

Л. Й. Дворкін

Заслужений діяч науки і техніки України

Академік Академії будівництва України

Доктор технічних наук, професор

ЛЕГКІ БЕТОНИ

Навчальний посібник

Л.Й. Дворкін
Заслужений діяч науки і техніки України
Академік Академії будівництва України
Доктор технічних наук, професор

ЛЕГКІ БЕТОНИ

Навчальний посібник

Київ 2024

УДК 666.973

Д24

Рецензенти:

Лаповська С.Д., доктор технічних наук, професор, Державний науково-дослідний інститут будівельних матеріалів та виробів;

Саницький М.А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельного виробництва Національного університету "Львівська політехніка".

*Рекомендовано вченою радою Національного університету
водного господарства та природокористування
(Протокол №10 від 25 жовтня 2024 р.)*

Дворкін Л.Й.

Д24 Легкі бетони: навчальний посібник. – Київ: Каравела, 2024.
225 с.

ISBN

У навчальному посібнику розглянуто комплекс питань, що стосується технології і властивостей легких бетонів. Приведені методи проектування складів окремих видів бетонів і контролю основних показників їх якості.

Навчальний посібник призначений для студентів будівельних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 666.973

ISBN

© Дворкін Л.Й., 2024

© Видавництво «Каравела», 2024

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕДМОВА	4
ВСТУП	5
1. ПОРИСТІ ЗАПОВНЮВАЧІ ДЛЯ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ	7
1.1. Пористі заповнювачі з природної сировини.....	7
1.2. Пористі заповнювачі на основі золашлакових відходів.....	23
1.3. Пористі заповнювачі на основі металургійних шлаків.....	43
1.4. Органічні пористі заповнювачі.....	57
2. ЛЕГКІ БЕТОНИ НА НЕОРГАНІЧНИХ ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ	63
2.1. Властивості бетонів на неорганічних пористих заповнювачах.....	63
2.2. Проектування складів легких бетонів.....	81
3. ЛЕГКІ БЕТОНИ НА ОРГАНІЧНИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ	107
3.1. Полістиролбетон.....	107
3.2. Матеріали на основі деревних відходів та мінеральних в'язучих.....	116
3.3. Тирсобетон і ксилоліт.....	131
3.4. Матеріали на основі гідролізного лігніну і целюлозно-паперового виробництва.....	139
4. КРУПНОПОРИСТІ І НІЗДРЮВАТІ БЕТОНИ	144
4.1. Крупнопористі бетони.....	144
4.2. Ніздрюваті бетони.....	150
4.3. Пінобетон на малоклінкерному шлакопортландцементі.....	167
4.4. Пінобетон на основі гіпсових в'язучих.....	172
5. КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ	179
ЛІТЕРАТУРА	224

ПЕРЕДМОВА

На сучасному етапі розвитку будівельної галузі все більшу роль відіграють легкі бетони, вироби і конструкції на їх основі. Їх переваги є особливо важливими для розв'язування проблем ресурсо- та енергозбереження при зведенні будівель різного призначення.

У навчальному посібнику системно висвітлюються технологічні основи отримання легких бетонів на пористих заповнювачах і ніздрюватих бетонів, їх будівельно-технічні властивості. Значна увага відводиться застосуванню техногенної сировини у виробництві заповнювачів для легких бетонів, методам проектування складів легких бетонів із заданими властивостями, контролю їх якості.

У посібнику знайшли певне відображення розробки наукових досліджень, виконаних у Національному університеті водного господарства та природокористування на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства.

Основна задача даного навчального посібника поповнити рекомендовану для студентів будівельних спеціальностей навчальну літературу з такого важливого розділу як технологія легких бетонів. Автор намагався доступно і лаконічно викласти основні питання, що стосуються даного важливого розділу при вивченні програмних питань з Будівельного матеріалознавства і Технології бетону та залізобетонних виробів.

Автор вдячний рецензентам посібника за цінні поради та зауваження, що були враховані, а також інженерам Киц Г.В. та Мацько Л.А. за технічну допомогу при підготовці посібника до видання.

ВСТУП

Технологія легких бетонів бере початок у глибоку давнину. Ще Пліній пропонував змішувати 1 ч. вапна, 2 ч. пуццолани і 1 ч. товченого туфу. Цей рецепт протягом багатьох століть застосовувався під час зведення гідротехнічних споруд. У 1917 р. американцю Хейду було видано патент на виробництво спучених глини та сланцю, прообразів пористих заповнювачів типу керамзиту. Застосування легких бетонів на пористих заповнювачах набуло найбільшого розвитку в розвинених країнах. Область їх застосування охоплює велику номенклатуру теплоізоляційних, конструкційно-теплоізоляційних виробів та несучих конструкцій. Легкі бетони стають одним із основних стінових матеріалів. Вони застосовуються також у промисловому будівництві, в автодорожніх мостах, у дорожніх та аеродромних покриттях та ін. У розвинених країнах є досвід застосування легкого бетону в будинках висотою до 200 м, на Алясці через р. Канаї споруджений чотирипролітний керамзитозалізо-бетонний міст.

