,037...0,054
Водопоглинання	об. %	2...20	8...20	20...400	300	2...5
Температура застосування	°С	-100...+500	-50...+100	-200...+875	-260...+1200	-180...+80
Міцність на стиск	МПа	0,5...2,5	0,6...5,5	0,1...0,6	не нормується	0,005...0,026
Середня вартість 1 м ³ у 2022 р.	тис. грн.	3,5...5,0	1,2...1,7	1,0...1,5	4,0...6,0	1,5...3,5
Основні недоліки	-	висока ціна	висока щільність та водопоглинання, низькі теплоізоляційні якості	високе водопоглинання, низька міцність	високе водопоглинання, низька міцність	високе водопоглинання, низька міцність, токсичність

Як видно з таблиць 1.1-1.2, з усього спектру існуючих на теперішній час теплоізоляційних матеріалів за сукупністю характеристик особливо виділяється піноскло. За рахунок склоподібної структури піноскло має унікальну сукупність властивостей, що забезпечують йому широке застосування (табл. 1.3) [4-8].

Таблиця 1.3 – Области застосування піноскла

Властивості	Застосування
Низька щільність матеріалу при високій міцності	- будівництво на слабких ґрунтах; - наповнювач для легких бетонів; - теплоізоляція перекриттів, покрівель, підлог; - наповнювач для теплоізоляційної штукатурки та сухих будівельних сумішей; - надбудова верхніх поверхів будівель; - виготовлення понтонних та інших плавучих конструкцій.
Різноманітність розмірів осередків та кольору матеріалу	- використання в якості оздоблювального матеріалу.
Вогнестійкість, негорючість	- теплоізоляція у висотному будівництві; - створення вогнетривких конструкцій; - теплоізоляція трубопроводів та промислового обладнання, яке працює в умовах підвищених температур (до 500 °С).
Екологічна безпека	- будівництво резервуарів та технологічних ліній у харчовій та фармацевтичній промисловості.
Низька теплопровідність	- теплоізоляція в промисловому (у тому числі, і в агресивних середовищах), цивільному та індивідуальному будівництві; - використання для термоізоляції трубопроводів та газопроводів
Низька паропроникність	- паро- та гідроізоляція в промисловому та цивільному будівництві.
Хімічна інертність, висока корозійна стійкість	- виготовлення багаторазової ізоляції; - будівництво резервуарів та трубопроводів для кислот та нафтопродуктів; - захист зерносховищ, господарських та житлових приміщень.
Висока морозостійкість	- теплоізоляція дорожнього полотна.

1.2 Технологічні особливості виробництва та застосування піноскла

Як зазначалося вище, піноскло - це довговічний, надлегкий, вібростійкий, вологонепроникний матеріал, що володіє атмосферною та хімічною стійкістю.

Піноскло має високі теплоізоляційні властивості. Залежно від хімічного складу, щільності та текстури піноскло може застосовуватися як теплоізоляційний, будівельно-ізоляційний, звукоізоляційний, декоративний, плаваючий, електроізоляційний, конструкційний матеріал і т.д.

Переваги піноскла, що полягають в унікальному поєднанні теплоізоляційних та конструкційних властивостей, пожежобезпеки, безумовності і біостійкості, переносять його в розряд довговічних теплоізоляційних матеріалів. Піноскло – це унікальний матеріал, з практично необмеженим терміном служби. Він зберігає свої властивості протягом усього терміну служби будівлі.

Піноскло виробляється у формі штучних виробів та ізоляційних заповнювачів – щебеню та гранул. Піноскло основних виробників володіє значною міцністю (0,6...1,1 МПа), малою щільністю (120...170 кг/м³), теплопровідністю (0,04...0,06 Вт/(м·К)) водопоглинанням (≤ 5 кг/м² за 28 діб) [9-11].

Основною причиною недостатньо широкого застосування піноскла в практиці будівництва, є не його експлуатаційні характеристики, а ціна, пов'язана з технологічними особливостями його одержання.

У зв'язку з цим першорядну важливість набувають проблеми модернізації технології синтезу піноскла із застосуванням оптимізованих складів та технологічних параметрів синтезу з урахуванням того, що існуючі технології піноскла були орієнтовані, в першу чергу, на отримання теплоізоляційних матеріалів, масштабні дослідження проводилися відносно

піноскла з низьким коефіцієнтом теплопровідності на основі дешевої сировини. Дуже важливо при цьому створити умови формування оптимальної пористої структури піноскла, що зумовлює якість одержуваного матеріалу.

1.2.1 Функції компонентів піноскляної шихти

На спінювання впливає кожен компонент шихти. Порошок скла – це основа матеріалу. В області високих температур скло повинно бути у в'язкому стані для спінювання. Інтервал температур при цьому лежить у діапазоні 580...740 °С. При більш високих температурах скло - це в'язка маса, піддається деформаціям у всіх трьох вимірах [12-14].

В даний час існують варіанти отримання комірчастого скла на основі різної сировини. Піноскло отримують на основі бою листового та тарного скла, гірських порід, промислових відходів та спеціально звареного скла.

Особливо значущі два параметри, що змінюються температурно-часовими параметрами спінювання:

- формування каркасу піноскла має забезпечувати протікання міграційних і хімічних процесів у силікатному каркасі вихідного склопорошку;

- процес спінювання має впливати на фізичні властивості одержуваного матеріалу.

Процес взаємодії між окремими частинками порошку скла, забезпечує стійкість каркасу скла через формування зв'язків Si-O-Si обумовлений переміщенням іонних асоціатів. Поверхневий натяг також істотно впливає на всі ті технологічні процеси, які супроводжуються зміною поверхні розділу «розплав - газ».

Сучасне виробництво піноскла передбачає два методи утворення піноскла: пороутворення за допомогою вуглецевмісних речовин (гліцерин, антрацит, сажа та ін.) або неорганічних карбонатів, оксидів бору та фосфору. Вуглецеві матеріали формують так зване «чорне» піноскло, карбонатні – «біле». В першому випадку крім отримання CO_2 утворюється спектр з'єднань вуглецю. При спінюванні скла CO_2 формує замкнуті пори сферичної форми. Враховуючи складність процесів газо- та пороутворення, особливості конкретних пороутворювачів будуть розглянуті далі.

Наступними необхідними компонентами шихти для одержання піноскла (особливо гранульованого) є різні добавки, що розділяються на два типи: 1) технологічні; 2) що знижують прояв лужно-силікатних реакцій [15].

До першої групи відносяться сполучні та опудрювальні матеріали. Зв'язуючі застосовують для покращення гранулоутворення. В якості їх застосують лігніни, рідке скло, карбоксиметилцелюлозу (КМЦ), крохмальний клейстер [16]. Широко поширене рідке скло (розчин силікату натрію). Його застосування пояснюється забезпеченням більш високого змісту пов'язаної води на етапі складання шихти. Підсумком спектра досліджень [11, 16, 17] став той факт, що введення в шихту часткою відсотка зв'язаної води знижує в'язкість скла в інтервалі $740 \dots 840$ °C у $2,5 \dots 4$ рази. Іншою функцією рідкого скла є забезпечення безпеки пороутворювача біля кожної частинки скла до певної температурні і повнішого контакту між частинками.

Відомо також [17], що водяна пара знижує поверхневий натяг розплаву скла більш як на 30 %. Поверхневий натяг розплаву зменшується зі зростанням парціального тиску пари. Було встановлено, що зростання тиску пара знижує температуру спінювання [17].

Іншим видом добавок є опудрювальні матеріали, що запобігають склеюванню гранул при термообробці та прилипанню до форми та футерування печі. Для цього використовують тугоплавкі порошки: технічний глинозем, тальк, тонкоподрібнені відходи вогнетривів, водні емульсії тугоплавких глин (каоліну) у співвідношенні 2:1 [16, 18].

Опудрювачі також беруть участь у зниженні активності лужносилікатних реакцій (ЛСР) при використанні піноскла як заповнювача для бетонів. Причиною ЛСР при використанні цементу та будь-якого компонента на основі скла є реакції аморфного кремнезему з лугами цементу. Підсумком реакції є утворення лужносилікатного гелю. Кальцій підвищує в'язкість гелю та водопоглинання, що веде до появи внутрішніх напруг, що розширюють бетон і ведуть до тріщиноутворення [19-21].

Застосування піноскла як заповнювача для бетонів потребує заходів щодо зниження ЛСР, що забезпечуються такими шляхами: 1) знижувати кількість лужноземельних металів у піносклі в межах 8...15 %; 2) вводити не менше 5% сполук цирконію; 3) покривати гранули зв'язками, що знижують ступінь взаємодії піноскла з цементом (силікат натрію, поліуретан, епоксидна смола). Таким чином, застосування рідкого скла знижує також активність ЛСР, що веде до додаткового підвищення якості бетону [22-25].

1.2.2 Особливості формування структури піноскла при використанні різних пороутворювачів

При спінюванні, як правило, не настає хімічного розкладання пороутворювача та, крім цього, після розкладання можуть залишитися тверді частинки. При формуванні піноскла, разом з рідкою (склоподібною) і газоподібною фазами, завжди є деяка кількість твердої фази. При спінюванні відбувається швидке переміщення твердої частини пороутворювача, що не розклалася (як правило, з меншою щільністю) в бік знов утвореною поверхнею склофази. Речовини з малою хімічною спорідненістю до рідкої фази скла концентруються на поверхні кордону між газовою і рідкою фазами і тому мають поверхнево-активну дію. На противагу цьому, речовини з

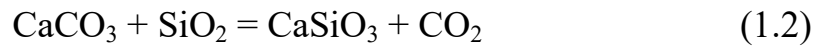
великою хімічною спорідненістю до скла розчиняються в ньому, а іноді й хімічно взаємодіють, і тому ці речовини не будуть активно впливати.

Дія твердої фази на межі рідкої та газової фаз проявляється тим, що тверді частинки приклеюються до поверхні скла, або ж, залежно від змочуваності склом, до певної міри занурюються в його поверхневий шар. У такій системі вільна поверхнева енергія граничного шару суттєво зменшується, і виникає енергетичний бар'єр, за рахунок чого піна стабілізується. Було доведено, що найбільша стабілізуюча дія на піну мають такі тверді речовини, які незначно змочуються рідкою фазою, тобто коли між поверхнями рідкої та твердої фази утворюється максимальний граничний кут. Такою речовиною є, наприклад, вуглець, що має дуже малу хімічну спорідненість до розплаву скла, а також незначно змочується ним. Мікроскопічні дослідження дозволяють встановити, що чорне забарвлення піноскла, синтезованого за допомогою вуглецевого пороутворювача, обумовлена малими частинками вуглецю, що не прореагував, приклеюються на поверхні стінок осередків.

Таким чином, остання обставина є основним поясненням можливості отримання дуже якісного піноскла з малим водопоглинанням при застосуванні вуглецевих пороутворювачів. В той же час, більшість мінеральних пороутворювачів, насамперед карбонатних, – доломіт чи вапняк – характеризуються суттєвою хімічною спорідненістю до скла, тому ні самі пороутворювачі, ні продукти їхньої дисоціації (CaO , MgO) не можуть чинити на скляну піну стабілізуючої дії. Застосовуючи ці пороутворювачі, досі не вдалося отримати піноскла з об'ємною вагою менше 200 кг/м^3 , яке не мало б значного водопоглинання.

Група нейтралізаційних пороутворювачів, дія яких є результатом реакції нейтралізації, в даний час за малим винятком в промисловості не використовується. Деякі компоненти скла, перш за все всього SiO_2 , B_2O_3 і P_2O_5 , є реакції нейтралізації кислої складової, а пороутворювач, яким зазвичай буває карбонат лужноземельного металу, - основною складовою.

Виділення газу в момент, коли скло вже виявляється досить рідким для того, щоб утворити піну, можна виразити за допомогою простої схеми, наприклад для вапняку (1.2):



Реальний механізм взаємодії між склом та карбонатом є складнішим. Початок розкладання відноситься до реакції між частинками вапняку та скла у твердому стані. Велике значення мають також і лужні метали, що знаходяться у склі, що порушують безперервну сітку тетраєдрів SiO_2 і підвищують таким чином реакційну здатність скла. Одночасно з реакцією нейтралізації відбувається і термічне розкладання вапняку, залежить не тільки від температури, а й від парціального вуглекислого тиску газу в осередках піноскла. При використанні безбарвного скла піноскло виходить чисто білого кольору, з кольорового скла можна отримати піноскло різного забарвлення.

З використання карбонату кальцію починали свої роботи багато відомих дослідників у галузі піноскла, такі як, наприклад, І.І. Китайгородський, Б. Лонг, Е. Шульц та ін. Першим патентом, що відноситься до способу виробництва піноскла з використанням вапняку, є чехословацький патент № 63398 [26]. Замість карбонату кальцію можна використовувати й інші карбонати: магнію (доломіт, сидерит) і навіть натрію (соду) та калію (поташ). Ці пороутворювачі застосовують у кількості 1...2 % від ваги скла. Пороутворення при цьому протікає бурхливо і зазвичай при температурах на 30...50°C нижче, ніж при використанні вуглецевих пороутворювачів, описаних нижче. Однак піноскло з об'ємною вагою менше 200...250 кг/м³ вдається отримати лише з великими труднощами.

Про отримане таким способом піноскло правильніше говорити як про губчасте, оскільки в ньому окремі осередки нерівномірні як за величиною, так і формою, крім того, з-поміж них навіть неозброєним оком можна розрізнити багато пов'язаних один з одним каналів. Водопоглинання таких виробів буває дуже високим – від 30 до 90 % за обсягом, у середньому

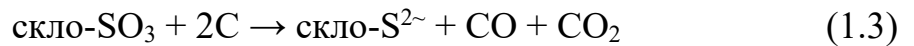
близько 70 %. Шульц [26] дуже докладно вивчав пороутворення за допомогою вапняку і запропонував дуже складний спосіб спікання та спінювання, за яким форму з пороутворювальною сумішшю необхідно нагрівати 6 год з дотриманням гранично суворих вимог температурного режиму та витратами часу в середньому в 3 рази довше, ніж при застосуванні вуглецевих пороутворювачів.

Неможливість отримати піноскло з незначним водопоглинанням при застосуванні карбонатних пороутворювачів зумовлена низкою причин. Карбонат кальцію може сприятливо впливати на рекристалізацію скла при спінюванні, т.я. технічні скла з високим вмістом оксидів двовалентні метали характеризуються високою схильністю до неї. При нагріванні порошкової суміші скла та вапняку також не можна достатньо відокремити процес спікання скла від процесу утворення газів, так як у тонко меленого вапняку термічне розкладання відбувається при порівняно низьких температурах і збігається з реакцією нейтралізації протягом усього часу пороутворення.

Відомості про отримання піноскла з використанням карбонатних пороутворювачів, що мають незначне водопоглинання, можуть бути пояснені різними методами його вимірювання. Капіляри, пронизливі окремі осередки карбонатного піноскла, в основному мають незначний діаметр і розташовані лабіринтоподібно. Просте занурення зразка піноскла в холодну воду не забезпечує повного видалення всього повітря з досліджуваних матеріалів та заповнення капілярів водою. Природньо, що в цьому випадку піноскло показує менше водопоглинання, чим це відповідає дійсному обсягу пір. Однак достатньо видалити повітря з пір, наприклад, кип'ятінням, і водопоглинання цих виробів досягає дуже високих значень, більш відповідних дійсності.

Спосіб виробництва піноскла із застосуванням окислювально-відновних пороутворювачів був вперше опублікований у французькому патенті № 786818 [26]. Процес виробництва за цим патентом надалі піддавався постійній модернізації, і в даний час за цим способом

виробляється практично все піноскло у світі. В основі цього способу лежить реакція, через яку певний компонент скла відновлюється пороутворювачем з утворенням газів. Відновлюваним компонентом скла зазвичай буває SO_3 , що відновлює пороутворювач - вуглець або містить його органічна речовина. Схему реакції при формуванні піноскла можна подати реакцією (1.3):



Записана так реакція є лише схемою. Якщо про нейтралізаційні пороутворювачі було сказано, що дійсний механізм перебігу реакцій за їх участю дуже складний, то ще більшою мірою це справедливо для пороутворювачів окисно-відновних. В схемі реакції представлено відновлення шестивалентної сірки, що міститься у склі, до сірки сульфідної, тоді як у деяких джерелах наводиться відновлення лише до чотиривалентної сірки з утворенням сірчистого газу SO_2 . Проте готове піноскло, отримане за цим способом, завжди має запах сірководню і ніколи не має запаху сірчистого газу, а при тривалому нагріванні готового піноскла у великих порожнинах, утворених в результаті об'єднання окремих осередків, утворюється і SO_2 . Однак він може утворюватися як взаємна реакція з сульфідної сірки, що раніше утворилася, або з непрореагованим триокисом сірки, і відновленням триокису сірки вуглецем.

У зв'язку з утворенням у піносклі сірководню, який як відчувається по запаху при дряпанні доби, так і визначається хімічним шляхом (у кількості кількох відсотків) [26], дуже важливим є питання функції води. Для формування сірководню необхідна наявність водню, значна кількість якого в піносклі може виникати тільки за рахунок розкладання води. Наявність води пояснюється, в першу чергу, тим, що сировинна суміш, як будь-яке тонкорозмелене технічне скло, досить гігроскопічне і навіть при герметизації транспортних комунікацій готової суміші завжди містить кілька десятих відсотка вологи. Спільна присутність води та вуглецю при температурах близько $800\text{ }^\circ\text{C}$ неминуче веде до взаємної реакції з утворенням водяного газу ($\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$). Швидкість цієї реакції у пороутворюючій суміші може

бути дуже високою внаслідок великої поверхні контакту. В лабораторних умовах вдалося довести, що добре висушена поротворююча суміш спінюється істотно гірше, ніж суміш, висушена на повітрі, тобто яка містить гігроскопічну вологу.

Крім реакції вуглецю з водою чи іншими компонентами скла слід враховувати також безпосереднє окислення киснем повітря, що міститься у сировинній суміші та в атмосфері печі, та оборотні реакції між вуглецем та

різними продуктами реакцій, насамперед CO, CO₂ та H₂. Крім того, у перебігу окислювально-відновних реакцій беруть участь і інші компоненти, насамперед оксиди заліза. В одному з патентів з виробництва піноскла з кремнезему описується навіть відновлення SiO₂ вуглецем з утворенням SiO та CO.

Незалежно від механізму реакцій між пороутворювачем і компонентами сировинної суміші, очевидно, що завдяки перебігу цих реакцій формується необхідний обсяг газів, причому в найсприятливіший момент, коли скло вже спіклося і може формувати піну. Як головний окислювальний компонент у склі був наведений триокис сірки. Він міститься в кількості 0,1...0,5 % майже у всіх технічних склах. Як було зазначено раніше, триокис сірки в присутності надлишку кисню містить також і скло, яке було зварене з шихти без додавання сульфату, але знаходилося у дотику зі сполуками сірки (наприклад, з генераторного газу).