До легких відносяться бетони, середня густина яких не перевищує 2000 кг/м^3 . Легкі бетони класифікують за структурою на щільні, поризовані, крупнопористі та ніздрюваті. У бетонах *щільної структури* матрицею, що цементує суміш пористих наповнювачів, є цементний камінь з об'ємом втягнутого повітря до 6%. При ступені порізації 6...25%, що досягається введенням мікропіно-і газоутворюючих добавок, структуру легкого бетону відносять до *поризованої*. Бетони з рівномірно розподіленими порами (комірками), що складають до 80...85% об'єму і утвореними за допомогою піно-і газоутворювачів, називають *ніздрюватими*. Бетони *крупнопористої структури* утворюються за рахунок відсутності у складі бетонної суміші дрібного заповнювача при вмісті цементного каменю, достатньому лише для склеювання крупного заповнювача без заповнення міжзернових пустот. До крупнопористих за властивостями близькі бетони нещільної структури, що отримуються при неповному ущільненні бетонної

суміші або при малій кількості дрібного заповнювача та обмеженому об'ємі цементного каменю. Найбільш поширені легкі бетони на пористих неорганічних заповнювачах. Поряд з неорганічними для отримання легких бетонів знаходять застосування органічні заповнювачі переважно у вигляді продуктів і відходів деревообробки (тирса, стружка, тріска та ін.). На їх основі виготовляють арболіт, фіброліт, тирсобетон та інші.

За призначенням легкі бетони поділяють на *теплоізоляційні*, *конструкційно-теплоізоляційні* та *конструкційні*. Розрізняють також спеціальні види легких бетонів відповідно до умов їх експлуатації – жаростійкі, декоративні, хімічно стійкі та ін.

Найбільше застосування в будівництві отримали конструкційно-теплоізоляційні легкі бетони. Вони використовуються для виготовлення стінових панелей, плит перекриття та інших конструкцій у житлово-цивільному та промислового будівництві.

Теплоізоляційні бетони застосовують для теплової ізоляції конструкцій і споруд. Вони характеризуються середньою густиною 300...500 кг/м³, міцністю при стиску 1,5...2,5 МПа, теплопровідністю 0,12...0,24 Вт/м·°С. На основі конструкційно-теплоізоляційного бетону виготовляють огорожуючі конструкції будівель, його густина 500...1400 кг/м³, міцність при стиску 3,5...10 МПа, теплопровідність 0,17...0,40 Вт/м·°С. Конструкційний бетон має густину 1400...1800 кг/м³, міцність при стиску 15...50 МПа, теплопровідність 0,4...0,58 Вт/м·°С. Він застосовується для несучих конструкцій будівель та споруд.

1. ПОРИСТІ ЗАПОВНЮВАЧІ ДЛЯ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ

До *пористих заповнювачів* відносять сипучі матеріали з насипною густиною у висушеному стані не більше 1200 кг/м³ при крупності зерен до 5 мм та не більше 1000 кг/м³ при крупності зерен від 5 до 40 мм. При виборі крупного пористого заповнювача враховують допустиме співвідношення між насипною густиною крупного пористого заповнювача і середньою густиною легкого бетону (табл. 1.1).

Пористі заповнювачі поділяють на природні та штучні.

Таблиця 1.1

Граничні відношення насипної густини крупного пористого заповнювача до середньої густини легкого бетону

Середня густина легкого бетону у висушеному стані, кг/м ³	Щільний легкий бетон	Малопіщаний легкий бетон	Безпіщаний (крупнопористий) бетон
До 800	0,4	0,55	0,6
900...1100	0,45	0,6	0,65
1200...1400	0,5	0,65	0,7
1500...2000	0,55	0,7	0,75

1.1. Пористі заповнювачі з природної сировини

Природні пористі заповнювачі. Природні пористі заповнювачі отримують подрібненням і фракціонуванням пористих гірських порід (пемза, вулканічний шлак і туф, пористий вапняк, вапняк-черепашник, вапняковий туф та ін.), а також із відходів розпилювання каменів і дроблення.

Природна сировина за походженням і мінерало-петрографічною характеристикою поділяється на групи (табл. 1.2).

Пористі гірські породи мають різну пористість і відповідно середню густину. Наприклад, для пемзи середня густина знаходиться в інтервалі 300...600 кг/м³, вулканічного туфу – 700...1400 кг/м³, вапняка-ракушняка – 800...1800 кг/м³. Змінюється залежно від пористості також міцність гірських

порід. Вона коливається в широкому інтервалі від 0,4 до 30 МПа.