Триокис сірки при цьому не є єдиним компонентом, що окислює, здатним формувати піноскло. В лабораторії можливий синтез скла з миш'яком, оксидами сурми, марганцю, перманганатом калію, біхроматом калію та іншими окислювачами. Однак, оскільки вуглець служить і для стабілізації скломаси, в піносклі завжди повинна залишатися певна кількість непрореагованого вуглецю, яке залежить переважно від обсягу, ніж від ваги. Найбільша залежність цієї кількості від питомої поверхні частинок вуглецю; тому вуглецеві добавки з більшою питомою поверхнею застосовуються в

меншій кількості, ніж вугілля та кокс. Останні подрібнюються або одночасно зі склом, або окремо приблизно до того ж розміру, що й порошок скла.

Менший залишок вуглецю проявляється у зовнішньому вигляді готового піноскла: піноскло, отримане на основі сажі, виявляється більш блискучим і світлим, ніж на основі вугілля та коксу, одержуване чорним та матовим. З іншого боку, тонкозернистий вуглець схильний до окислення, внаслідок чого за його використання необхідне застосування щільних форм або спінювання в явно не окисній атмосфері. Інакше пороутворювач вигорить раніше, ніж спечеться скло, через що спінювання або взагалі не станеться, або вийде піноскло низької якості та з великим водопоглинанням. Після спікання скла, воно обволікає окремі частинки вуглецю, перешкоджаючи його передчасному окисленню.

Варто згадувати ще деякі інші форми вуглецевих пороутворювачів, які рекомендуються в деяких закордонних патентах. Так наприклад, Д. Еустахіо в патенті № 2775524 [26] пропонує використовувати вуглець, розподілений в будь-якій інертній речовині з питомою поверхнею близько 100...500 тис. $\text{см}^2/\text{г}$. В якості останнього придатні гель двоокису кремнію або силікату кальцію. Інертна маса з великою поверхнею насичується розчином органічної речовини, що легко розкладається, наприклад цукру, гліцерину, багатоосновних спиртів, з яких при подальшому відновленні утворюється тонко розподілений вуглець. Кількість вуглецю, що вводиться в інертний наповнювач, має бути 5...50%. Приготовлений таким чином пороутворювач вводиться у сировинну суміш в кількості 0,2...8 %. В порівнянні з використанням чистої сажі досягається краща якість піноскла, оскільки вуглець краще розподіляється в пороутворюючій суміші і тому може бути використаний в меншій кількості. Тут слід зазначити ще одну перевагу рідкофазних пороутворювачів – відсутність необхідності в ультратонкому помелі (не менше 6000...7000 $\text{см}^2/\text{г}$), без якого не може бути досягнута необхідна однорідність та пористість.

Отримані на даний момент наукові результати вказують на те, що застосування вуглецевих пороутворювачів дозволяє отримувати більш рівномірну структуру і більш якісний матеріал. Карбонатні пороутворювачі застосовуються зазвичай при вирішенні специфічних завдань, зокрема, при застосуванні нетипової сировини.

1.2.3 Вироби на основі піноскляних матеріалів

На сьогоднішній день є два основні види виробів з піноскла – гранули та блоки (рис. 1.1).

Піноскло блочного типу має структуру із замкнутими осередками. Цей матеріал оптимально підходить для теплоізоляції фасадів будівель, цоколів, вимощення, фундаментів, стель, міжповерхових перекриттів, трубопроводів. Він витримує навіть найсуворіші умови експлуатації. А оскільки утеплювач не дає усадки, його використовують і як основний будівельний матеріал.

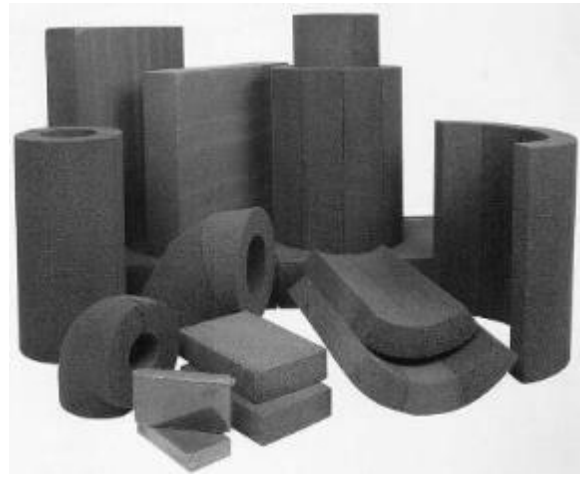
Плити мають розмір 450х600 мм. Товщина піноскла – від 60 до 120 мм. При цьому на основі блочного піноскла можливе отримання виробів будь-якої форми: плити; блоки; шкаралупи та інші фасонні вироби.

Гранульоване піноскло має вигляд мікропористих сферичних гранул. За формою це може бути крихта, пісок, щебінь. Розмір фракцій різний – 1...5 мм, 5...7 мм, 7...20 мм. Такі вироби використовують для теплоізоляції підлог та перекриттів, внутрішніх стін.

Крім зазначених вище способів застосування виробів з піноскла, гранульоване піноскло може застосовуватися також у різних видах композиційних матеріалів. Найбільшого застосування зараз отримали легкі бетони, де піноскляні гранули застосовуються як заповнювачі.



а) плити;



б) фасонні вироби;



в) щебінь;



г) гранули

Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд виробів із піноскла

1.3 Класифікація легких бетонів

Бетон – це штучний камінь, що отримується при твердінні раціонально підбраної суміші, що складається з в'язучої речовини, води та заповнювачів (щебеню, гравію або піску). Суміш цих матеріалів до затвердіння називають бетонною сумішшю. Зерна піску та щебеню складають кам'яну основу бетону. Цементне тісто, що утворюється після замішування бетонної суміші водою, яка обволікає зерна піску і щебеню, заповнює проміжки між ними і

грає спочатку роль мастила заповнювачів, що надає рухливість (плинність) бетонної суміші, а після затвердіння пов'язує зерна наповнювачів, утворюючи штучний камінь.

Легкі бетони представляють для українського будівництва значний практичний інтерес. У порівнянні з важким бетоном вони мають низку переваг. Найбільш важливим є нижча щільність. Так, щільність легкого бетону високих марок приблизно в 1,5 рази менше, ніж важкого. Різниця у вазі легких бетонів невисокої міцності порівняно з важким – ще більше і може сягати до 2...3 разів. В цьому випадку легкі бетони набувають і іншої дуже важливої переваги – хороші теплозахисні властивості. Внаслідок меншої ваги легкобетонних елементів порівняно із залізобетонними значно спрощуються умови їх транспортування та монтажу.

Технологія легких бетонів, розроблена Н.А. Поповим [35], в даний час набула широкого розвитку. Легкий бетон – це бетон з об'ємною масою трохи більшою за 1800 кг/м^3 . Його отримують або використовуючи пористі (легкі) заповнювачі, гравій або щебінь без дрібного заповнювача, або поризуючи (спінюючи) цементне тісто (комірчастий бетон). Найбільш поширені легкі бетони на пористих заповнювачах: керамзитобетони, шлакобетони, аглопоритобетони, вермикулітобетони та ін. Завдяки малій щільності та теплопровідності, а також достатньої міцності легкі бетони широко застосовуються в збірних бетонних та залізобетонних конструкціях та виробках [36].

Легкі бетони відповідно до вимог ГОСТ 25192-2012 класифікують за такими ознаками: виду заповнювачів; основного призначення; структури.

По вигляду великого пористого заповнювача бетони поділяють на: керамзитобетон (бетон на керамзитовому гравії); перлітобетон (бетон на спученому перлітовому щебені); аглопоритобетон (бетон на аглопоритовому щебені або гравії); шунгізитобетон (бетон на шунгізитовому гравії); бетон на щебені з пористих гірських порід; термолітобетон (бетон на термолітовому щебені або гравії); вермикулітобетон (бетон на спученому вермикуліті);

шлакопемзобетон (бетон на шлакопемзовому щебені або гравії); шлакобетон (бетон на золошлакових сумішах теплових електростанцій – ТЕС або на паливному шлаку, гранульованому доменному або електротермофосфорному шлаку). Допускається застосовувати інші види бетонів на великих пористих заповнювачах: на зольному, склозитовому, азеритовому гравії та ін.

По галузі застосування легкі бетони поділяють на конструкційні (в тому числі конструкційно-теплоізоляційні) та спеціальні (теплоізоляційні, жаростійкі, хімічно стійкі, декоративні та ін.). Слід виділити три найбільш поширені види бетонів (згідно з ГОСТ 25820-2014): конструкційний (щільність не більше 2000 кг/м^3), до якого пред'являються вимоги щодо механічних властивостей та довговічності; конструкційно-теплоізоляційний (щільність не менше 500 кг/м^3), до якого пред'являються вимоги щодо механічних властивостей, довговічності та теплотехнічних показників; теплоізоляційний (щільність не більше 500 кг/м^3), призначений для виготовлення теплоізоляційних виробів, влаштування теплоізоляції будівельних конструкцій, обладнання та трубопроводів.

За структурою бетони поділяють на: поризовані; крупнопористі; пористі; щільні.

Поризований легкий бетон. Поризацію розчинної частини бетону застосовують для покращення теплофізичних властивостей легкого бетону на пористому заповнювачі, або замінюють розчинну частину поризованим цементним каменем. До поризованих легких бетонів відносять бетони, що містять понад 800 л/м^3 легкого великого заповнювача з обсягом повітряних пір $5...25 \%$. Поризацію таких бетонів здійснюють або попередньо підготовленою піною, або за рахунок введення повітровтягуючих або газоутворюючих добавок. Добавками, що повертають повітря, поризують тільки суміші з піском, піною - тільки безпіщані суміші, газоутворюючими добавками – суміші з піском та без піску. В залежності від застосовуваного заповнювача та способу поризації бетони називають: керамзитопінобетон, керамзитогазобетон, керамзитобетон і т.д. [35].

Міцність поризованого бетону становить 5...10 МПа, а щільність – 700...1400 кг/м³. Міцність та щільність бетону залежать від його структури. Витрата керамзитового щебеню або гравію не повинна перевищувати 0,9 м³ на 1 м³ бетону. Витрата цементу в керамзитобетоні для неармованих конструкцій має становити не менше 120 кг/м³, для армованих - не менше 200 кг/м³.

Крупнопористий легкий бетон – це бетон на легких крупнопористих заповнювачах (керамзитовий гравій, аглопорит та ін.). Такі бетони мають високу жорсткість, тому існує необхідність додаткового контролю розшаровування суміші [36].

Ніздрюватий бетон - це особливо легкий бетон з великою кількістю (до 85 об. %) повітряних осередків розміром до 1...1,5 мм [37]. Пористість пористим бетонам надається: механічним шляхом за рахунок змішування тіста з окремо приготовленою піною з отриманням при твердінні пористого матеріалу, що називається пінобетон; хімічним шляхом за рахунок введення в тісто спеціальних газоутворюючих добавок, подальшої реакції газоутворення (спукування) з отриманням після затвердіння матеріалу, що називається газобетоном. За щільністю бетони ділять на теплоізоляційні (300...600 кг/м³) та конструкційні (600...1200 кг/м³).

Легкі бетони характеризують такими показниками якості: міцністю на стиск, середньою щільністю, морозостійкістю, водонепроникністю, теплопровідністю.

Досвід великопанельного будівництва підтвердив, що легкий бетон найбільш підходящий матеріал для великопанельних зовнішніх огорожувальних конструкцій. При такому будівництві застосовують рішення, що забезпечують зведення п'ятиповерхових житлових будинків та вище за безкаркасною конструкцією. Найбільш поширена схема – з панельними перекриттями, що спираються за контуром на несучі перегородки – найкраще відповідає конструктивним якостям легких бетонів на пористих заповнювачах.

Ряд фахівців, серед них: М.Я. Співак, М.З. Симонов, І.А. Іванов, Л.П. Курасова, неодноразово висловлювали думку, що в будівництві багатоповерхових будівель або виробничих одноповерхових сільськогосподарських граничний клас керамзитобетону не повинен перевищувати 15 [38-40]. При виконанні цієї умови досягається ряд позитивних результатів: економія цементу, вища стабільність модуля пружності бетону в часі, зниження повзучості; підвищення надійності бетонних конструкцій в умовах експлуатації.

Застосування легких бетонів як зовнішнього так і внутрішнього шарів багатошарової стінової панелі дозволяє зменшити вагу будівель до 30 % та отримати інші позитивні ефекти. Легкі бетони на пористих заповнювачах [36, 37, 41] є головним матеріалом огорожувальних конструкцій і особливо стінових панелей та блоків. В кліматичних умовах України застосування багатошарових стінових панелей із використанням легкого бетону забезпечує ефективне застосування його властивостей. Легкобетонні стінові конструкції ефективні в умовах сейсмостійкого будівництва або за наявності просадних ґрунтів. Великопористий легкий бетон теплоізоляційного шару даху має позитивну якість – швидку десорбцію в складних умовах її експлуатації.

Використання легкого бетону всередині будівель не менш ефективно [36], а ніж у зовні за рахунок зниження ваги конструкцій та суттєвого зниження витрати сировинних матеріалів. Є позитивний досвід застосування комплексних великопанельних керамзитобетонних міжповерхових перекриттів із високою заводською готовністю. Досягнення в галузі виробництва штучних пористих заповнювачів – керамзиту, гранульованого комірчастого скла та ін. дозволять створити ефективні великопанельні будинки. При цьому ефект від використання легкого бетону зростає із зростанням поверховості.

Розробка технології отримання необхідної структури легких бетонів в залежності від їх призначення, застосування факторів заводської технології для отримання необхідних характеристик конструкцій – основні досягнення

науки у сфері легких бетонів.

Таким чином, враховуючи специфічні особливості легких бетонів (невисока щільність та хороші теплоізоляційні властивості), панелі стін та покриттів з них найбільш доцільно застосовувати в опалюваних житлових та промислових будівлях. При цьому стінові панелі з конструкційно-теплоізоляційних бетонів виконують одночасно несучі та теплоізоляційні функції, не вимагаючи для виготовлення та монтажу складного обладнання та великої кількості робітників. Застосування легких бетонів для стінових панелей будівель та споруд дозволить знизити вагу елементів порівняно із залізобетонними та за рахунок цього скоротити транспортно-монтажні витрати.

1.4 Класифікація стінових панелей

У зв'язку з розвитком нових технологій будівництва швидкокомтованих житлових та виробничих будівель традиційні матеріали не забезпечують необхідного рівня термічного опору в одношаровій стіні. Внаслідок цього необхідна додаткова теплоізоляція огорожувальних конструкцій за допомогою багатошарових огорожуючих конструкцій, які містять ефективний теплоізоляційний матеріал [14].

Стінові панелі поділяються за такими ознаками:

- за місцем розташування – внутрішні та зовнішні;
- за матеріалами – з пористих бетонів, керамзитобетону та інших матеріалів;
- за характером статичної роботи – несучі, самонесучі, навісні;
- по конструктивному устрою – одношарові, двошарові, тришарові, багатошарові.

В сучасному великопанельному домобудуванні поширення набули

тришарові стінові панелі для житлових та громадських будівель з ефективним утеплювачем.

В житловому будівництві найбільш поширені несучі та самонесучі панелі. За конструктивним рішенням найбільш поширені такі види панелей:

- одношарові з легких або пористих бетонів з армуванням (рис. 1.2 а);
- двошарові, із зовнішнього шару з легких бетонів та внутрішнього несучого – із важкого бетону;
- тришарові, із двох зовнішніх (зовнішнього та внутрішнього) шарів з важкого бетону та внутрішнього шару із теплоізоляційного матеріалу (рис. 1.2, б);
- багатошарові, що виготовляються з декількох шарів різних матеріалів.

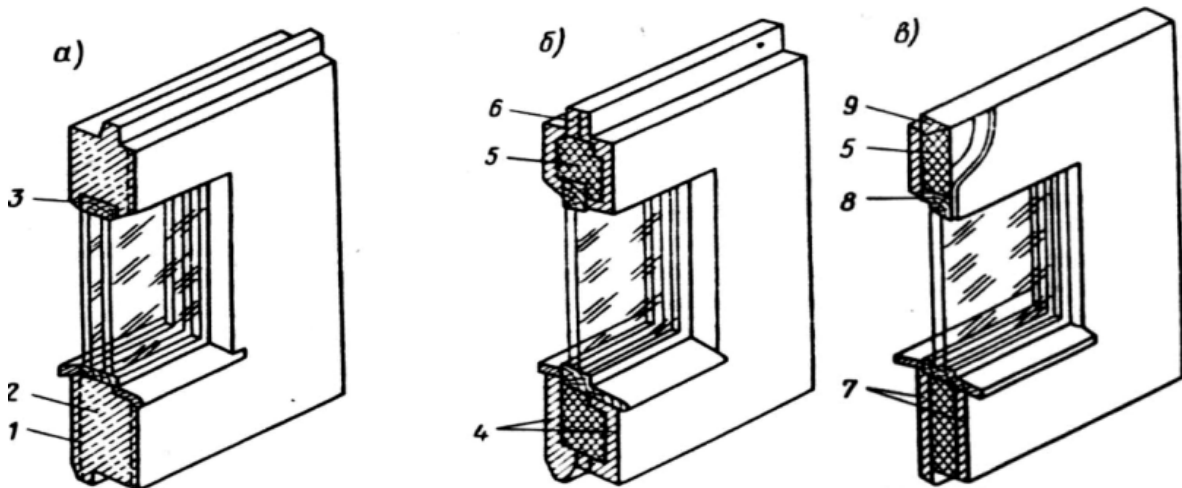


Рисунок 1.2 – Конструктивний пристрій панелей

а – одношарові; б - тришарові; в – багатошарові;

1 - фактурний оздоблювальний шар; 2 – легкий або пористий бетон; 3 – арматурний каркас; 4 – залізобетон; 5 – утеплювач; 6 – керамзитобетонне ребро; 7 – азбестоцементні листи; 8 – пароізоляція; 9 – азбестоцементні бруски

Загальний вигляд зовнішніх стінових панелей, їх класифікація, конструктивні рішення та основні елементи наведено рисунку 1.3. Товщина зовнішніх стінових панелей визначається розрахунками.