Таблиця 1.2

Основні види природної сировини для отримання пористих заповнювачів

Сировина	Характеристика
Природна сировина вулканічного походження	
Пемза	Пориста сипка порода губчастої чи волокнистої будови. Містить кисле вулканічне скло
Вулканічний шлак	Сипуча порода ніздрюватої чи губчастої будови, що складається з вулканічного скла
Вулканічний туф	Дрібнопориста порода, що складається із зцементованого вулканічного скла і попелу
Природна сировина осадового походження	
Пористі вапняки	Дрібнозернисті пористі породи. Містять, в основному, кальцити. Домішки: крем'янисті породи, глауконіт, доломіт та ін.

Характер пористості в гірських породах може бути різноманітним та мати широкий діапазон значень. Для туфів, наприклад, характерні переважно крупні макропори, а для діатомітів – найтонші мікропори, які важко розрізнити. Первинна пористість, що виникла у процесі формування породи, є зазвичай закритою та тонкодисперсною. Вона залежить від форми та розміру частинок, їх взаємного розташування та величини початкового тиску. Вторинна пористість, найчастіше відкрита, виникає на більш пізніх стадіях утворення породи при розчиненні чи заміщенні у ній окремих мінералів і, особливо, внаслідок подальшого вивітрювання.

Як важливий структурний елемент, пори спільно з мінеральними частинками беруть активну участь у формуванні властивостей гірських порід. Встановлено, що при пористості менше 1%, пружні та міцнісні властивості мінералів та гірських порід визначаються переважно їх мінеральним складом. При збільшенні пористості значення цих властивостей зменшуються відповідно до емпіричної залежності:

$$\lg \frac{P}{P_0} = a\Pi_2 - b\Pi_1, \quad (1.1)$$

де P і P_0 – властивості каменю відповідно з порами та без пор;

Π_1 та Π_2 – значення первинної та вторинної пористості;

a і b – емпіричні коефіцієнти.

За ступенем пористості гірські породи поділяють на три групи: низької ($\Pi < 5\%$), середньої ($\Pi = 5\dots 20\%$) і високої пористості ($\Pi > 20\%$).

Штучні пористі заповнювачі на основі природної сировини та відходів вуглезбагачення. До штучних пористих заповнювачів належать:

- керамзитовий гравій та пісок, а також їхні різновиди одержані випалюванням зі спучуванням підготовлених гранул із силікатних порід (глин, суглинків, глинистих сланців, аргілітів, трепелів та ін.);
- аглопоритові гравій та пісок, які одержані спіканням при випалюванні підготовлених гранул (зерен) із силікатних матеріалів і розподілом на фракції;
- аглопоритові щебінь та пісок, які одержані спіканням при випалюванні підготовлених гранул із силікатних матеріалів з подальшим подрібненням спеку і розподілом на фракції;
- спучений перліт, який одержано спучуванням при випалюванні підготовлених зерен із вулканічних водомістких порід (перліту, обсидіану та ін.);
- спучений вермикуліт, який одержано спучуванням при випалюванні підготовлених зерен із природних гідратованих слюд;
- сланцепорит – щебінь та пісок, які одержані спучуванням при випалюванні аргілітів, кристалічних та глинистих сланців;
- термоліт, який одержано при випалюванні без спучення щебеню чи підготовлених гранул крем'янистих порід (діатомітів, трепелів, опок та ін.) осадового походження.

Перелік основної природної сировини для виробництва пористих заповнювачів приведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Природна сировина для виробництва
штучних пористих заповнювачів

Сировина	Характеристика	Здатність до спучування	Рекомендоване виробництво
Природні глинисті породи			
Глини	Тонкоуламкові гірські породи різного генетичного походження, пластичності і хіміко-мінерального складу, містять більше 30% частинок, менших за 1 мкм	Спучуються при швидкому нагріванні до 1250° С	Керамзитові гравій і пісок
		Не спучуються чи слабо спучуються в цих умовах	Аглопоритові щебінь і пісок
Суглинки	Тонкоуламкові гірські породи. Малопластичні, містять від 10 до 30% частинок, менших за 1 мкм	Спучуються при швидкому нагріванні до 1250° С	Керамзитові гравій і пісок
		Не спучуються чи слабо спучуються	Аглопоритові щебінь і пісок
Аргіліти	Глини, які затверділи в результаті природного ущільнення, дегідратації, перекристалізації і цементації	Спучуються при швидкому нагріванні до 1250° С	Керамзитові гравій і пісок
		Не спучуються чи слабо спучуються	Аглопоритові щебінь і пісок