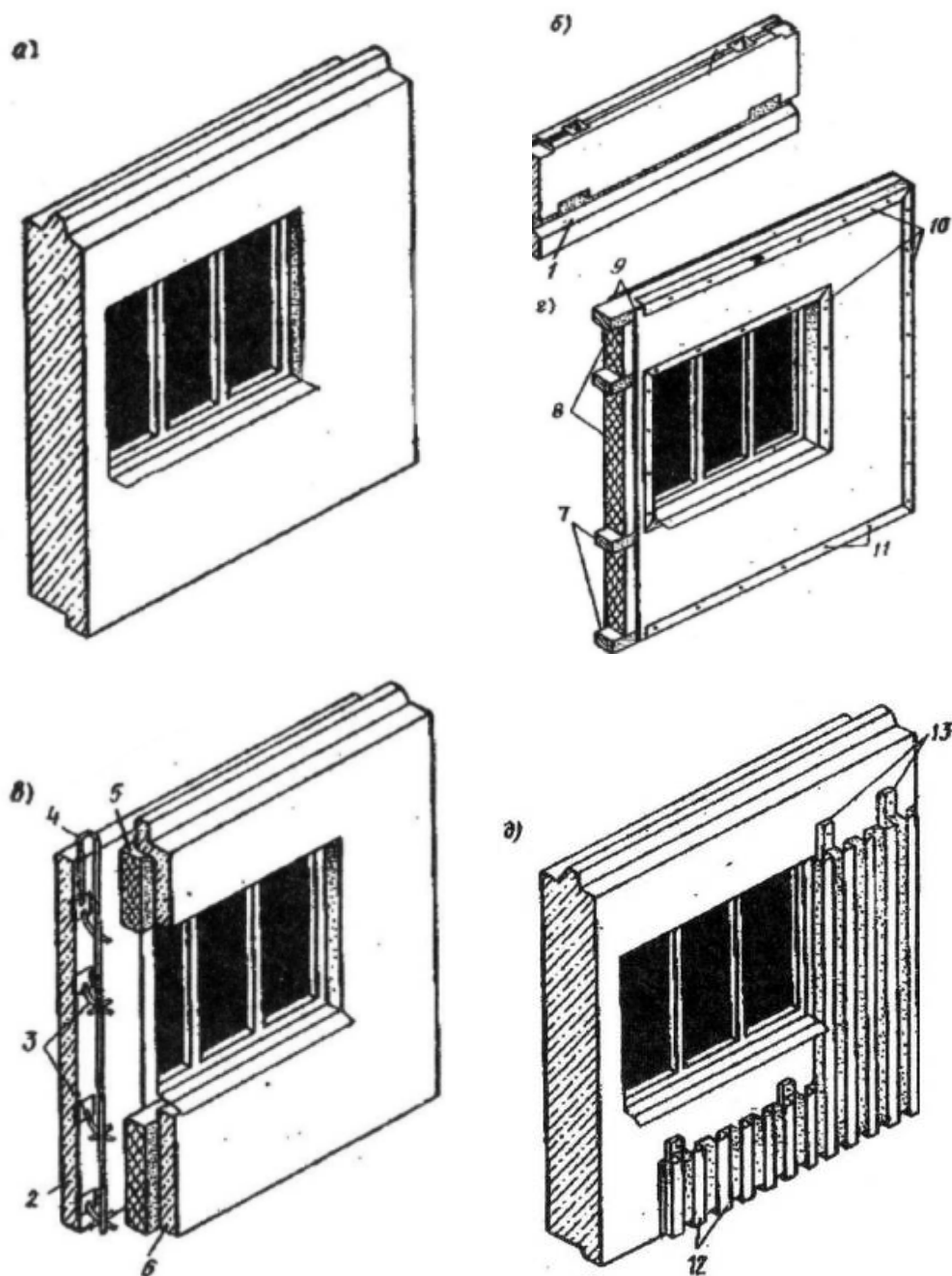


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд панелей зовнішніх стін

а – одношарова; б – те саме, поясна; в – тришарова; г – шарувата; д – те саме, з екраном з профільованого листа; 1 – паз для плит міжповерхового перекриття; 2 – внутрішній несучий залізобетонний шар; 3 – гнучкі зв'язки; 4 – монтажна петля; 5 – утеплювач; 6 – зовнішній декоративний оздоблювальний шар; 7 – дерев'яний каркас; 8 – утеплювач; 9 – азбестоцементні листи; 10 – алюмінієві профілі; 11 – шурупи; 12 – сталевий профільований лист; 13 – дерев'яні рейки

Зовнішні панелі виготовляють із декоративно обробленими фасадами, Обробка проводиться за допомогою наступних методів: забарвлення кремнійорганічною емаллю, яка створює волого-, морозо- та світлостійке покриття; оздоблення кам'яною крихтою; оздоблення керамічною плиткою і т.д. Заводський метод виготовлення передбачає закладку віконних та дверних отворів. Внутрішня поверхня панелей готується для внутрішнього оздоблення фарбою або шпалерами.

Тришарові панелі класифікують за такими ознаками: призначення; конструктивне рішення; статична схема роботи; тип сполучних зв'язків.

За призначенням панелі поділяються на: цоколя; стін надземних поверхів; горища. Конструктивні рішення панелей визначаються прийнятими під час проектування параметрами, що відбивають архітектурні, технологічні та конструктивні особливості панелей. За статичною схемою роботи панелі діляться на ненесучі та несучі (поверхово несучі та самонесучі). За типом сполучних зв'язків панелі поділяються на: з гнучкими зв'язками з корозійностійкого матеріалу; з жорсткими залізобетонними зв'язками (перемичками чи ребрами).

Довжину та висоту панелі вказують у дециметрах (округляючи до цілого числа), а товщину – у сантиметрах. В другій групі вказують, за необхідності, вид бетону та позначення конструктивних особливостей панелі. Приклад умовного позначення (марки) тришарова зовнішня цокольна панель ненесуча гнучкими зв'язками завдовжки 4000 мм, заввишки 3300 мм та завтовшки 400 мм з важкого бетону.

Номінальну товщину зовнішнього та внутрішнього бетонних шарів панелі слід встановлювати статичним розрахунком з урахуванням заданої несучої здатності, жорсткості та тріщиностійкості панелей, перемичок (шпонок), вимог до вузлів сполучення панелей між собою та іншими конструкціями будівлі; до вузлів закріплення в панелях вікон та дверей. З урахуванням зазначених факторів номінальні товщини бетонних шарів слід приймати не менше: внутрішнього шару несучих панелей – 80 мм;

внутрішнього шару несучих панелей – 120 мм; внутрішнього шару поверхових несучих панелей – 80 мм при важкому бетоні та 100 мм – при легкому бетоні; зовнішнього шару панелей – 65 мм при важкому бетоні та 80 мм - при легкому бетоні [14-16]. Перераховані вище номінальні товщини шарів включають номінальну товщину бетону або захисно-декоративного розчину та внутрішнього оздоблювального шарів.

Оздоблення зовнішніх (фасадних) поверхонь багат шарових панелей з легкого та важкого бетону приймають наступних типів: облицювання плитками, скляними, із природного каменю або декоративного бетону; обробка шаром розчину або бетону з рельєфною або рівною гладкою поверхнею; оздоблення декоративним бетоном з оголеним заповнювачем; оздоблення керамічною глазур'ю; обробка шаром кольорового бетону чи розчину; присипання або втоплювання декоративного щебеню або іншого декоративного матеріалу; обробка дрібнозернистими матеріалами на основі клею; фарбування атмосферостійкими фарбами.

Номінальну товщину шару розчину або бетону в зовнішньому захисно-декоративному шарі одно шарових панелей з легкого бетону та шаруватих панелей з зовнішнім шаром з легкого бетону або важкого бетону за відсутності облицювання слід приймати не менше: 15 мм – у суцільних три шарових панелях; 20 мм – в одно шарових панелях (крім панелей для цокольного поверху та технічного підпілля) та в суцільних дво шарових панелях із зовнішнім теплоізоляційним шаром з легкого бетону щільної структури; 30 мм – в одно шарових панелях для цокольного поверху та технічного підпілля та в суцільних дво шарових панелях із зовнішнім теплоізоляційним шаром з легкого бетону крупнопористої структури.

Враховуючи зазначені особливості, розглянемо основні напрямки досліджень та розробок в галузі синтезу багат шарових будівельних панелей з урахуванням сучасних матеріалів.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Характеристика сировинних матеріалів

Матеріали, які застосовуються для отримання багат шарових будівельних панелей, повинні відповідати вимогам державних стандартів або технічних умов, чинної нормативної документації:

- склобій – ГОСТ Р 52022-2003 Тара скляна для харчової та парфумерно-косметичної продукції. Марки скла, ДСТУ Б В.2.7-122:2009. Скло листове. Технічні умови;

- вода технічна – ДСТУ Б В. 2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови;

- скло натрієве рідке марка Б – ГОСТ 13078-81 Скло натрієве рідке. Технічні умови;

- гліцерин чистий - ГОСТ 7482-96 Реактиви. Гліцерин. Технічні умови;

- шлаковий відхід – ГОСТ 26644-85 Щебінь та пісок із шлаків теплових електростанцій для бетону. Технічні умови;

- портландцемент ПЦ 500-Д0 – ГОСТ 10178-85 Портландцемент та шлакопортландцемент. Технічні умови;

- пісок кварцовий поліфракційний – ДСТУ Б В.2.7-27-95 Пісок для випробувань цементу. Технічні умови.

2.2 Методики випробувань та фізико-хімічних досліджень

Дослідження з розробки технології піноскла та виробів з нього проводились згідно з нормативною документацією на теплоізоляційні матеріали. Помел сировини здійснювався в барабанному млині. Сировиною були склобій, шлаковий відхід шлакового кар'єру ПАТ «Запоріжсталь», гліцерин, вода, рідке скло. Термічна обробка проводилася у муфельній печі згідно з обраними температурними режимами. Для цього зразки отримували порошковим способом.

Порошковий метод. При нагріванні тонкоподрібненого порошку скла та пороутворювача (шихти) до температури 800...950 °С газу, що формуються при розкладанні пороутворювача, спінюють розм'якшену скломасу. Подальше різке охолодження дозволяє зафіксувати спінену структуру за рахунок різкого твердіння скла. Отриманий матеріал надалі піддається відпалу.

Процес отримання піноскла включає ряд етапів:

- підготовка сировини;
- змішання сировини та отримання шихти;
- температурне оброблення;
- механічна обробка (за потреби).

Для синтезу піноскла застосовують суміш шлакового відходу Шлакового кар'єру ПАТ «Запоріжсталь» та склобою. Перед помелом скло та шлак дроблять до розміру частинок 1...2 мм. Шихту складають шляхом ретельного змішування всіх сировинних компонентів до однорідної маси [25]. Оптимальний розмір зерен порошку скла та шлакового відходу менше ніж 160 мкм. Найкраще перемішування досягається змішуванням усіх сировинних матеріалів в млині.

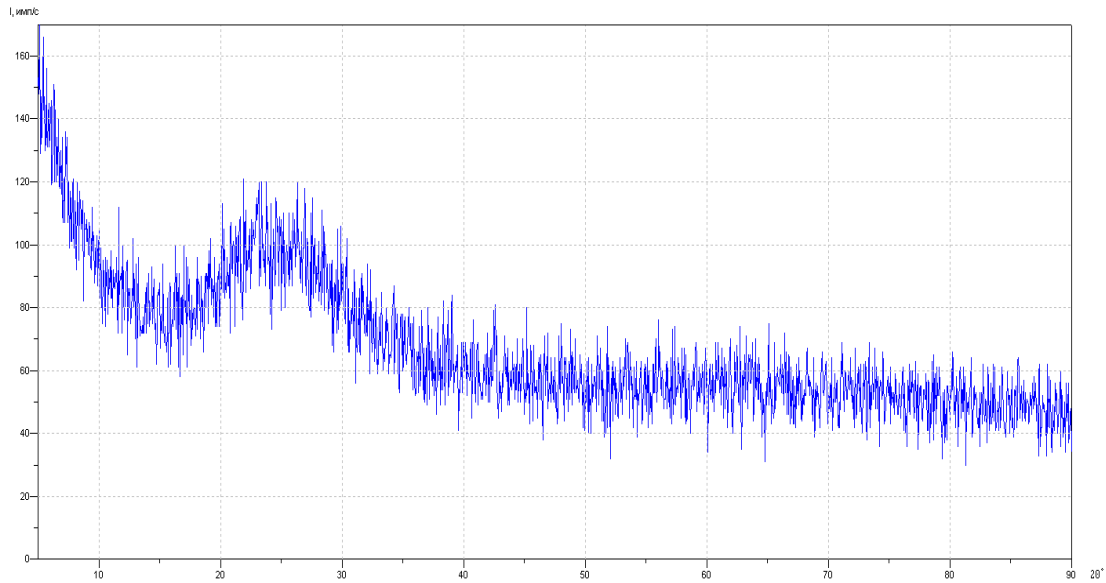
Отриману суміш завантажують у форми та ущільнюють при постійному тиску, після чого зразки вилучають та поміщають у зону

термічної обробки в піч. Там зразки встановлюють у зоні постійних температур. Температурну обробку проводять згідно з температурно-часовим режимом.

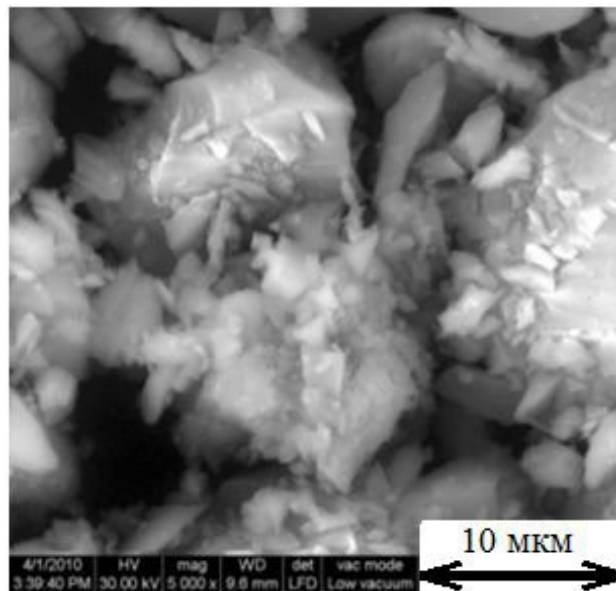
Температура випалу може варіюватися в межах 775-900 °С, час – 5...50 хв. Після стадії спінювання йде різке охолодження фіксації пористої структури. Далі передбачена стадія зняття залишкової напруги та відпалу, що відбувається при мимовільному охолодженні печі протягом 4...5 год. Після виймання зразків проводять їх опилювання для надання правильних розмірів, огляд зразків для встановлення однорідності структури та ін.

Можливість застосування шлакового відходу ПАТ «Запоріжсталь» пояснюється тим, що шлак за складом та структурою є силікатним склом, що видно з рисунка 2.3. Склоподібна структура шлаку обумовлена особливостями одержання шлаку: при згорянні вугілля негорюча мінеральна частина у вигляді розплаву стікає під камеру згорання, де різко охолоджується з утворенням склоподібного матеріалу. Крім того, за фракційним складом шлак представлений частинками гострокутної форми, що сприяє підвищенню реакційної здатності. За результатами спектрометричних досліджень ефективна питома активність природних радіонуклідів Ra-226, Th-232. К-10 у шлаковому відході становить 230 ± 28 Бк/кг, що не перевищує 370 Бк/кг. Досліджувана продукція відноситься до 1-го класу будівельних матеріалів та може бути використана для всіх видів будівництва, у тому числі в житлових та громадських будівлях.

Виробництво легкого бетону та багатошарових будівельних панелей здійснювалося згідно з технологією, що включає такі стадії: підготовка форм (очищення, змащення та складання); укладання арматури та утеплювача; укладання, розподіл та ущільнення бетонної суміші; тепловологісна обробка; обробка лицьової поверхні; вилучення виробів.



Рентгенограма



Мікроструктура

Рисунок 2.1 – Фазовий та фракційний склад шлакового відходу
ПАТ «Запоріжсталь»

Фізико-механічні властивості зразків визначали відповідно до стандартних та спеціальних методик [16-19].

1) Для піноскляних гранул:

- згідно з ГОСТ 9758-2012: зерновий склад; насипна щільність; вологість; водопоглинання; вміст розколотих зерен; міцність при стисканні в циліндрі; морозостійкість; втрата маси щодо стійкості проти силікатного

розпаду; втрата маси при кип'ятінні; вміст водорозчинних сірчастих та сірчаноокислих сполук; втрата маси при прожарюванні; теплопровідність;

- за ГОСТ 30108-94 значення сумарної питомої ефективної активності природних радіонуклідів;

2) Для плит з піноскла:

- за ГОСТ EN 822-2011 та ГОСТ EN 823-2011 розмір плит;

- за ГОСТ EN 1602-2011 щільність;

- за ГОСТ 826-2011 межа міцності при стисканні,

- за ГОСТ EN 12089-2011 межа міцності при згинанні;

- за ГОСТ 25380-2014 коефіцієнт теплопровідності;

- згідно з ГОСТ EN 12087-2011 водопоглинання за обсягом;

- за ГОСТ EN 12086-2011 паропроникність;

- за ГОСТ EN 12091-2011 морозостійкість;

- за ГОСТ 30244-94 група горючості;

- за ГОСТ 30108-94 значення сумарної питомої ефективної активності природних радіонуклідів.

3) Для легкого бетону:

- за ГОСТ 10180-2012 міцність на стиск;

- за ГОСТ 12730.1-78 середня густина;

- за ГОСТ 7076-99 коефіцієнт теплопровідності;

4) Для багат шарових будівельних панелей:

- за ГОСТ 7076-99 коефіцієнт теплопровідності.

3 РОЗРОБКА СКЛАДІВ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ ПІНОСКЛА

3.1 Вибір оптимального співвідношення компонентів пороутворювальної суміші синтезу піноскла

Для вибору оптимального співвідношення пороутворювальних добавок в суміші «рідке скло – гліцерин» (надалі – «пороутворююча суміш») за основу було взято склад, мас. %: склобій БТ-1 - 90; пороутворююча суміш - 10. Були розроблені склади мас, у яких варіювалася кількість пороутворюючих компонентів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Шихтові склади піноскла з різним співвідношенням компонентів пороутворюючої суміші

	Зміст компонентів, мас. %, в складі №								
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
Склобій БТ-1	90								
Рідке скло	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Гліцерин	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Відформовані зразки кожного складу випалювали при температурах спінювання 800, 825, 850 °С та часу спінювання 10 хвилин.

Далі було визначено щільність і пористість, а також досліджено структуру синтезованих зразків. Результати представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Щільність досліджуваних складів піноскла залежно від температури спінювання

Параметр	Співвідношення «рідке скло: гліцерин», мас. % (№ складу)								
	9:1 (1.1)	8:2 (1.2)	7:3 (1.3)	6:4 (1.4)	5:5 (1.5)	4:6 (1.6)	3:7 (1.7)	2:8 (1.8)	1:9 (1.9)
Температура спінювання 800 °С									
Щільність, кг/м ³	198,92	251,49	245,85	227,19	261,14	326,64	335,98	393,94	526,4
Пористість, %	91,88	89,74	89,97	90,73	89,34	86,67	86,29	83,92	78,51
Температура спінювання 825 °С									
Щільність, кг/м ³	195,59	233,94	206,28	196,54	204,75	231,13	222,56	286,71	338,73
Пористість, %	92,02	90,45	91,58	91,98	91,64	90,57	90,92	88,30	86,17
Температура спінювання 850 °С									
Щільність, кг/м ³	208,33	180,84	174,8	146,71	149,21	185,39	188,2	196,57	280,13
Пористість, %	91,50	92,62	92,87	94,01	93,91	92,43	92,32	91,98	88,57

Слід зазначити, що параметр загальної пористості безпосередньо пов'язаний із величиною густини, що видно з таблиці 3.2. Однак, як видно з таблиці 3.2, розмір та розподіл пір при близьких показниках щільності та пористості можуть істотно відрізнятися. Внаслідок цього, а також враховуючи, що всі службові властивості піноскла (пористість, міцність, теплопровідність, водопоглинання) визначаються його внутрішньою структурою, товщиною перемичок та розміром пір, далі для опису зразків застосовувалися дві характеристики: щільність та характер пористої структури [21-23].