продовження табл.1.3

Сировина	Характеристика	Здатність до спучування	Рекомендоване виробництво
Глинисті і кристалічні сланці	Каменеподібні, без подрібнення не розмокають у воді, з чітко вираженою шаруватістю	Спучуються при швидкому нагріванні до 1250° С	Керамзитові гравій і пісок, сланцепорит
		Не спучуються чи слабо спучуються	Аглопоритові щебінь і пісок
Гідратовані слюдисті сланці	Містять гідратовану магнезійно-залізисту слюду (вермикуліт) в кількості 20-50%	Спучуються при нагріванні до 1250° С	Спучений вермикуліт, гравій і пісок пористі гранульовані
Крем'янисті і магматичні гірські породи			
Опалові (крем'янисті) породи	Малопластичні, з підвищеним вмістом кремнезему	Спучуються при швидкому нагріванні до 1250° С	Керамзитові гравій і пісок
		Не спучуються чи слабо спучуються	Термолитові щебінь і пісок
Вулканічне водомістке скло (перліт, обсидіан і т.ін.)	Вивержена гірська порода з місткістю більше 85% вулканічного скла	Спучується при нагріванні до 1250° С	Спучений перліт, гравій і пісок пористі гранульовані

Керамзит отримують випалом легкоплавких глин, що спучуються, головним чином, у вигляді гравію з розміром зерен від 5 до 40 мм (рис. 1.1). Освоєно також виробництво керамзитового щебеню та піску.



Рис. 1.1. Керамзитовий гравій

Спучування глини при випалі відбувається в результаті газовиділення, що має місце при реакціях відновлення оксидів заліза при їх взаємодії з органічними домішками, дегідратації гідрослюд та інших глинистих водомістких мінералів, дисоціації карбонатів. При випалі за рахунок утворення розплаву глини розм'якшуються, переходячи в т.зв. піропластичний стан, що робить можливим під дією газів, що виділяються, спучування гранул. При цьому важливим є забезпечення необхідного інтервалу спучування сировинної маси – різниці між температурою початку оплавлення поверхні гранул та його спучування.

Спучування сировини характеризують *коефіцієнтом спучування*:

$$K_{cn} = V_k / V_c, \quad (1.2)$$

де V_k – об'єм спученої гранули;

V_c – об'єм сухої гранули до випалу.

Як правило, коефіцієнт спучування глинистої сировини, придатної для виробництва керамзиту становить 2...4.

Спучування глин визначається їх хіміко мінералогічним складом. Найбільш доцільно використовувати монтморилонітові та гідрослюдисті глини, що містять не більше 30% кварцу, загальний вміст SiO_2 не повинен перевищувати 70%, Al_2O_3 – від 10 до 25%, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ – від 2,5 до 12%, CaO – не більше 6%, MgO – не більше 4%, SO_3 – не більше 1,5%, органічних домішок – не більше 3%.

Технологія виробництва керамзиту включає переробку вихідної сировини та отримання гранул, їх сушіння та випалювання, класифікацію та, за необхідності, часткове дроблення.

Поширеним способом виробництва керамзиту є пластичний спосіб при якому глиниста сировина переробляється в глинозмішувачах або вальцях і використовується для формування сирцевих гранул. Гранули після підсушування направляють в обертові печі. Якщо використовується каменеподібна глиниста речовина застосовують сухий спосіб при якому породу подрібнюють і направляють в обертову піч. Керамзит виготовляють також мокрим способом, при якому отримують у глинобвтанкахшлікер, який подають у шламбасейни, підсушують і направляють в обертові печі.

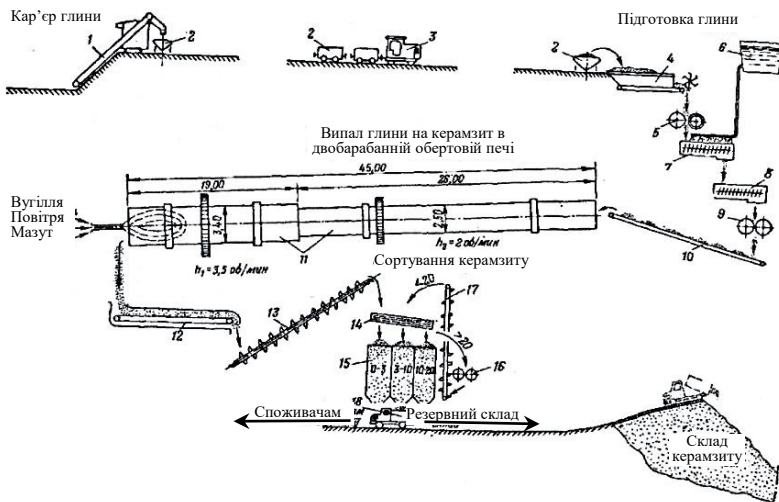


Рис. 1.2. Технологічна схема виробництва керамзиту:

- 1 – екскаватор; 2 – вагонетки; 3 – мотовоз; 4 – ящиківий подавач із билами; 5 – вальці гвинтові; 6 – бак з водно-сульфітно-спиртовою емульсією; 7, 8 – глинозмішувач; 9 – вальці тонкого помелу;
- 10 – стрічковий транспортер; 11 – двобарабнна обертова піч;
- 12 – пластинчастий транспортер-холодильник; 13 – пластинчастий похилий транспортер; 14 – віброгуркіт; 15 – бункери готової продукції;
- 16 – валкова дробарка; 17 – вертикальний елеватор; 18 – автовагон

До різновидів керамзиту відносять *шунгізитовий гравій глинозольний керамзит*, одержувані випалом зі спучуванням гранул, з шунгізитовмісних сланців, трепелів, золошлакової суміші або золи-винесення теплових електростанцій; *термоліт*, що отримується при випаленні без спучування щебеню або спеціально підготовлених гранул із кремнеземистих порід (діатоміту, трепелу, опок та ін).