При цьому очевидна наступна закономірність: з усуненням співвідношення «рідке скло: гліцерин» в бік гліцерину спостерігається, по-перше, зменшення рівномірності пористої структури за рахунок утворення великих дефектних пір, і, по-друге, зміна кольору матеріалу з рівномірно темного на світлі з темними порами. Для пояснення цих ефектів необхідно розглянути роль кожного компонента шихти в процесі спінювання. Так,

склопорошок є основою майбутнього матеріалу. При температурі спінювання скло знаходиться у високов'язкому стані, і процес взаємодії між окремими частинками склопорошку протікає з утворенням силікатного каркасу, який відповідає за характеристики міцності матеріалу. Гліцерин виступає в ролі власне пороутворювача, при розкладанні якого в окислювальній атмосфері електричної печі утворюється спектр сполук від вуглекислотного газу до чистого вуглецю, що створює надлишковий тиск і дає можливість спінювання за трьома напрямками, а також обумовлює чорне забарвлення піноскла частинками вуглецю.

Щоб уникнути передчасного вигорання вуглецю до складу шихти необхідно вводити матеріал, що обволікає - натрієве рідке скло. Роль цього компоненту – забезпечити збереження вуглецевмісної речовини навколо кожної частки скла до певного температурного інтервалу. Цим пояснюється зміна кольору зразків, так як при малій кількості рідкого скла підвищується інтенсивність розкладання гліцерину, а продукти розкладання залишаються у матеріалі лише у невеликих областях, де формуються пори. Крім того, за рахунок близькості хімічного складу рідке скло сприяє більш повному контакту між частинками склопорошку та прискорює утворення силікатного каркасу.

Виходячи з отриманих даних, можна зробити висновки про вплив компонентів пороутворювальної суміші на спінювання зразків. Оптимальним складом пороутворюючої суміші був обраний склад 1.4 із співвідношенням «рідке скло : гліцерин» = 6 : 4.

Рідке скло та гліцерин є в'язкими рідинами, що ускладнює технологічні операції гомогенізації шихти. Для зниження в'язкості були розроблені склади шихт, де пороутворююча суміш складу 1.4 була частково замінена водою (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Шихтові склади піноскла з різним співвідношенням пороутворювальної суміші та води

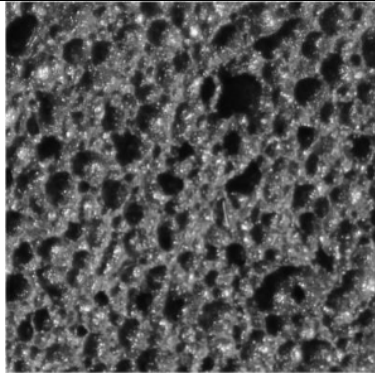
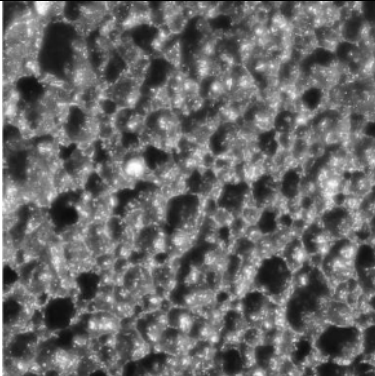
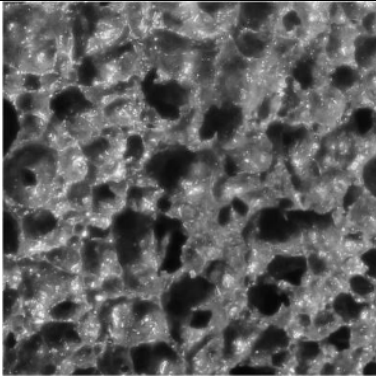
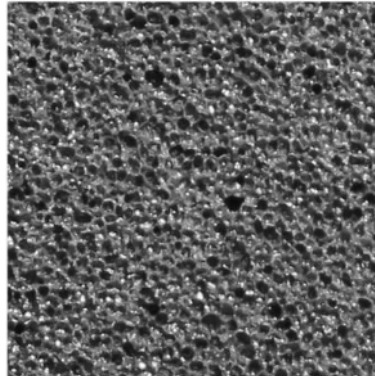
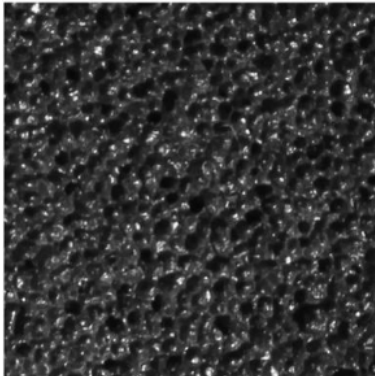
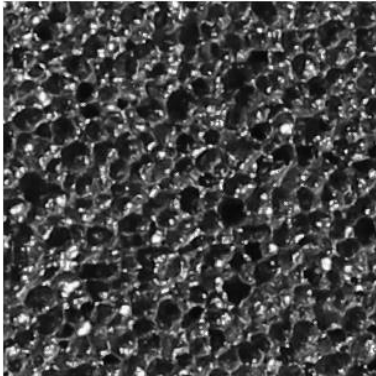
	Вміст компонентів піноскла, мас. %, у складі №				
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Склобій БТ-1	90				
Пороутворююча суміш складу 1.4	9	7	5	3	1
Вода	1	3	5	7	9

Відформовані зразки обпалювали при температурах стадії 2 (спінювання) 800, 825, 850°C і часу спінювання 10 хвилин. Внутрішня структура та щільність отриманих зразків представлена у таблицях 3.4-3.5.

Таблиця 3.4 – Щільність досліджуваних складів піноскла залежно від температури спінювання

Параметр	Співвідношення «гороутворююча суміш: вода», мас. % (№ складу)				
	9:1 (2.1)	7:3 (2.2)	5:5 (2.3)	3:7 (2.4)	1:9 (2.5)
Температура спінювання 800 °C					
Щільність, кг/м ³	217,91	230,72	316,77	321,76	634,43
Температура спінювання 825 °C					
Щільність, кг/м ³	181,27	175,81	213,86	229,15	371,59
Температура спінювання 850 °C					
Щільність, кг/м ³	149,60	149,89	185,81	187,58	330,34

Таблиця 3.5 - Залежність структури піноскла від наявності води в пороутворюючій суміші

	800 °C	825 °C	850 °C
Склад 1.4			
Склад 2.2			

З таблиці 3.4 видно, що введення навіть невеликої кількості води в пороутворюючу суміш призводить до значного збільшення однорідності пористої структури (табл. 3.5). Це пов'язано з двома чинниками. По-перше, введення води призводить до зменшення в'язкості суміші та її кращого розподілу в шихті [24]. По-друге, при температурі близько 800 °C надлишок води у присутності вуглецю призводить до утворення так званого водяного газу ($H_2 + CO$), який створює додатковий обсяг газів, які спінюють скло. Побічним продуктом цієї реакції є сірководень, який не тільки виразно відчувається по запаху при порушенні цілісності пір, але також може бути виявлений хімічно. Зміна кольору зразків у серії складів 2.1–2.5 пояснюється зменшенням кількості гліцерину та відповідним зменшенням залишкового вуглецю на поверхні пір. На основі даних, наведених у таблиці 3.4, в якості оптимального обраний склад 2.2, що відповідає співвідношенню «поротворна суміш: вода» = 7:3.


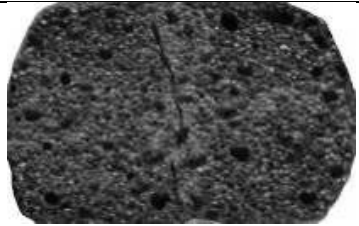
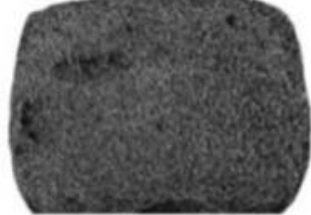
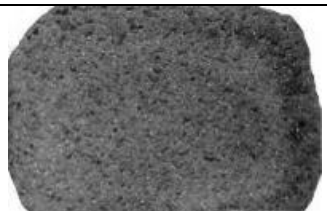
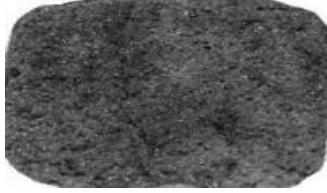
Таким чином, був встановлений оптимальний склад піноскляної шихти, мас. %: склобій БТ-1-90; рідке скло – 4; гліцерин – 3; вода – 3. Температурно-часовий режим синтезу: час спінювання – 10 хвилин, температура спінювання – 825 °С. Використовуючи дані технологічні параметри, можна отримати пористу однорідну структуру з регульованим розміром пір в діапазоні 50...150 мкм.

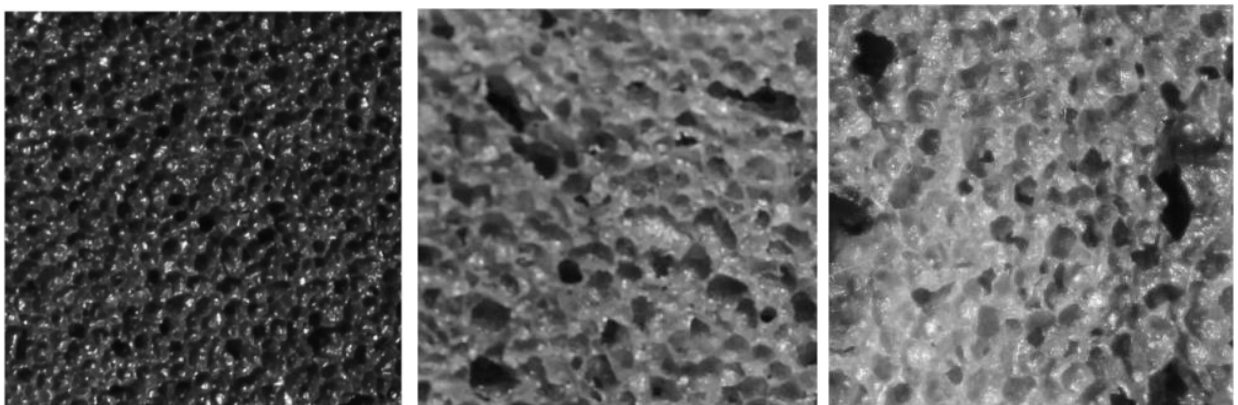
3.2 Вплив температури та часу спінювання на структуру та щільність піноскла

Для вибору оптимального часу спінювання відформовані зразки складу 2.2 обпалювали при температурі спінювання 825 °С та часу спінювання 5, 10, 15, 20, 30 та 60 хвилин. Далі була визначена щільність і досліджена пориста структура синтезованих зразків. Результати представлені у таблиці 3.6 та рисунку 3.1.

Таблиця 3.6 - Залежність щільності піноскла від часу спінювання (початок)

Час спінювання, хвилин	Щільність, кг/м ³	Внутрішня структура зразків
5	187,87	
10	175,81	

15	161,82	
20	166,39	
30	170,65	
40	177,27	
60	181,94	



10 хвилин

30 хвилин

60 хвилин

Рисунок 3.1 – Мікроструктура зразків за різного часу витримки

З таблиці та малюнка видно, що при часі витримки 5 хвилин поряд із великими порами спостерігається дрібнопориста структура, яка забезпечує оптимальних технічних параметрів розроблюваного піноскла. Однак структура зразків, час спінювання яких перевищує 10 хвилин, також не є рівномірною, пори набувають неправильної форми, з'являються дефекти у вигляді одиничних пір, що перевищують розміри стандартних в десятки разів, чим і пояснюється зниження густини [25]. При часі витримки 60 хвилин зразок помітно осідає, що свідчить про те, що газу, які забезпечують обсяг піноскла значно випарувалися зі зразка. Витримка протягом 10 хвилин дозволяє усереднити і стабілізувати середній розмір пір, не призводячи при цьому до зайвого їх укрупнення, тому тривалість спінювання 10 хвилин є оптимальною.

Для вибору оптимального температурного інтервалу спінювання досліджуваного піноскла зразки складу 2.2 обпалювали при температурах 655; 670; 700; 715; 730; 745; 760; 775; 790; 805; 820; 835; 850; 865; 880 °C без витримки. Далі було визначено щільність при кожній температурі, а також досліджено пористу структуру синтезованих зразків. Результати представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Щільність та структура досліджуваних складів піноскла залежно від температури спінювання

Температура спінювання, °C	650	675	700	715	730
Щільність; кг/м ³	1320,99	1513,29	1521,72	1656,51	1525,4
Температура спінювання, °C	745	760	775	790	805
Щільність; кг/м ³	1093,38	588,10	458,72	352,28	277,89
Температура спінювання, °C	820	835	850	865	880
Щільність; кг/м ³	268,91	192,76	171,52	127,15	121,91

Завантаження зразків у піч відбувається за температури 600 °C. Отже, низькотемпературні процеси, такі як вигорання гліцерину (≈ 260 °C) та

випаровування води (100 °С) починають відбуватися одночасно, крім цього починається спікання шихти. Тому при температурі витримки 650 °С зразок є не повністю спікся в шихту. В температурний проміжок 675...715 °С у зразків спостерігається поступове збільшення щільності, що свідчить про зближення частинок при спіканні. При температурі 730 °С спостерігається невелике зменшення густини, що пояснюється появою перших газових пор у структурі матеріалу. Цю температуру можна вважати температурою початку спінювання.

При подальшому нагріванні зразка від 730 до 790 °С відбувається різке зменшення щільності за рахунок збільшення кількості газових пор, проте активне пороутворення починається за температур вище 800 °С. Це пояснюється тим, що при температурі 800 °С скломаса досягає в'язкості, достатньої для того, щоб тиск газу та пари, що утворилися при вигорянні гліцерину та випаровуванні води утворило пору. При температурах вище 850°С структура зразка стає менш упорядкованою. Пори деформуються, з'являються укрупнені пори, зразок стає крихким. Все це негативно позначається на експлуатаційно-технічних властивостях розроблюваного піноскла. Тому оптимальним температурним інтервалом для утворення пористої структури розроблюваного матеріалу, був обраний інтервал 800...850 °С.

3.3 Вплив фракційного складу на структуру піноскла

Для вивчення впливу фракційного складу шихти на структуру та щільність розроблюваного піноскла складу 2.2 склобій був розмолотий і за допомогою сит розділений по дисперсності від більшої фракції до дрібнішої за допомогою сит згідно з ГОСТ Р 51568-99. Відформовані зразки кожного

складу випалювали при температурі спінювання 825 °С і часу спінювання 10 хвилин. Далі були досліджені щільність та пориста структура синтезованих зразків. Результати представлені у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Залежність структури та властивостей піноскла від фракційного складу

№ складу	Розмір частинок, мм	Щільність; кг/м ³
3.1	0,71...0,90	506,91
3.2	0,50...0,71	487,70
3.3	0,32...0,50	435,97
3.4	0,16...0,32	344,31
3.5	0,10...0,16	176,15
3.6	менше 0,1	178,28

З таблиці 3.8 видно, що із зменшенням фракційного складу шихти значно зменшується щільність та збільшується обсяг піноскла. На це впливає кілька факторів:

- тонкодисперсну шихту легше гомогенізувати, отже, збільшити кількість точок зародження газових пор;

- чим менше частка, тим легше вона нагрівається, тому тоді, як грубодисперсний зразок тільки нагрівається, тонкодисперсний вже переходить на стадію спінювання і, отже, при однаковому часі витримки досягає більших обсягів та меншої щільності.

На основі даних, наведених у таблиці 3.8, як оптимальний обраний фракційний склад 3.5. Використовуючи цей фракційний склад, можна знизити температуру спінювання піноскла і отримати рівномірно розподілені пори.

3.4 Вплив виду склобою на структуру та властивості піноскла

Для розширення сировинної бази для виробництва піноскла, а також з метою утилізації несортових скловідходів було досліджено можливість застосування різних видів склобою. Для дослідження були обрані

Найпоширеніші види бою: бій зеленого тарного скла марки ЗТ-1, бій листового скла М4, бій безбарвного тарного скла марки БТ-1. З використанням цих видів склобою було розроблено склади шихт, подані у таблиці 3.9. В якості потворної суміші був використаний оптимальний склад.

Таблиця 3.9 - Склади шихт на основі різних видів скла

Компонент	Зміст компонентів, мас. %					
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Бій тарного скла БТ-1	90	0	0	45	0	45
Бій листового скла М4	0	90	0	0	45	45
Бій тарного скла ЗТ-1	0	0	90	45	45	0

Далі відформовані зразки випалювали при температурах спінювання 800, 825, 850 °С і часу спінювання 10 хвилин. Потім було визначено щільність, і навіть досліджено пористу структуру синтезованих зразків. Результати представлені у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Внутрішня структура та щільність піноскла, отриманих на основі різних видів скла

Параметр	№ складу					
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Температура спінювання 800 °С						
Щільність, кг/м ³	230,72	283,04	410,79	299,88	328,36	243,34
Температура спінювання 825 °С						
Щільність, кг/м ³	175,81	208,08	302,69	264,59	252,10	202,37
Температура спінювання 850 °С						
Щільність, кг/м ³	149,89	150,80	284,89	182,86	203,02	155,69

З таблиці видно, що найменшими показниками щільності має склад 4.1 на основі склобою БТ-1 (230...150 кг/м³), а найбільшими – склад 4.3 на основі склобою ЗТ-1 (410...300 кг/м³). Склад 4.2 на основі склобою М4 наближений за показниками до складу 4.1 на основі склобою БТ-1 (280...150 кг/м³). При введенні до складу на основі скла БТ-1 та М4 склобою ЗТ-1 спостерігається значне збільшення густини. Для складу 4.4 збільшення складає 70...30 кг/м³ залежно від температури спінювання; для складу 4.5: ≈ 50 кг/м³. Склад 4.6 на основі суміші скла БТ-1 і М4 має середню щільність між показниками складів 4.1 та 4.2.

Оптимальним для використання як теплоізоляційний матеріал є піноскло з високопористою структурою і невеликою щільністю. Під ці параметри підходять склади 4.1, 4.2 та 4.6. Склади 4.3, 4.4, 4.5 можуть використовуватися у випадках, коли необхідна підвищена щільність та міцність піноскла. Враховуючи незначні відмінності у властивостях складів 4.1, 4.2 та 4.6, надалі використовувався склад 4.6 на основі суміші скла БТ-1 та М4.

Слід також відзначити, що на практиці можливе застосування і суміші несортового склобою, проте спінювання при цьому потрібно буде проводити при температурах, на 25...30 °С вище, ніж для встановленого оптимального складу. Це підвищення дозволить гарантувати в'язкість скломаси, необхідну для одержання якісної структури.

3.5 Вплив шлакових відходів ТЕС на структуру та властивості піноскла

З метою заміни склобою на менш дефіцитну сировину було досліджено можливість застосування шлакових відходів ТЕС. Розробка складів здійснювалася за допомогою заміщення склобою в оптимальному складі піноскла шлаковим відходом в кількості від 5 до 30 мас.%. Спікання

здійснювалося порошковим способом при температурах спінювання 800, 825, 850 °С з витримкою 10 хвилин [26-32]. Результати представлені у таблицях 3.11...3.12 та на рисунку 3.2.

Таблиця 3.11 – Структура і щільність піноскла залежно від кількості шлакового відходу ТЕС, що вводиться.

Параметр	№ складу					
	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
Кількість шлакового відходу, мас. %	5	10	15	20	25	30
Температура спінювання 800 °С						
Щільність, кг/м ³	273,19	293,63	317,45	312,55	311,89	507,75
Температура спінювання 825 °С						
Щільність, кг/м ³	246,97	261,65	271,33	272,25	285,65	463,89
Температура спінювання 850 °С						
Щільність, кг/м ³	200,67	204,74	209,49	229,12	225,04	439,76

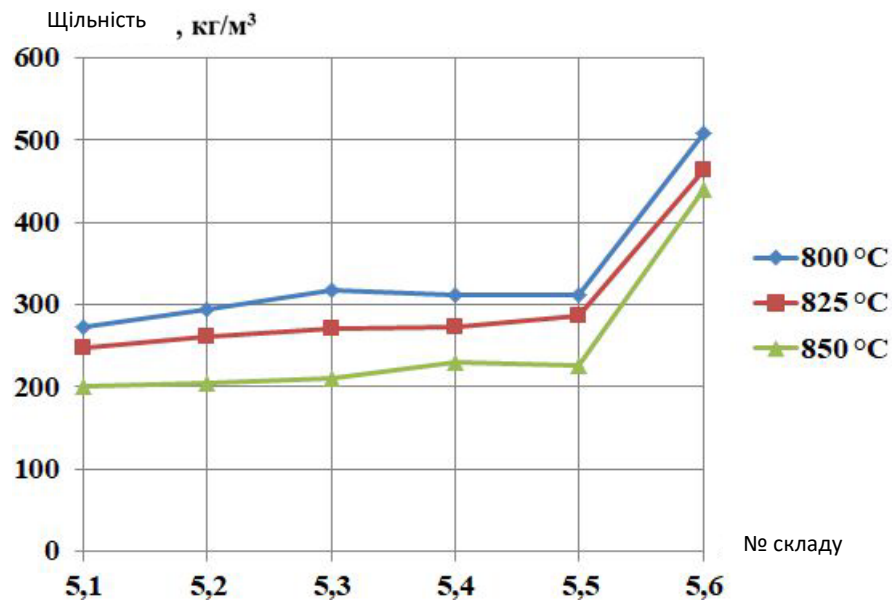
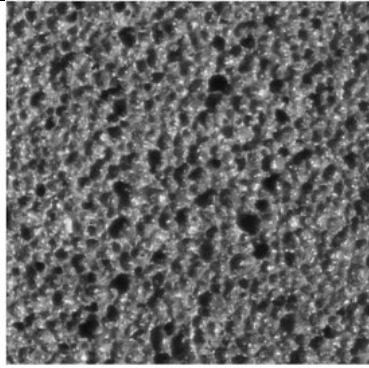
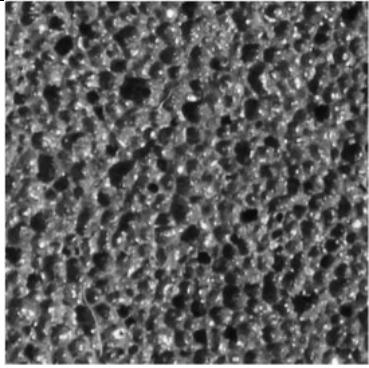
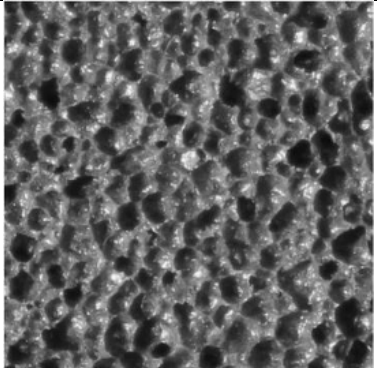
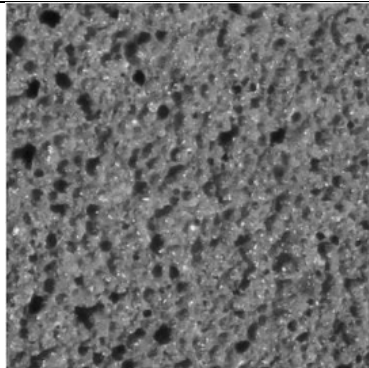
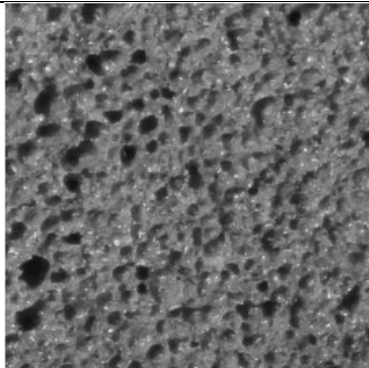
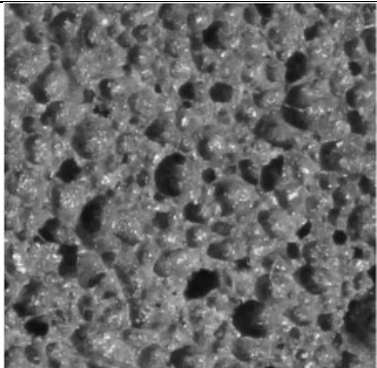
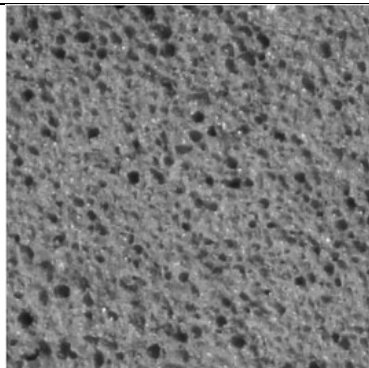
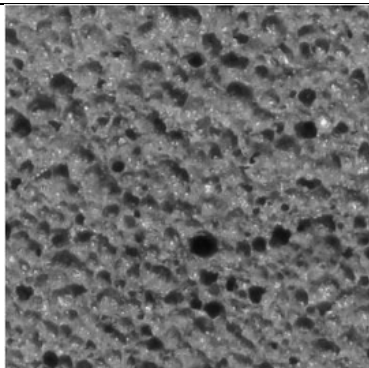
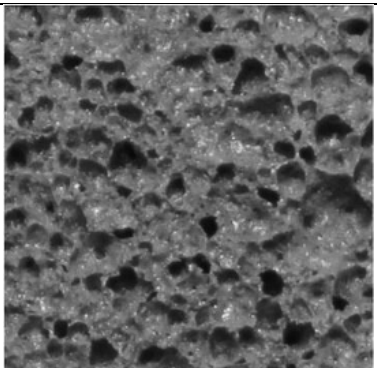


Рисунок 3.2 – Залежність щільності піноскла від вмісту шлакового відходу ТЕС

Таблиця 3.12 – Внутрішня структура піноскла зі шлаковим відходом ТЕС

	800 °С	825 °С	850 °С
Склад 5.1			
Склад 5.3			
Склад 5.5			

Дослідження отриманих зразків показало наступне:

- із введенням до 20 мас. % шлакового відходу спостерігається закономірне збільшення щільності випробуваних зразків (200...300 кг/м³). Однак змін структури та властивостей матеріалу практично не спостерігається. Рівномірна пориста структура утворюється навіть за мінімальної температури синтезу (800 °С). Підвищення температури синтезу веде до подальшого зниження густини;

- з підвищенням у складі шихти вмісту шлаку до 25 мас. %

спостерігається невелике зниження рівномірності пористої структури за рахунок збільшення тугоплавкості суміші, проте також відзначається зменшення густини одержуваного матеріалу (230...310 кг/м³), що робить склад із вмістом шлаку 25 мас. % найбільш перспективним;

- у складів із вмістом шлакового відходу 30 мас. % спостерігається різке збільшення щільності та зниження рівномірності пористої структури. Щільність одержаних зразків перевищує 400 кг/м³ тому цей склад не може бути використаний для отримання теплоізоляційного піноскла;

Таким чином, враховуючи необхідність залучення у виробництво найбільшої кількості шлакового відходу, серед усіх складів оптимальним було обрано склад 5.5, що містить 25 мас. % шлакового відходу ТЕС, що утворює при температурі 825 °С відносно рівномірну пористу структуру щільністю 285 кг/м³.

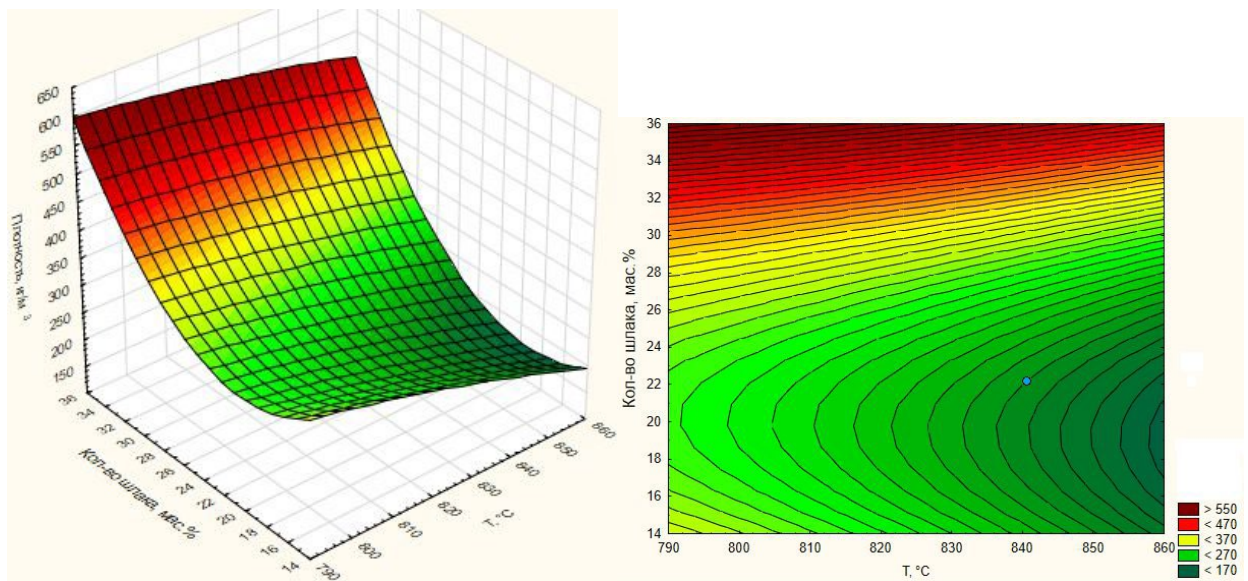


Рисунок 3.3 – Залежність зміни густини від вмісту шлакових відходів і температури спінювання при 10 хвилин спінювання

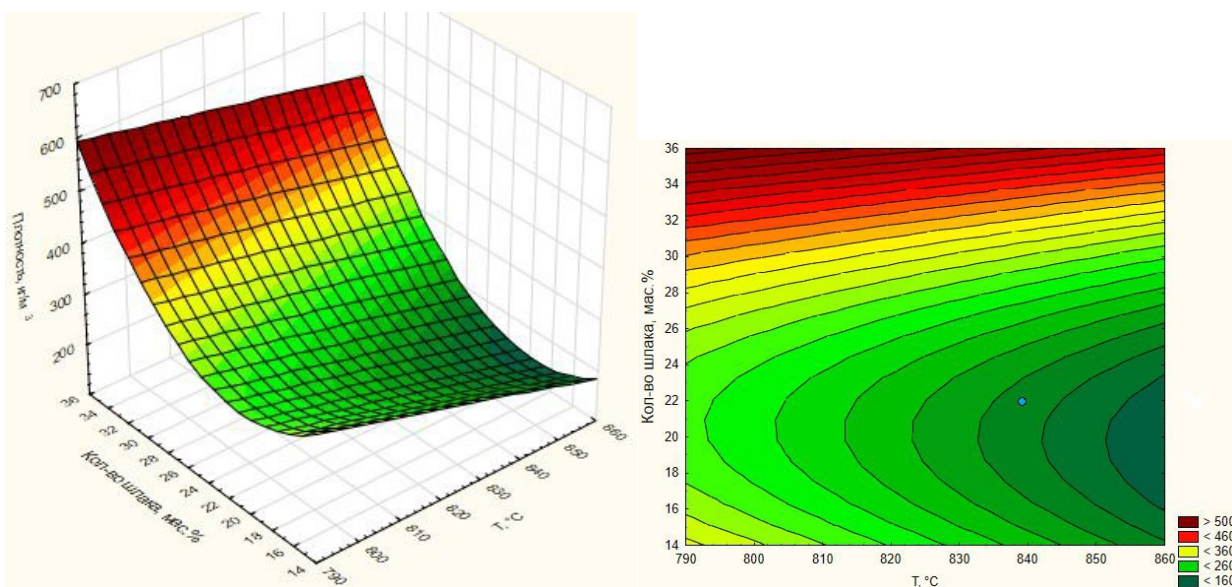


Рисунок 3.4 – Залежність зміни щільності від вмісту шлакових відходів і температури спінювання при 20 хвилин спінювання

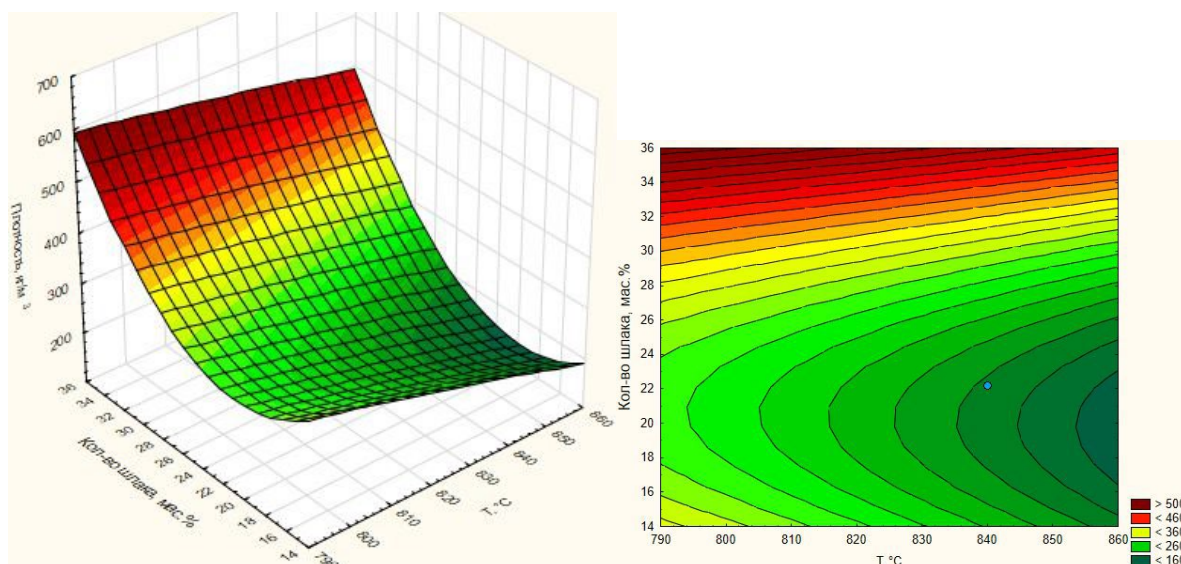


Рисунок 3.5 – Залежність зміни щільності від вмісту шлакових відходів і температури спінювання при 30 хвилин спінювання

Виходячи з малюнків 3.3-3.5 було встановлено, що можлива наступна модернізація складу 5.5 мас. %: шлаковий відхід ТЕС – 22; склобій БТ-1 – 34; склобій М4 - 34; пороутворююча суміш – 10. Отриманий склад виділено на малюнках точкою і має в температурному інтервалі 800...850 °С щільністю 195-220 кг/м³. Оптимальний режим синтезу: температура спінювання 840 °С, час спінювання 10 хвилин. Результати скануючої електронної мікроскопії

зразка оптимального складу представлені малюнку 3.6. За фазовим складом отриманий матеріал є рентгеноаморфною склофазою (рисунок 3.10).