Накопичений значний досвід використання вуглемістких порід для виробництва пористих заповнювачів. Експлуатація підприємств по виробництву штучних пористих заповнювачів в різних країнах показала, що використання відходів з вмістом вуглецю 5% для отримання керамзиту та аглопориту, дозволяє економити приблизно 50% технологічного палива.

Для забезпечення спучування вуглемістких відходів необхідно дотримуватися двох умов:

1) мінеральна частина відходів за хімічним та мінералогічним складом повинна відповідати складу легкоплавких глин, що здатні до спучування;

2) вміст вуглецю у сировинній суміші не повинен перевищувати 3%.

Значні коливання вмісту палива (5...25%), низька пластичність і зв'язуюча здатність, неоднорідність хімічного і мінерального складів відходів добування і збагачення вугілля ускладнюють переробку цього виду сировини за існуючими технологічними схемами для природних глин без додаткового коригування. Тому для отримання легкого заповнювача з використанням таких порід найбільш ефективним вважають використання методу агломерації. Крім простоти технології, він дає можливість ефективно використовувати паливо, що міститься у відходах.

Відходи вуглевидобування після видалення з них надмірної кількості вуглецю є перспективною сировиною для отримання керамзиту. Попередня обробка сировини (декарбонізація) проводиться у спеціальному апараті, який залежно від початкового вмісту вуглецю може бути або обертовим барабаном, або реактором киплячого шару. Процес декарбонізації протікає при температурах 800...900°C.

Отриманий напівфабрикат надходить в обертову піч для випалювання. Використання підігрітого матеріалу дозволяє досягти необхідної температури випалювання при меншій витраті палива. Подавання напівфабрикату в обертову піч з температурою 800...900°C дозволяє скоротити витрату палива порівняно з витратами палива при роботі печі в разі використання холодного матеріалу на 30...35%.

Вилежування відходів вуглевидобування в шихтозапасниках забезпечує повну гомогенізацію сировинної суміші за складом і властивостями, а попереднє зволоження порід сприяє руйнуванню їх структури, підвищуючи ефективність подальшої механічної обробки. Оптимальний зерновий склад сировинної суміші, що характеризується наявністю частинок розмірами не більше 2 мм, досягається при подрібненні шахтних порід в дві стадії з використанням дробарок ударної дії. Для отримання формувальної маси із заданими технологічними властивостями необхідний модуль крупності подрібнених відходів вуглевидобування знаходиться в межах 1,6...1,9.

Аглопорит отримують спіканням (агломерацією) глинистих або піщано-глинистих порід, а також відходів, що утворюються при видобутку, збагаченні та спалюванні твердого палива. Як добавки до сировинної суміші використовують кам'яне або буре вугілля, тирсу, лігнін. Після агломерації брили матеріалу дроблять і розсіюють на фракції щебеню та піску.

Пористі гравій та щебінь виготовляють фракцій: 5...10, 10...20 та 20...40 мм. Пісок поділяють на три групи: для конструкційно-теплоізоляційного, конструкційного та теплоізоляційного бетону. В залежності від насипної густини аглопорит поділяють на марки. Граничні значення марок по насипній густині для різних видів пористих заповнювачів наведено у табл. 1.4.

Відходи вуглезбагачення можна вважати як найбільш перспективну сировину для одержання аглопориту особливо в промислово-розвинутих регіонах України. В табл. 1.5 наведено рекомендований хімічний склад відходів вуглезбагачення для виготовлення аглопоритового щебеню та гравію в порівнянні з вимогами до глинистих порід.

Таблиця 1.4

Марки пористих заповнювачів за насипною густиною

Назва заповнювача	Мінімальна марка	Максимальна марка
Гравій і щебінь керамзитовий	250	600
Гравій шунгізитовий	400	700
Гравій аглопоритовий	500	900
Щебінь аглопоритовий	400	900
Пісок керамзитовий і шунгізитовий	500	1000
Пісок аглопоритовий	600	1100

Таблиця 1.5

Хімічний склад глинистих порід і відходів вуглезбагачення, придатних для виготовлення аглопоритового щебеню

Вихідна сировина	Заповнювач	Вид бетону	Вміст основних оксидів, %				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO+ MgO	SO ₃
			в межах		не більше		
Глиниста порода	Щебінь	Конструкційно-теплоізоляційні та конструкційні легкі бетони	55...85	8...20	8	20	3
Відходи вуглезбагачення		Те ж	45...65	15...35	15	12	3

Для забезпечення спікання шихти у відходах добування і збагачення вугілля повинно міститися близько 10 % палива (у перерахунку на умовне).