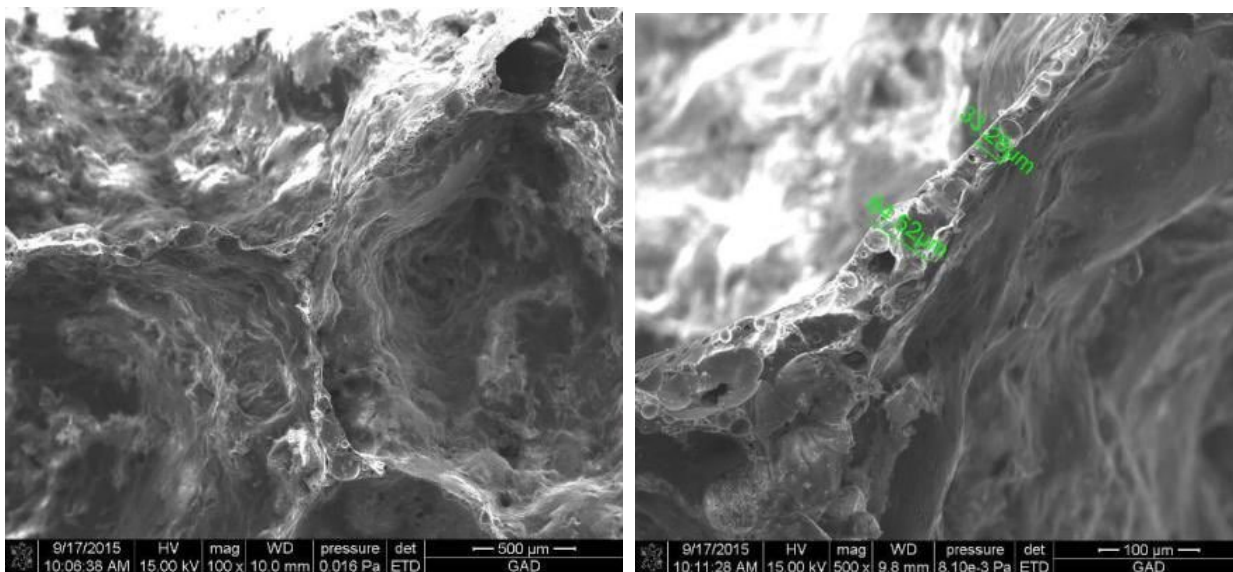


Рисунок 3.6 – Мікроструктура зразків піноскла оптимального складу

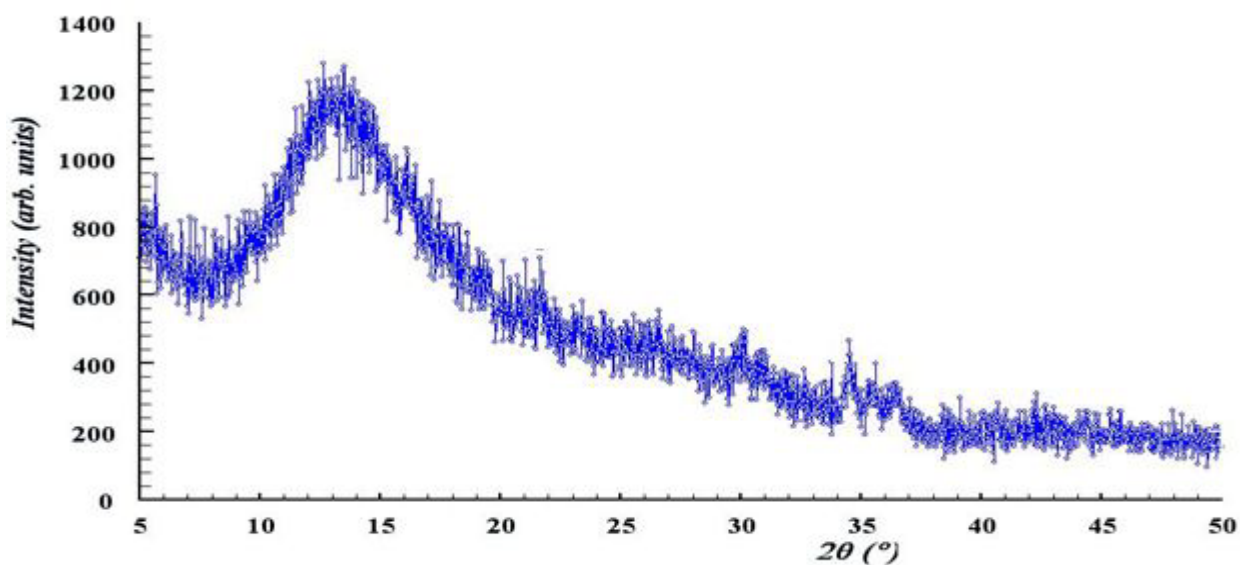


Рисунок 3.7 – Рентгенограма зразків піноскла оптимального складу

Використовуючи дані технологічні параметри, можна отримати пористу однорідну структуру з регульованим розміром пор в діапазоні 300...700 мкм.

4 ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ПІНОСКЛА І АНАЛІЗ СПОСІБ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

4.1 Розробка режимів синтезу виробів із піноскла

На основі розробленого піноскла можна отримувати різні види будівельних матеріалів, такі як гранули, щебінь, блоки, плити, легкі бетони та ін.

4.1.1 Аналіз режиму синтезу плит з піноскла

В процесі синтезу плит були встановлені такі вимоги до їх термічної обробки, пов'язані з значно більшим розміром плит у порівнянні з лабораторними зразками:

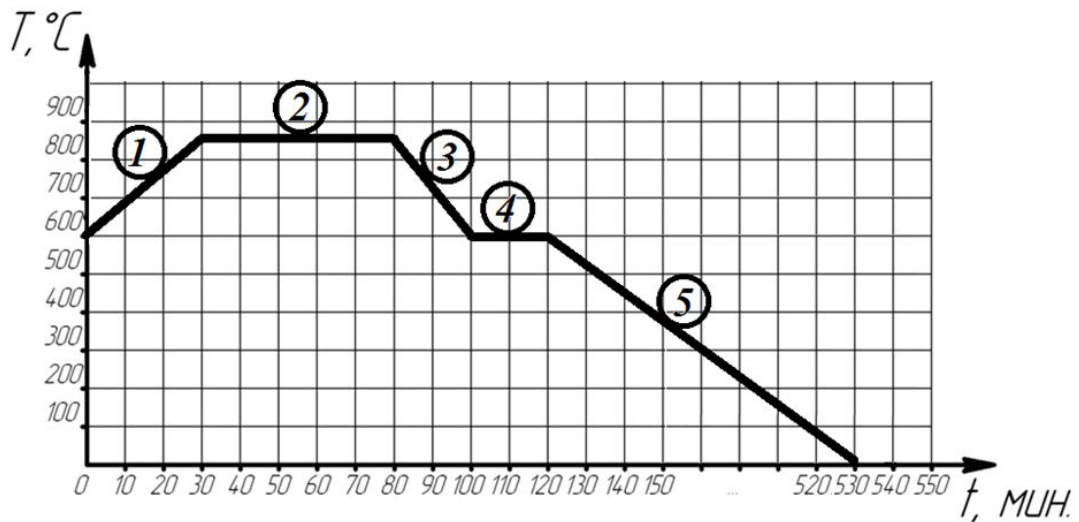
1) необхідність рівномірного доступу гарячого повітря до всіх меж зразка. Це забезпечує, по-перше, рівномірне нагрівання плити з усіх боків, і, по-друге, стабільний доступ кисню, що є окислювачем реакції спінювання піноскла. Внаслідок цього, випал плит проводився в сітчастій модифікованій формі для спінювання.

2) необхідність подовження всіх стадій термообробки. Відмінності від режиму синтезу лабораторних зразків [104] та гранул [105] обумовлені, в першу чергу, більшою товщиною виробу. Отже, для завершення процесу структуроутворення його необхідно витримувати при температурі спінювання тривалий час. Цим же обумовлена і поява стадії 4, що сприяє рівномірному зняттю термічної напруги по всьому об'єму зразка.

При цьому, чим більша товщина виробу, тим довгими мають бути

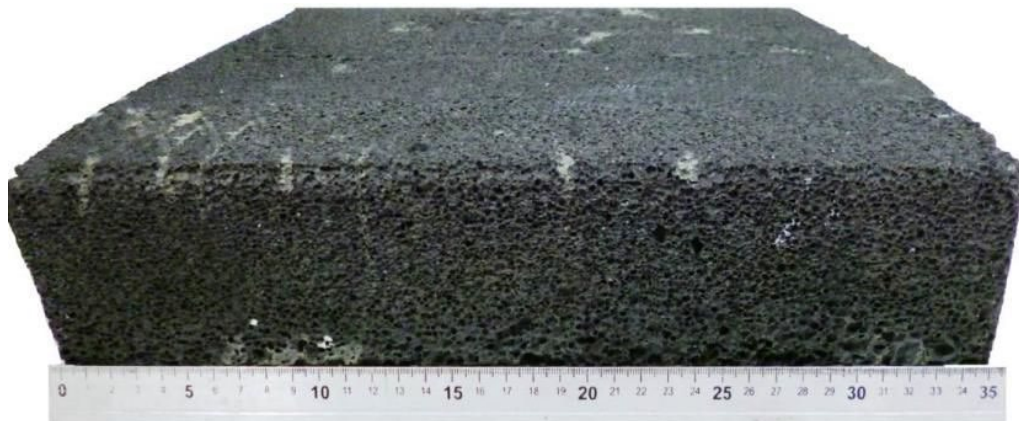
стадії витримки, охолодження та відпалу.

З урахуванням встановлених особливостей синтез плит проводили згідно з малюнком 4.1, а. Зовнішній вигляд плити з піноскла представлений малюнку 4.1, б.



а) режим синтезу плит:

- 1 – нагрівання; 2 – спінювання; 3 – різке охолодження (фіксація структури);
4 – витримка (стабілізація температури); 5 – охолодження (відпал)



б) лабораторний зразок плити з піноскла

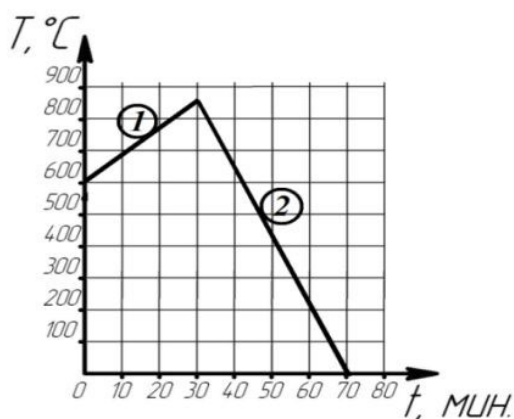
Рисунок 4.1 – Режим синтезу та зовнішній вигляд плит з піноскла

Після випалення синтезована плита опилювалася, тобто, їй надавалася правильна геометрична форма та необхідні розміри. Цей процес також сприяє видаленню верхнього оплавленого шару та оголенню пористої структури матеріалу.

Слід зазначити, що за цією технологією можливе отримання іншого типу виробів – піноскляного щебеню. Його отримання ґрунтується на руйнуванні плити з піноскла при різкому охолодженні за рахунок градієнта температур зовнішніх та внутрішніх шарів матеріалу. Для отримання щебеню необхідно виключити стадії 4 та 5 (рис. 4.1, а).

4.1.2 Аналіз режимів синтезу піноскляних гранул

Формування гранул проводилося за допомогою матриці-гранулятора із заданим діаметром отворів 5 мм. Далі сформовані зразки були піддані випалюванню при температурі 850 °С за графіком, представленим на рисунку 4.2, а. Відмінності від графіка синтезу лабораторних зразків обумовлені малими розмірами гранул і, отже, відсутністю необхідності витримки з метою вирівнювання температури обсягом матеріалу. Потім був проведений гранулометричний аналіз отриманого пористого матеріалу, який показав, що розмір гранул коливається від 5 до 10 мм (рис. 4.2 б).



а) Режим синтезу гранул:

б) Зразок піноскляних гранул

1 – нагрівання; 2 – охолодження

Рисунок 4.2 – Режим синтезу та вигляд піноскляних гранул

Таким чином, щоб оптимізувати режим синтезу для виробництва гранул з піноскла стадією витримки можна знехтувати через малі розміри одержуваного матеріалу. Навпаки, для виробництва плит з піноскла необхідно додати додаткову стадію відпалу зразків для зняття термічної напруги по всьому обсягу одержуваного матеріалу, а також подовжити стадію витримки.

Для визначення можливих способів застосування розроблених виробів було проведено дослідницькі випробування основних нормованих фізико-механічних властивостей згідно з чинними державними стандартами [76-90].

4.2 Визначення фізико-механічних властивостей піноскляних виробів

4.2.1 Визначення властивостей піноскляних гранул

Визначення коефіцієнта теплопровідності. Метод ґрунтується на визначенні теплопровідності експериментального зразка гранул розрахунковим шляхом по теплопровідності парафіну та композиційного матеріалу на його основі відповідно до пункту 13 ГОСТ 9758-2012. Теплопровідність гранул обчислювали як середнє арифметичне значення результатів трьох випробувань.

Результати обчислень представлені у таблиці 4.1.

Визначення зернового складу. Зерновий склад (фракцію) експериментальних зразків гранул піноскла визначали відповідно до пункту 17 ГОСТ 9758-2012.

Таблиця 4.1 – Результати визначення коефіцієнта теплопровідності

№ зразка	Р _М , г	Р _К , г	V _М , см ³	ρ _п , г/см ³	φ	λ _П , Вт/(м·К)	λ _М , Вт/(м·К)	Теплопровідність гранул, Вт/(м·К)	
								окремого зразка	середня
1	1086	450	3125	0,9	0,77	0,260	0,096	0,06	0,06
2	1093	451	3125	0,9	0,77	0,260	0,096	0,06	
3	1074	451	3125	0,9	0,78	0,260	0,095	0,06	

Визначення зернового складу. Зерновий склад (фракцію) експериментальних зразків гранул піноскла визначали відповідно до пункту 17 ГОСТ 9758-2012. Метод заснований на розсіві попередньо висушеної проби гранул на контрольних ситах з діаметром отворів, що відповідають подвоєному найбільшому 2D (20 мм), найбільшому D (10 мм) та найменшому d (5 мм) номінальними розмірами зерен. Результати дослідницьких випробувань щодо визначення фракційного складу гранул представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Результати визначення фракційного складу гранул

№ проби	Маса проби, г	Приватні залишки на ситах m _i , г			Приватні залишки на піддоні m _{пд} , г	Сума приватних залишків Σm _i , г	Приватні залишки на ситах a _i , %			Повні залишки на кожному ситі A _i , %		
		d	D	2D			d	D	2D	d	D	2D
1	1986	1903	56	0	19	1978	95,8	2,8	0	98,6	2,8	0
2	1984	1887	46	0	34	1967	95,1	2,3	0	97,4	2,3	0
3	1989	1891	45	0	38	1974	95,1	2,3	0	97,4	2,3	0
4	1989	1890	49	0	24	1963	95,0	2,5	0	97,5	2,5	0
5	1987	1887	60	0	21	1968	95,0	3,0	0	98,0	3,0	0
середня	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97,8	2,6	0

Визначення насипної густини. Насипну густину визначали зважуванням маси висушеної проби гранул у мірній посудині відповідно до пунктом 6 ГОСТ 9758-2012. Насипну щільність гранул розраховували як середнє арифметичне значення результатів двох паралельних випробувань,

при проведенні яких щоразу використовували нову пробу гранул. Результати визначення наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати визначення насипної густини гранул

№ проби	Маса мірної судини з гранулами, кг	Маса мірної судини, кг	Насипна густина, кг/м ³	
			окремої проби	середнє
1	1,090	0,704	197	199
2	1,107	0,704	201	

Визначення вологості. Вологість визначали по різниці мас навішування гранул до та після висушування відповідно до пункту 15 ГОСТ 9758-2012. Вологість гранул обчислювали з точністю до 0,1% як середнє арифметичне значення результатів двох паралельних випробувань. Результати обчислень представлені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Результати визначення вологості гранул

№ проби	Маса судини з наважкою до сушіння, г	Маса судини з наважкою після сушіння, г	Маса судини, г	Вологість, %	
				окремої проби	середнє
1.1	961,45	959,66	364,20	0,3	0,3
1.2	970,00	967,58	364,20	0,4	
1.3	972,91	971,08	364,20	0,3	
2.1	969,54	967,12	364,20	0,4	0,4
2.2	963,55	961,15	364,20	0,4	
2.3	973,53	971,70	364,20	0,3	

Визначення водопоглинання. Водопоглинання експериментального зразка гранул визначали різницею мас навішування до і після насичення її водою відповідно до пункту 16 ГОСТ 9758-2012. За результат випробування приймали середнє арифметичне значення двох паралельних випробувань. Результати визначення представлені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Результати визначення водопоглинання гранул

№ навішування	Маса навішування, насиченою водою, г	Маса сухої навішування, г	Водопоглинання, %	
			в окремій навісці	середнє
1.1	462,38	442,96	4,2	3,7
1.2	454,33	439,34	3,3	
2.1	458,66	446,28	2,7	3,7
2.2	462,50	440,76	4,7	

Визначення вмісту розколотих зерен. Вміст розколотих зерен в експериментальному зразку гранул визначали як відношення маси розколотих зерен до маси випробуваного навішування гравію відповідно до пункту 20 ГОСТ 9758-2012. Зміст розколотих зерен обчислювали як середнє арифметичне значення результатів двох паралельних випробувань. Результати обчислень представлені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Результати визначення вмісту розколотих зерен

№ навішування	Маса розколотих зерен, г	Маса навішування, г	Зміст розколотих зерен, %	
			в окремій навісці	середнє
1.1	17,48	197,53	8,9	8,8
1.2	17,33	196,88	8,8	
2.1	17,33	197,59	8,8	8,8
2.2	17,31	195,83	8,8	

Визначення міцності при стисканні в циліндрі. Міцність експериментального зразка гранул при стисканні в циліндрі визначали по навантаженню, що відповідає зануренню пуансона на 20 мм у шар випробуваної проби гранул відповідно до пункту 25 ГОСТ 9758-2012. Міцність гранул при стисканні в циліндрі обчислювали як середнє арифметичне значення результатів двох паралельних випробувань. Результати визначення наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Результати визначення міцності при стисканні в циліндрі

№ проби	Маса проби, г	Насипна густина, кг/м ³	Навантаження при стисканні Р, кгс	Міцність при стисканні в циліндрі, МПа	
				окремої проби	середнє
1	1198	199	1239	0,69	0,71
2	1212	200	1280	0,72	

Визначення морозостійкості при втраті маси після 15 циклів поперемінного заморожування та розморожування. Морозостійкість гранул визначали за втратами маси його навішування до і після проведення ряду циклів поперемінного заморожування та відтавання відповідно до пункту 29 ГОСТ 9758-2012. За остаточний результат випробування приймали середнє арифметичне значення двох паралельних випробувань. Результати визначення представлені у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 - Результати визначення морозостійкості при втраті маси після 15 циклів поперемінного заморожування та відтавання гранул

№ навішування	Маса навішування до випробування, г	Маса залишку на ситі після випробування, г	Втрата маси, %	
			окремої навіски	середнє
1.1	395,77	373,61	5,6	5,60
1.2	396,60	374,39	5,6	
2.1	395,78	373,22	5,7	5,65
2.2	396,34	374,14	5,6	

Визначення втрати маси щодо стійкості проти силікатного розпаду. Стійкість гранул проти силікатного розпаду визначали за втраті маси навішування до та після проведення циклів поперемінного пропарювання та охолодження відповідно до пункту 31 ГОСТ 9758-2012. За остаточний результат приймали середнє арифметичне значення двох паралельних випробувань. Результати визначення представлені у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Втрата маси щодо стійкості проти силікатного розпаду гранул

№ навішування	Маса навішування до випробування, г	Маса залишку на ситі після випробування, г	Втрата маси, %	
			окремої навіски	середнє
1.1	396,74	396,07	0,17	0,175
1.2	396,22	395,51	0,18	
2.1	396,45	395,78	0,17	0,175
2.2	396,58	395,87	0,18	

Визначення втрати маси під час кип'ятіння. Втрату маси експериментального зразка гранул при кип'ятінні визначали по різниці мас навішування до та після випробування відповідно до пункту 33 ГОСТ 9758-2012. За остаточний результат приймали середнє арифметичне значення двох паралельних випробувань. Результати визначення подано у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 - Результати визначення втрати маси при кип'ятінні гранул

№ навішування	Маса навішування до випробування, г	Маса залишку на ситі після випробування, г	Втрата маси, %	
			окремої навіски	середнє
1.1	397,01	396,30	0,18	0,180
1.2	396,65	395,94	0,18	
2.1	396,56	395,81	0,19	0,190
2.2	396,81	396,06	0,19	

Визначення вмісту водорозчинних сірчистих та сірчаноокислих з'єднань. Визначення вмісту водорозчинних сірчистих та сірчаноокислих сполук в експериментальному зразку гранул здійснювали відповідно до методу, зазначеного у пункті 35 ГОСТ 9758-2012. Метод заснований на переведенні водорозчинних сірчистих та сірчаноокислих сполук у нерозчинний осад сульфату барію. Зміст зазначених сполук в осаді у перерахунку на SO₃ визначали гравіметричним методом. За остаточний результат приймали

середнє арифметичне значення двох паралельних випробувань. Гранична допустима розбіжність між результатами двох випробувань не перевищує 0,15 %. Результати визначення подано у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 - Результати визначення вмісту сірчастих водорозчинних та сірчаноокислих сполук

№ навішування	Маса осаду сульфату барію, г	Маса навішування в аліквотній частині витяжки, г	Вміст водорозчинних сірчастих та сірчаноокислих сполук, %	
			окремої навіски	середнє
1	0,40	21,11	0,6499	0,6496
2	0,34	17,96	0,6493	

Визначення втрати маси під час прожарювання. Втрату маси експериментального зразка гранул при прожарюванні визначали гравіметричним методом різниці маси тигля з наважкою до і після прожарювання відповідно до пункту 36 ГОСТ 9758-2012. Втрату маси при прожарюванні обчислювали як середнє арифметичне значення результатів двох паралельних випробувань.

Результати обчислень представлені у таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Результати визначення втрати маси під час прожарювання

№ навішування	Маса тигля, г	Маса тиглю з наважкою в сухому стані, г	Маса тигля з наважкою після прожарювання, г	Втрата маси при прожарюванні, %	
				окремої навіски	середнє
1.1	169,05	566,06	562,44	0,64	0,625
1.2	169,10	565,75	562,30	0,61	
2.1	168,25	564,81	561,31	0,62	0,610
2.2	172,30	569,11	565,70	0,60	

4.2.2 Визначення властивостей плит з піноскла

Визначення групи горючості. Випробування на пальне експериментальних зразків плит проводили згідно з методом ГОСТ 30244-94. Розраховували середню арифметичну величину (за п'ятьма зразками) приросту температуру в печі, в центрі та на поверхні зразка плити. Розраховували втрату маси для кожного зразка плити (у відсотках від початкової маси зразка) та визначали середню арифметичну величину для п'яти зразків. Результати представлені в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 - Результати визначення групи горючості плит

Показники	№ зразка					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
Маса зразка до випробування, г	35,7	36,1	35,9	35,8	35,9	-
Маса зразка після випробування, г	34,8	34,9	34,8	35,1	35,0	-
Початкова температура печі, °С	835	836	835	835	836	-
Максимальна температура печі, °С	837	838	838	837	839	-
Кінцева температура печі, °С	835	836	836	836	837	-
Максимальна температура в центрі зразка, °С	842	843	843	841	842	-
Кінцева температура в центрі зразка, °С	836	835	836	836	835	-
Максимальна температура поверхні зразка, °С	839	838	839	838	838	-
Кінцева температура поверхні зразка, °С	836	835	836	836	835	-
Приріст температури в печі, °С	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,8
Приріст температури в центрі зразка, °С	6,0	8,0	7,0	5,0	7,0	6,6
Приріст температури на поверхні зразка, °С	3,0	3,0	3,0	2,0	3,0	2,8
Втрата маси зразка, %	2,5	3,3	3,1	2,0	2,5	2,7

Згідно з даними таблиці, зразки, вирізані з плит, відносяться до негорючих матеріалів оскільки:

- приріст температури печі трохи більше 50 °С;
- втрата маси зразка не більше 50 %.

Визначення розміру плит. Вимірювання довжини, ширини і товщини експериментальних зразків плит виконували згідно з методиками, зазначеними в ГОСТ EN 822-2011 та ГОСТ EN 823-2011. На плитах не спостерігалось відколів загальної площею понад 5,0 см². Розміри та кількість дефектів не перевищували значень, зазначених в таблиці 4.14. Результати визначення подано у таблиці 4.15.

Таблиця 4.14 – Допустимі дефекти зовнішнього вигляду плит

Вид дефекту	Значення
Відбитості кутів глибиною понад 15 мм, шт.	2
Відбитості кутів завглибшки від 3 до 15 мм, шт.	4
Відбитості ребер глибиною понад 3 мм та довжиною понад 15 мм, шт.	2
Відбитості ребер глибиною трохи більше 3 мм і довжиною від 3 до 15 мм, шт	4
Тріщини, шт.	2

Таблиця 4.15 - Результати визначення дефектів зовнішнього вигляду плит

Вид дефекту	Значення				
	Зразки №				
	1	2	3	4	5
Відбитості кутів глибиною понад 15 мм,	0	0	0	0	0
Відбитості кутів завглибшки від 3 до 15 мм, шт.	2	2	2	1	2
Відбитості ребер глибиною понад 3 мм та довжиною понад 15 мм, шт.	1	0	0	1	0
Відбитості ребер глибиною трохи більше 3 мм і довжиною від 3 до 15 мм,	2	1	1	1	2
Тріщини, шт.	1	1	0	0	1

Оскільки плити відповідають вимогам, зазначеним у таблиці 4.14, проводили вимірювання довжини, ширини та товщини (висоти). Вимірювали довжини та ширини плит відповідно до пункту 7 ГОСТ EN 822-2011 за допомогою рулетки вимірювальної з ціною розподілу 1 мм. Довжину та ширину плит у міліметрах обчислювали як середнє арифметичне значення результатів вимірювань, округлене до 1 мм. Проводили вимірювання товщини плит відповідно до пункту 7 ГОСТ EN 823-2011. Результати вимірювань довжини, ширини та товщини плит представлені у таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Результати вимірювань довжини ширини та товщини плит

№ зразка	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм	
			в окремій точці	середня
1	350	350	100,5	101
			101,0	
2	351	350	100,0	100
			99,5	
3	351	352	100,0	101
			101,0	
4	350	350	99,0	99
			98,5	
5	350	350	99,5	100
			100,0	
середнє	350	350	100	

Відхилення від прямокутності плит вимірювали відповідно до пунктом 7 ГОСТ EN 824-2011 за допомогою рулетки вимірювальної та металевої прямокутника. Вимірювання проводили за температури $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Результати вимірювань подано у таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 - Результати визначення відхилень від прямокутності граней плит

№ зразка	Відхилення від прямокутності по довжині, мм/м	Відхилення від прямокутності по ширині, мм/м	Відхилення від прямокутності по товщині, мм
1	3	2	2
2	2	3	1
3	4	2	1
4	3	3	0
5	2	3	2

Визначення густини плит. Середню густину експериментального зразка плити визначали відповідно до ГОСТ EN 1602-2011. Обчислювали середнє арифметичне значення щільності за результатами випробувань всіх обрізків плити, що округляли до третьої значущої цифри. Результати визначень представлені у таблиці 4.18.

Таблиця 4.18 – Результати визначення густини плит

№ зразка	Довжина, м	Ширина, м	Висота, м	Об'єм, м ³	Маса, кг	Щільність, кг/м ³	
						окремого зразка	середня
1	0,350	0,350	0,101	0,012	2,431	202,59	205,24
2	0,351	0,350	0,100	0,012	2,486	207,15	
3	0,351	0,352	0,101	0,012	2,465	205,42	
4	0,350	0,350	0,099	0,012	2,471	205,93	
5	0,350	0,350	0,100	0,012	2,461	205,10	

Визначення межі міцності при стисканні. Випробування щодо визначення межі міцності при стисканні експериментальних зразків плит проводили відповідно до ГОСТ 826-2011 на п'яти зразках, вирізаних із плит: довжина – 100 мм, ширина – 100 мм, товщина – 100 мм. Результати визначення представлені в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 – Результати визначення межі міцності плит під час стиснення

№ зразка	Довжина, мм	Ширина, мм	Площа, мм ²	Максимальна сила, Н	Межа міцності при стиску, кПа	
					окремого зразка	середнє значення
1	100	100	10000	9500	950	993
2	100	101	10100	10474	1037	
3	98	100	9800	9565	976	
4	99	100	9900	9831	993	
5	100	101	10100	10171	1007	

Визначення межі міцності при згинанні. Випробування щодо визначення межі міцності при згинанні експериментальних зразків плит проводили відповідно до ГОСТ EN 12089-2011 на п'яти плитах: довжина – 350 мм, ширина – 350 мм, товщина – 100 мм. Результати визначення подано у таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Результати визначення межі міцності плит на вигин

№ зразка	Ширина, мм	Товщина, мм	Максимальна сила, Н	Межа міцності при стиску, кПа	
				окремого зразка	середнє значення
1	350	100	3900	420	398
2	351	101	3700	390	
3	351	100	3600	380	
4	349	100	3700	400	
5	350	101	3800	400	

Визначення коефіцієнта теплопровідності. Сутність методу визначення теплопровідності полягала у створенні стаціонарного теплового потоку ГОСТ 25380-2014, що проходить через експериментальний зразок плити товщиною 100 ± 5 мм і спрямованого перпендикулярно до лицьових граней плити, вимірювання густини цього теплового потоку, температури протилежних лицьових граней та товщини плити.

За результат випробування приймали середнє арифметичне значення термічного опору та ефективної теплопровідності всіх випробуваних плит.

Результати випробувань представлені в таблиці 4.21.

Таблиця 4.21 – Результати визначення коефіцієнта теплопровідності плит

№ зразка	T1, °C	T2, °C	Щільність теплового потоку, Вт/м ²	Термічний опір, м ² К/Вт	Товщина, м	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	
						окремого зразка	середнє значення
1	23,7	22,8	0,56	1,60	0,101	0,063	0,063
2	23,3	22,3	0,65	1,54	0,100	0,065	
3	23,9	23,0	0,55	1,63	0,101	0,062	
4	23,6	22,6	0,61	1,65	0,099	0,060	
5	23,8	22,8	0,65	1,54	0,100	0,065	

Визначення водопоглинання за об'ємом. Визначали водопоглинання за зміною маси експериментальних зразків плит, повністю занурених у воду на 28 діб, відповідно до ГОСТ EN 12087-2011. Значення водопоглинання W_{1p} округляли з точністю до 0,1% за об'ємом. Результати визначення представлені у таблиці 4.22.

Таблиця 4.22 - Результати визначення водопоглинання за об'ємом плит

№ зразка	Первинна вага, г	Вага після занурення на 28 діб, г	Об'єм, м ³	Водопоглинання за об'ємом, %	
				окремого зразка	середнє
1	1589,25	1623,96	0,008	2,2	2,3
2	1588,76	1622,94	0,008	2,2	
3	1602,47	1640,45	0,008	2,4	
4	1591,48	1627,59	0,008	2,3	

Визначення паропроникності. Визначення характеристик паропроникності експериментальних зразків плит проводили відповідно до вимог ГОСТ EN 12086-2011. Результати визначень представлені в таблиці 4.23.

Таблиця 4.23 - Результати визначення паропроникності плит

№ зр.	Зміна ваги чаши зі зразком за 24 години, мг/год	Щільність потоку водяної пари, мг/(м ² ·ч)	Відносна паропро-никність, мг/(м ² ·ч·Па)	Середньо-арифм. площ верхн. та нижн. ділянок, м ²	Опір паропро-никності (м ² ·ч·Па)/мг	Паропроникність, мг/(м ² ·ч·Па)	
						Окремого зразка	середня
1	67,5	2177,4	0,911	0,031	1,098	0,09	0,09
2	61,3	1915,6	0,802	0,032	1,247	0,08	
3	67,5	2177,4	0,911	0,031	1,098	0,09	
4	84,2	2631,3	1,101	0,032	0,908	0,11	
5	73,6	2374,32	0,993	0,031	1,007	0,10	

Визначення морозостійкості. Визначення морозостійкості проводили відповідно до вимог ГОСТ EN 12091-2011. Результати випробування щодо визначення зміни характеристик стиснення зразків плит після проведення 50 циклів заморожування та відтавання представлені в таблиці 4.24.

Таблиця 4.24 - Результати визначення морозостійкості плит

№ зр.	W _v , %		σ _m , МПа	σ _{m_wat} , МПа	σ _{m_dry} , МПа	σ _{m_wat} , %		σ _{m_dry} , %	
	окремого зразка	Середнє значення				окрем. зразка	середнє значен.	окрем. зразка	середнє значен.
1	2,1	2,2	1,277	1,160	-	91	91	-	-
2	2,3		1,285	1,171	-	91		-	-
3	2,0		1,301	-	1,172	-	-	90	91
4	2,4		1,294	-	1,178	-	-	91	

4.3 Пошук шляхів щодо застосування піноскляних виробів у багат шарових будівельних панелях

4.3.1 Легкий бетон на основі піноскляних гранул

Як основні сировинні компоненти для отримання легкого бетону були обрані: піносклові гранули, портландцемент марки М500, кварцевий пісок, вода. Гранули вироблялися згідно з методикою, описаною вище.

Далі був проведений розрахунок складу легкого бетону щільністю 600 кг/м^3 , відповідний вимогам ГОСТ 25820-2014 для конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону, згідно з методикою, кг: цемент – 250; вода – 140; гранули – 70; пісок – 150. Порядок завантаження компонентів бетонної суміші: спочатку подають 15-20% води, необхідної на заміс, потім завантажують одночасно цемент і заповнювачі, продовжуючи заливати воду до необхідної кількості. Після змішування суміш завантажувалася у підготовлену форму, ущільнювалася на вібротрамблері, проходила тепловологісну обробку, після чого витягувалася із форми. Зовнішній вигляд плити з легкого бетону представлено на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Лабораторний зразок плити з легкого бетону

Було досліджено основні фізико-механічні властивості лабораторних зразків легкого бетону.

Визначення середньої густини. Щільність зразка легкого бетону визначали випробуванням зразків у повітряно-сухому стані відповідно до ГОСТ 12730.1-78. Результати визначення подано у таблиці 4.25.

Таблиця 4.25 – Результати визначення середньої густини легкого бетону

№ зр.	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Об'єм, м ³	Вага, кг	Сер. щільн. кг/м ³	
						окрем. зразк.	середн.
1	100	100	101	0,00101	0,553	597	595
2	101	100	99	0,00099	0,544	594	
3	100	101	100	0,00101	0,552	596	
4	101	99	100	0,00099	0,549	599	
5	100	100	101	0,00101	0,544	589	

Визначення міцності на стиск. Визначення міцності на стиск зразка легкого бетону полягало у вимірі мінімальних руйнівних зусиль, спеціально виготовлені контрольні зразки бетону при їх статичному навантаженні з постійною швидкістю зростання навантаження та подальшому обчисленні напруг при цих зусиллях у припущенні пружної роботи матеріалу у відповідності до ГОСТ 10180-2012. Результати визначення представлені в таблиці 4.26.

Таблиця 4.26 - Результати визначення міцності на стиск легкого бетону

№ зр.	Площа робочого перерізу зразка, мм ²	Руйнуюче навантаження, Н	Міцність на стиск, МПа	
			окрем. зразк.	середня
1	22650	31000	1,37	1,35
2	22500	30100	1,34	
3	22801	30500	1,34	
4	22499	30600	1,36	
5	22500	30400	1,35	

Визначення коефіцієнта теплопровідності. Сутність методу визначення теплопровідності полягала у створенні стаціонарного теплового струму, що проходить через експериментальний зразок легкого бетону у формі куба з гранню (100 ± 5) мм, вимірюванні щільності цього теплового потоку за ГОСТ 25380-2014 та температури протилежних лицьових граней за допомогою вимірювача густини теплового потоку. Результати досліджень представлені в таблиці 4.27.

Таблиця 4.27 – Результати визначення коефіцієнта теплопровідності легкого бетону

№ зр.	T1, °C	T2, °C	Щільність теплового потоку, Вт/м ²	Термічний опір, м ² ·К/Вт	Товщина, м	Коеф. теплопровідн. Вт/(м·К)	
						окрем. зразк.	середн. значення
1	23,5	22,7	1,4	0,57	0,1	0,175	0,166
2	22,9	22,1	1,3	0,62	0,1	0,161	
3	23,5	22,7	1,4	0,57	0,1	0,175	
4	23,4	22,5	1,4	0,64	0,1	0,156	
5	23,5	22,7	1,3	0,62	0,1	0,161	

Таким чином, було визначено основні властивості пропонованого складу легкого бетону, подані у таблиці 4.28.

Таблиця 4.28 - Результати визначення властивостей легкого бетону

Міцність на стиск, МПа	Щільність, кг/м ³	Коеф. теплопровідності, Вт/(м·К)
1,35	595	0,166

4.3.2 Порівняльний теплотехнічний аналіз багатошарових будівельних панелей

Було проведено розрахунок теплових втрат розроблених багатошарових будівельних панелей в порівнянні з типовою тришаровою стіною панеллю (85x80x85) мм на основі керамзитобетону щільністю 1800 кг/м³ (зовнішні шари) та плити з пінополістиролу ПСБ-25 щільністю 20 кг/м³.

Основною характеристикою ефективності теплоізоляції огорожувальної стінової конструкції є коефіцієнт опору теплопередачі. Коефіцієнт опору теплопередачі огорожувальної конструкції R_i , (м²·К)/Вт, розраховується за формулою:

$$R_i = R_{se} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + R_{si}, \quad (4.1)$$

де R_{se} - коефіцієнт опору теплопередачі огорожувальної конструкції зовнішньої поверхні (м²·К)/Вт;

R_{si} – коефіцієнт опору теплопередачі огорожувальної конструкції внутрішньої поверхні (м²·К)/Вт;

δ_i – товщина i -го шару матеріалу, м;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару матеріалу, Вт/(м·К).

Значення коефіцієнтів R_{si} та R_{se} для стіни, підлоги та покрівлі складають: $R_{si} = 1/8,7$ (м²·К)/Вт; $R_{se} = 1/23$ (м²·К)/Вт.

Значення тепловтрат будівлі складається з трансмісійних втрат тепла огорожувальних конструкцій та втрат тепла з інфільтрацією. Втрати тепла з інфільтрацією становлять, як правило, менше 2% від загального значення сумарних тепловтрат будівлі. Зважаючи на незначний вклад у загальне значення тепловтрат огорожувальних конструкцій, а також зважаючи на однаковий вплив інфільтрації на порівнювані конструктиви, розрахунком втрат тепла через інфільтрацію можна знехтувати.

4.3.2.1 Типова тришарова стінова панель

Як вихідна панель була обрана стандартна тришарова панель, що складається з наступних матеріалів: зовнішні шари – керамзитобетон щільністю 1800 кг/м^3 , внутрішній шар – пінополістирол марки ПСБ-25. Результати теплотехнічного розрахунку представлені на рисунку 4.4 і в таблиці 4.29.