Одним з критеріїв, що характеризують придатність силікатної сировини для виробництва аглопориту, є *модуль плавкості*, значення якого для паливовмісткої сировини, придатної для виробництва аглопориту, повинні складати 4...20.

Величина модуля плавкості характеризується процентним співвідношенням оксидів:

$$M_n = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O} \quad (1.3)$$

Сутність процесу агломерації полягає в тому, що паливо у шихті, яке спікається, горить у тонкому горизонтальному шарі, внаслідок чого повітря, що надходить у зону горіння, нагрівається й інтенсифікує процес горіння палива шихти, а гарячі гази, що виходять із зони горіння, підсушують і нагрівають наступний шар шихти. Після вигорання палива зона горіння переміщається у шар шихти, що знаходиться нижче.

При одержанні із порошкоподібної та дрібнозернистої сировини методом агломерації (рис. 1.3) пористого конгломерату вихідну сировину змішують із подрібненим паливом, зволожують і гранулюють. Потім шихту, що складається з окремих зерен (гранул), подають на верхню робочу зону стрічкової конвеєрної агломераційної машини. На першій ділянці стрічки, що безперервно рухається, у верхньому шарі шихти запалюють паливо, після чого зона горіння просувається у товщу шихти за рахунок просмокування через неї повітря. Наприкінці робочої зони машини одержують готовий випалений продукт.

Відходи вуглезбагачення вважаються придатними як сировина для виробництва аглопориту, якщо в результаті випробувань будуть досягнуті наступні показники процесу спікання та якості готового продукту:

Вертикальна швидкість спікання, мм/хв	Не менше 5
Питома продуктивність агломераційної машини, м ³ /м ² год	Не менше 0,23
Насипна густина аглопоритового щебеню крупністю 10...20 мм, кг/м ³	Не більше 800
Насипна густина аглопоритового піску крупністю не більше 5 мм, кг/м ³	Не більше 1200
Міцність аглопоритового щебеню при стиску у циліндрі, МПа	Не менше 0,4

В процесі агломерації шкідливі домішки у вихідній сировині, наприклад сірка, навіть при забезпеченні оптимальних умов термообробки переходять в аглопорит у кількості не менше 14...15 % від початкового вмісту. На залишковий вміст сірки у готовому продукті впливає наявність у вихідній сировині оксидів лужноземельних металів, зокрема СаО.

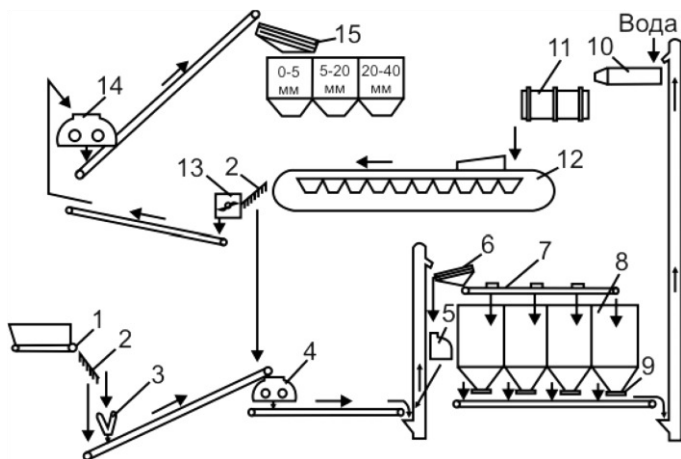


Рис. 1.3. Схема виробництва аглопориту із відходів збагачення горючих сланців:

- 1 – пластинчастий живильник; 2 – нерухома решітка;
 3 – шокова дробарка; 4 – валкова дробарка; 5 – молоткова дробарка;
 6, 15 – віброгрохоти; 7 – реверсивний стрічковий конвеєр з ножами;
 8 – бункери для зберігання запасу шихти; 9 – стрічкові живильники;
 10 – змішувач; 11 – гранулятор; 12 – агломераційна машина;
 13 – роторна дробарка; 14 – зубчаста дробарка

При агломерації відходів з високим вмістом палива необхідно створювати відповідні умови для його вигорання. Процес вигорання палива при агломерації легкоплавких силікатних матеріалів ускладнений через утворення при спіканні значної кількості розплаву. Тільки певне співвідношення у шихті тугоплавких та легкоплавких компонентів забезпечує нормальний режим її термообробки.

Не менш важливим фактором, що забезпечує нормальний перебіг процесу вигорання палива у шихті, є газопроникність шару, що спікається. Вона зумовлювана пластичністю та зв'язуючою здатністю вихідної сировини. На основі помірно пластичних порід при визначеному співвідношенні фракцій вихідної сировини (менше 0,3; 0,3...1,2; 1,2...2,5 мм) можуть бути отримані досить високі значення газопроникності шару, що спікається.

При виготовленні аглопоритового щебенюна основі відходів вуглезбагачення процесі їх переробки застосовують дробарки для двостадійного подрібнення з проміжним гуркотом та витратним бункером для отриманого продукту (крупність не більше 2,5 мм).

Для поліпшення грануляції непластичних і малопластичних порід доцільно вводити в шихту пластичний суглинок в кількості 5...20 % за масою. Для грануляції шихти в разі використання відходів вуглезбагачення поряд з барабанним можна застосовувати й тарілчастий гранулятор.

Рекомендовані параметри виробництва аглопоритових гравію та щебеню наведені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Рекомендовані параметри виробництва аглопоритових гравію та щебеню

Показники	Глиниста порода (глина, суглинок, супесь)	Відходи збагачення вугілля	Зола ТЕС
Висота шару, що спікається, мм	250...300	150...200	250...300
Температура, °С: сушіння підігріву запалювання	– – 1000...1200	– – 1000...1200	400...600 600...800 1000...1200
Розрідження, кПа, у період: запалювання спікання	0,6...1 2,5...4	0,6...1 2,5...4	0,5...0,8 1,5...2,5
Витрата повітря на 1 м ² площі агломераційної решітки, м ³ /с, у період: запалювання спікання охолодження	0,22...0,25 0,9...1 0,9...1	0,2...0,3 0,4...0,6 0,8...1,8	0,1...0,3 0,5...0,8 0,7...1

На основі відходів вуглезбагачення отримують в основному аглопоритовий щебінь з насипною густиною

400...700 кг/м³ і аглопоритовий пісок з насипною густиною 800...1000 кг/м³.

До найбільш легких пористих заповнювачів на основі природної сировини відносяться *спучені перліт та вермикуліт*.

Перліт відноситься до групи вулканічного скла, а вермикуліт – до групи гідрослюд. Обидві породи містять певну кількість зв'язаної води, яка при температурі 900...1100° С інтенсивно видаляється у виді пари.

Технологія виготовлення спученого перліту включає наступні операції: дроблення і розсів перлітової породи на фракції; попередню теплову підготовку (термопідготовку) за температури 300...400° С; короткочасний випал у вертикальних або оберткових печах при температурі 1000...1200° С; розсів готового продукту.

Перлітовий щебінь і крупний перлітовий пісок підвищеної щільності і міцності, що застосовується для виготовлення бетонів, отримують зазвичай в оберткових печах, а перлітовий пісок інших фракцій – у вертикальних печах.

При випаленні перліту коефіцієнт спучування (відношення розмірів зерен після спучування до початкових) зазвичай становить 6...15, вермикуліту – 15...40. Після випалу спучений перліт поділяється на пісок з насипною густиною 75...500 кг/м³ та щебінь густиною 200...500 кг/м³, теплопровідність яких знаходиться в межах 0,04...0,09 Вт/(м·°С). Марки перлітового щебеню та його водопоглинання приведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7

Міцність і водопоглинання перлітового щебеню

Назва показника	Марка щебеню за насипною густиною							
	200	250	300	350	400	500	600	700
Марка за міцністю, не менше	П15	П25	П35	П35	П50	П75	П100	П150
Водопоглинання, % за масою, не менше	125	100	75	65	50	30	25	20

Перлітовий пісок і щебінь використовують як заповнювач в бетонах і розчинах для виготовлення теплоізоляційних та конструктивно-теплоізоляційних виробів. Перлітовий пісок

використовують, крім того, для теплоізоляційних, а також вогнезахисних штукатурок при температурі поверхонь, що ізолюються, 200...870° С.

Технологія виготовлення *перлітоцементних виробів* складається з наступних операцій: підготовки та дозування сировинних матеріалів; приготування формувальної маси; формування виробів на пресі чи конвеєрі; теплової обробки та складування.

Залежно від марки перлітоцементні вироби мають наступні фізико-механічні властивості:

Марка.....	225	250	300	350
Теплопровідність, Вт/(м·°С), при середній температурі, °С:				
25±5.....	0,065	0,067	0,073	0,079
305±5.....	0,108	0,110	0,116	0,122
Границя міцності при згині, МПа, не менше.....	0,22	0,23	0,25	0,28

Промисловість випускає два види теплоізоляційних матеріалів на бітумному в'язучому – *перлітобітумні плити* і *бітумно-перлітову масу*.

Плити найбільше широко застосовують для ізоляції покрівлі промислових будівель. Розміри плит (мм): довжина – 500, 1000; ширина – 500; товщина – 40, 50, 60.