Таблиця 4.29 – Властивості матеріалів тришарової панелі

Матеріал	Товщина, мм	Щільність, кг/м^3	Коеф. теплопровідності, $\text{Вт/(м}^*\text{К)}$
Керамзитобетон	85	1800	0,80
Пінополістирол	80	25	0,041

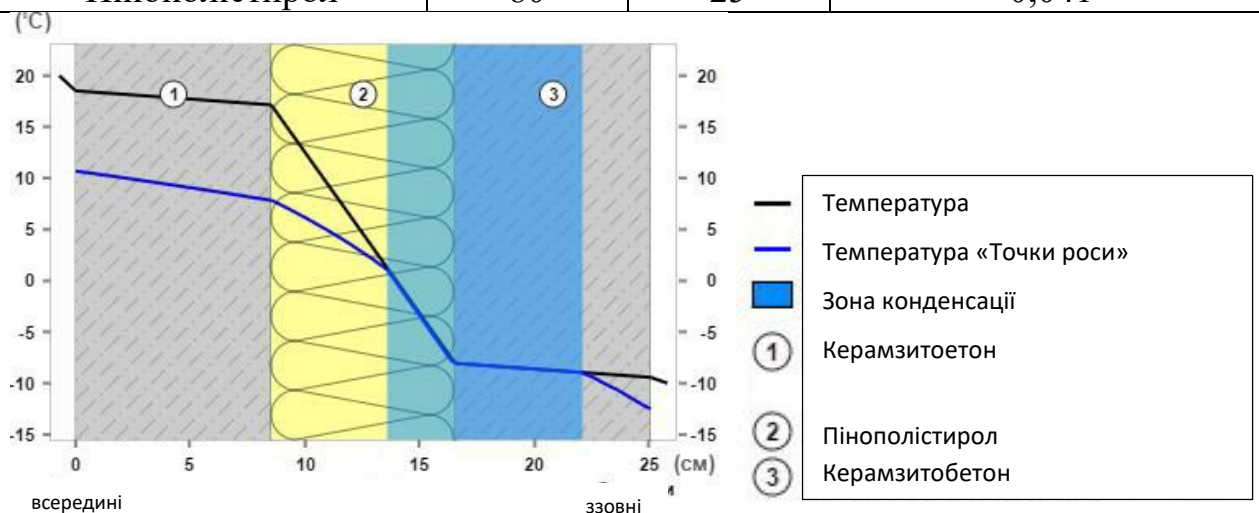


Рисунок 4.4 – Опір теплопередачі

Таблиця 4.30 – Шари конструкції (зсередини назовні)

№	d, мм	Матеріал	λ , $\text{Вт/(м}^*\text{К)}$	T_{max} , °C	T_{min} , °C	R , $(\text{м}^2*\text{К})/\text{Вт}$
Опір тепловосприйняття				20,0	18,5	0,11
1	85	Керамзитобетон	0,8	18,5	17,1	0,11
2	80	Пінополістирол	0,041	17,1	-8,1	1,95
3	85	Керамзитобетон	0,8	-8,1	-9,4	0,11
Опір тепловіддачі				-9,4	-10,0	0,04
Термічний опір огороджуючої конструкції						2,16
Опір теплопередачі огороджуючої конструкції R						2,32

З розрахунку видно, що ця конструкція не задовольняє нормам поелементних вимог до теплового захисту ($R < R_T$; $2,32 < 2,57$).

4.3.2.2 Багатошарова будівельна панель

Було здійснено розрахунок тришарової панелі (85x80x85) мм, що складається з наступних матеріалів: зовнішні шари – легкий бетон на основі представлених піноскляних гранул щільністю 600 кг/м^3 , внутрішній шар – плита з піноскла щільністю 200 кг/м^3 . Результати теплотехнічного розрахунку представлені на рисунку 4.5 та в таблиці 4.31.

Таблиця 4.31 – Властивості матеріалів тришарової панелі

Матеріал	Щільність, кг/м^3	Коеф. теплопровідності, Вт/(м*К)
Легкий бетон на основі піноскляних гранул	600	0,17
Плита з піноскла	200	0,06

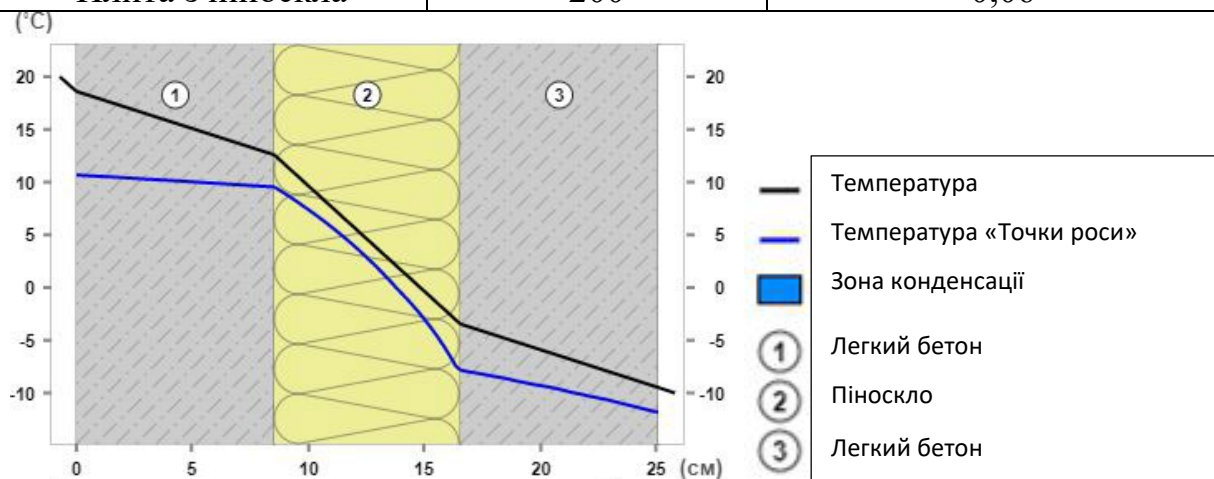


Рисунок 4.5 – Опір теплопередачі

Таблиця 4.32 – Шари конструкції (зсередини назовні)

№	d, мм	Матеріал	λ , Вт/(м*К)	T_{max} , °C	T_{min} , °C	R, ($\text{м}^2\text{*К}$)/Вт
Опір тепловосприйняття				20,0	18,6	0,11
1	85	Легкий бетон	0,17	18,6	12,6	0,50
2	80	Піноскло	0,06	12,6	-3,5	1,33
3	85	Легкий бетон	0,17	-3,5	-9,5	0,50
Опір тепловіддачі				-9,5	-10,0	0,04
Термічний опір огорожуючої конструкції						2,33
Опір теплопередачі огорожуючої конструкції R						2,49

З розрахунку видно, що ця конструкція не повністю задовольняє нормам вимог до теплового захисту ($R < R_T$; $2,49 < 2,57$). Крім того, порівняно зі стандартною панеллю, є ряд переваг:

- відсутня конденсація вологи всередині панелі, що веде до значного покращення теплоізоляційних властивостей та підвищення термінів служби панелі;

- менша вага панелі при більш високих показниках теплоізоляційних властивостей веде до зниження навантаження на основу будівлі та зниження матеріало-ємності конструкції;

- застосування неорганічних матеріалів веде до підвищення вогнестійкості та пожежної безпеки будівлі, а також до підвищення термінів експлуатації будівлі.

Виходячи з цього, було здійснено розрахунок передбачуваної тришарової панелі, яка складається з наступних матеріалів: зовнішні шари – легкий бетон на основі розроблених піноскляних гранул щільністю 600 кг/м^3 , внутрішній шар – плита з піноскла щільністю 200 кг/м^3 (таблиця 4.34). Результати теплотехнічного розрахунку представлені на рисунку 4.6 та в таблиці 4.33.

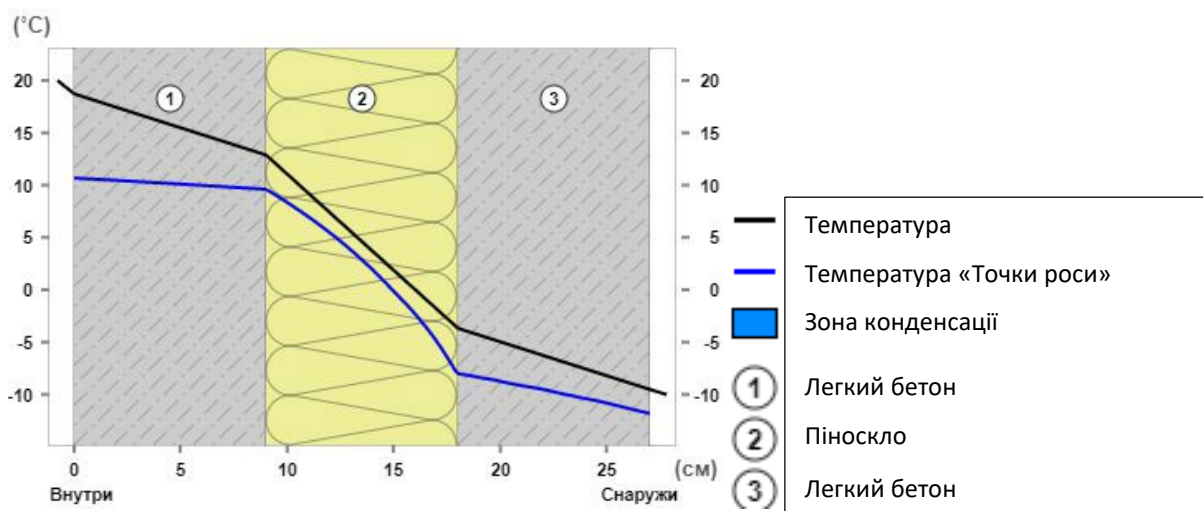


Рисунок 4.6 – Опір теплопередачі

Таблиця 4.33 – Шари конструкції (зсередини назовні)

№	d, мм	Матеріал	λ , Вт/(м*К)	T_{\max} , °С	T_{\min} , °С	R, (м ² *К)/Вт
Опір тепловосприйняття				0,11	20,0	18,7
1	90	Легкий бетон	0,17	0,53	18,7	12,9
2	90	Піноскло	0,06	1,50	12,9	-3,7
3	90	Легкий бетон	0,17	0,53	-3,7	-9,5
Опір тепловіддачі				0,04	-9,5	-10,0
Термічний опір огорожуючої конструкції						2,56
Опір теплопередачі огорожуючої конструкції R						2,72

З розрахунку видно, що дана конструкція повністю задовольняє нормам вимог до теплового захисту ($R > R_T$; $2,72 > 2,57$). Таким чином, враховуючи перераховані вище переваги, застосування розроблених багатошарових панелей є ефективною заміною існуючим традиційним панелям.

Розрахунок показав, що стандартна панель не задовольняє норм поелементних вимог до теплового захисту. Панель на основі представлених матеріалів зовнішні шари (легкий бетон) – 90 мм; внутрішній шар (плита з піноскла) – 90 мм) повністю задовольняє нормам вимог до теплового захисту та захисту від перезволоження та може використовуватися при зведенні будівель та споруд. Крім того, у порівнянні зі стандартною панеллю, є ряд переваг: відсутність конденсації вологи усередині панелі; менша вага при більш високих показниках теплоізоляційних властивостей; підвищена вогнестійкість, пожежна безпека та термін експлуатації будинку.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено оптимальний склад пороутворювальної суміші та розглянуто вплив технологічних параметрів синтезу на структуру та властивості піноскла. Оптимальний склад суміші пороутворювача, мас. %: рідке скло – 4; гліцерин - 3; вода – 3. Тривалість спінювання 10 хвилин дозволяє усереднити та стабілізувати середній розмір пір, внаслідок чого є оптимальним.

Оптимальним температурним інтервалом для утворення пористої структури є інтервал 800-850 °С. Встановлено, що із зменшенням фракційного співвідношення шихти значно зменшується щільність і збільшується обсяг піноскла через кращу гомогенізацію і більшу інтенсивність нагрівання тонкодисперсних частинок, що інтенсифікує процеси плавлення та спінювання зразків. Оптимальною обрана фракція менше 0,16 мм.

2. Детально вивчено і систематизовано вплив різних видів другорядних матеріалів на структуру та властивості синтезованого піноскла. Встановлено, що при використанні скловідходів найменшими показниками щільності має склад на основі тарного склабою БТ-1 (230-150 кг/м³), а найбільшими – склад на основі тарного склабою ЗТ-1 (410-300 кг/м³).

Оптимальна для використання в якості теплоізоляційного матеріалу була вибрана суміш тарного склабою БТ-1 та бою листового скла М4. Встановлено, що з використанням шлакових відходів ТЕС до 20 мас. % зміни структури та властивостей матеріалу практично не спостерігається. При вмісті шлакового відходу вище 30 мас. % спостерігається зниження рівномірності пористої структури.

3. Розглянуто та проаналізовано склади легкого бетону на основі піноскляних гранул. Вибрано співвідношення «цемент: гранули: пісок» = 1,5:1:1, відповідний вимогам ГОСТ 25820-2014 для конструкційно-

теплоізоляційного легкого бетону за найменшою щільністю. Визначено його основні фізико-механічні властивості: середня густина 595 кг/м^3 ; міцність на стиск $1,35 \text{ МПа}$; коефіцієнт теплопровідності $0,166 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

4. На основі теплотехнічного розрахунку встановлено, що стандартна панель (зовнішні шари – керамзитобетон щільністю 1800 кг/м^3 , внутрішній шар – пінополістирол марки ПСБ-25) не задовольняє нормам поелементних вимог до теплового захисту.

Панель на основі проаналізованих матеріалів (зовнішні шари - плита з легкого бетону на основі піноскляних гранул щільністю 600 кг/м^3 , внутрішній шар – плита з піноскла щільністю 200 кг/м^3) повністю задовольняє нормам вимог до теплового захисту, а також має ряд переваг: відсутність конденсації вологи всередині панелі; менша вага при більш високих показниках теплоізоляційних властивостей; підвищена вогнестійкість, пожежна безпека та терміни експлуатації будівлі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Солтисік Р. А. Марущак У. Д., Позняк О. Р., Дума В. О. Аспекти сталого розвитку в будівництві. *Сталий розвиток – стан та перспективи: матеріали міжнародного наукового симпозіуму SDEV'2018*, м. Львів, 28 лютого–3 березня 2018 р. Львів, 2018. С. 92–93.
2. Обсяги сучасного виробництва і споживання газобетону. URL: <https://pp-budpostach.com.ua/a255738-obsyagi-suchasnogo-virobnitstva.html>. (дата звернення 15.11.2023).
3. Namsone E., Šahmenko G., Korjakins A., Namsone E. Durability Properties of High Performance Foamed Concrete. *Procedia Engineering*. 2017. No. 172. P. 760–767.
4. Всеукраїнська Асоціація виробників Автоклавного Газобетону. URL: <https://gazobeton.org>. (дата звернення 25.11.2023).
5. Позняк О. Р., Мельник В. М., Завадський І. О., Мельник А. Я. Виробництво, властивості і застосування газобетону неавтоклавного тверднення. *Вісник Нац. ун-ту Львівська політехніка. «Теорія і практика будівництва»*. Львів, 2017. № 877. С. 160–166.
6. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів : підручник / Р. Ф. Рунова та ін. 3-тє вид. Київ : Основа, 2017. 528 с.
7. Poznyak O., Sanytsky M., Zavadsky I., Braichenko S., Melnyk A. Research into structure formation and properties of the fiberreinforced aerated concrete obtained by the non-autoclaved hardening. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/6 (93). с. 39–46.
8. Якимечко Я. Б. Вапняно-гіпсові в'язучі з покращеними експлуатаційними характеристиками. *Будівельні матеріали та виробу*. 2012. № 5 (76). С. 4–8.
9. Amran Y. H. M., Farzadnia N., Abang Ali A. A. Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*.

Vol. 101, Part 1. 2015. P. 990-1005.

10. Martynov V. Influence of the Structure of a Material Solid Phase on the Properties of Cellular Concrete. *National Journal of Composite Materials*. 2015. №4. Vol. 5. P. 79–80.

11. Якимечко Я. Б. Волошинець В. А. Кінетичні параметри гідратації СаО в розчинах електролітів. *Технології та дизайн: електронне фахове видання*. 2012. № 1 (2). 11 с.

12. Pozniak O. Non-autoclave aerated concrete from modified binders composition containing supplementary cementitious materials. *Budownictwo I architektura. Politechnika Lubelska*. 2014. Vol. 13(2). P.127–134.

13. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин : ТОВ “Видавництво “АспектПоліграф”, 2010. 228 с.

14. Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах : монографія. Київ : КНУБіА, 2007. 216 с.

15. Zulkarnain F. Durability of Performance Foamed Concrete Mix Design with Silica Fume for Housing Development. *Journal of Material Sciences and Engineering*. 2011. P. 518–527.

16. Сердюк В. Р. Мінеральні та хімічні добавки в технології газобетонів. *Строительные материалы, изделия и санитарная техника*. 2011. № 39. С. 141–146.

17. Yatsenko, E. A. Investigation of flux influence on structure of foamed slag glass with a high content of slag waste. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Т. 7. № 6. С. 136-146.

18. Karandashova, N. S. Analysis of Influence of Foaming Mixture Components on Structure and Properties of Foam Glass . *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 262. P. 468-475.

19. Jokūbaitis, A. Influence of technological and environmental factors on the behaviour of the reinforcement anchorage zone of prestressed concrete sleepers. *Construction and Building Materials*. 2016. V. 121. P. 507-518.

20. Olmedo, F. I. Experimental Study of Multilayer Beams of Lightweight Concrete and Normal Concrete. *Procedia Engineering*. 2017. V. 172. P. 808-815.
21. ДСТУ Б В.2.7-233:2010. Будівельні матеріали. Суміші будівельні рідкімодифіковані. Загальні технічні умови. [Чинний від 2011-01 -01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 15 с.
22. ДСТУ Б В.2.6-36:2008. Конструкції будинків і споруд. Конструкціїзовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Класифікація і загальні технічні вимоги. [Чинний від 2009-06-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 20 с.
23. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. [Чинний від 2017-05-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2017. 31 с.
24. Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року. Кабмін України. 29 грудня 2011 року. <https://www.epravda.com.ua/news/202/12/30/68/096>
25. Ратушняк Г.С., Бікс Ю.С., Лялюк О.Г., Лялюк А.О. Алгоритм реалізації проекту управління імовірністю теплової відмови теплоізоляційної оболонки будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. №1(26). с. 140-146.
26. Гільчук А.В., Халатов А.А. Теорія теплопровідності, ч. 1: навч. посібник, Київ, КНУ. 2017. 86 с.
27. Douzane, O.; Promis, G.; Roucoult, J.-M.; Le, A.-D.T.; Langlet, T. Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations. *J. Build. Eng.* 2016, 8, 91–98.
28. Установка для визначення теплопровідності будівельних матеріалів: пат. 141390 Україна: МПК G01N 25/18, 20.Nou201908718; заявл. 19.07.2019; опубл. 10.04.2020, Бюл. №7, 5 с.
29. Риндюк С. В., Дудар І. Н. Енергоефективні матеріали та конструкції для теплового захисту будівель і споруд. *Сучасні технології матеріалів і конструкції в будівництві* : міжнародний науково-технічний журнал. Вінниця, 2017. № 2. С. 31–35.