За густиною перлітобітумні плити поділяють на марки 200, 225, 250 та 300. Теплопровідність плит при температурі (25±3)° С, Вт/(м·°С), не більше: марки 200 – 0,076; марки 225 – 0,079; марки 250 – 0,082; марки 300 – 0,087. Границя міцності плит при згині не менше 0,15 МПа, марки 300 – не менше 0,19 МПа, міцність на стиск при 10%-ій деформації не менше 0,25 МПа. Вологість не більше 4% за масою; водопоглинання – не більше 5% за об'ємом; морозостійкість – не менше 25 циклів.

Бітумно-перлітову масу виготовляють шляхом змішування спученого перлітового піску з гарячим нафтовим бітумом марок не нижче БН-70/30. Отриману масу укладають на поверхні покрівельних покриттів, сталевих труб теплових мереж при

безканальному способі прокладання, або у формах для одержання виробів і ущільнюють у 1,6...2 рази. Співвідношення бітуму та спученого перліту в залежності від крупності перлітового піску 1:(8...14) за об'ємом, витрата бітуму 140...160 кг, піску 1,5...1,7 м³ на 1 м³ ущільненої маси.

За густиною бітумно-перлітову масу поділяють на марки 350 і 500.

Перлітофосфогелеві вироби складаються зі спученого перлітового піску (60...70% за масою) та рідкого скла густиною 1,3 г/см³ (40...30% за масою). Щоб забезпечити рівномірне твердіння виробів по всій товщині та знизити їх водопоглинання, до складу суміші вводять незначну кількість ортофосфорної кислоти та гідрофобізуючої (водовідштовхуючої) добавки ГКЖ-10 або ГКЖ-11.

Вироби випускають у вигляді плит, напівциліндрів (шкаралуп) та сегментів.

Характерна особливість спученого вермікуліту – луската будова. Його використовують у вигляді зерен, що мають крупність до 10 мм, насипну густину 100...200 кг/м³ і теплопровідність 0,055...0,065 Вт/(м·°С). Можлива температура застосування спученого вермікуліту вище, ніж перліту і досягає 1100°С.

Для виготовлення спученого вермікуліту з розміром зерен 5...10 мм сиру породу подрібнюють у молоткових дробарках. Випал вермікуліту відбувається в потоці димових газів при температурі 800...1100°С, що утворюються від згоряння рідкого або газоподібного палива.

Теплопровідність спученого вермікуліту під питомим навантаженням 0,01 МПа при середній температурі +25°С залежно від його крупності знаходиться в межах 0,098...0,14 Вт/(м·°С). Вироби з вермікуліту та різних сполучних призначені для теплової ізоляції будівельних конструкцій та промислового обладнання. Для виробів на портландцементі температура застосування вермікулітових виробів досягає 1100°С.

1.2. Пористі заповнювачі на основі золошлакових відходів

Загальна характеристика золошлакових відходів. При спалюванні твердих видів палива у топках теплових електростанцій утворюються зола у вигляді пилоподібних залишків, шлак та золошлакові суміші. Вони є продуктами високотемпературної ($1200\text{...}1700^{\circ}\text{C}$) обробки мінеральної частини палива.

В залежності від температурних умов утворення золи і паливних шлаків є можливим без плавлення, у присутності розплаву і при повному розплавленні вихідних компонентів. У першому випадку золи і шлаки утворюються при спалюванні низькокалорійних видів твердого палива. Одержання з розплаву характерно для гранульованих паливних шлаків. Найбільш характерне одержання паливних зол і шлаків у результаті взаємодії розплаву з твердими фазами.

Утворення шлаків і зол перших двох груп відбувається зазвичай у середовищі, що сприяє окислюванню органічних сполук та сульфідів, і присутності сполук заліза в тривалентному стані. Утворення відходів третьої групи відбувається у відновлювальному середовищі, що призводить до збереження сульфідної сірки і зростання вмісту двовалентних сполук заліза.

Зола. Зольна частина вугілля Донецького і ряду інших басейнів містить не більше $8\text{...}10\%$ CaO. Висококальцієву зольну частину із вмістом CaO $15\text{...}40\%$ має кам'яне і буре вугілля басейнів Середньої Азії та Сибіру, торф та горючі сланці. В останніх вміст у зольній частині CaO може досягати 60% .

Паливо спалюють у шарі над колосниковими решітками у подрібненому вигляді або при вдуванні у пилоподібному стані. Золи пилоподібного спалювання проходять високотемпературну обробку. Вони мають порівняно однорідний хімічний склад і незначний вміст незгорілих часток палива. Деяка частина золи осідає на трубах котла, підлозі і стінках топки, але основна її маса виноситься з димовими газами, уловлюється і накопичується у бункерах, звідки видаляється потоком води або

пневмотранспортом. На діючих ТЕС застосовують також систему гідровидалення для транспортування золошлакових сумішей у відвали. Для використання золи у виробництві будівельних матеріалів переважно застосовується система пневмовидалення (рис. 1.4), що дозволяє постачати золу споживачам у сухому стані, з меншим вмістом невивалених частинок і запобігати її змерзанню у відвалах взимку.

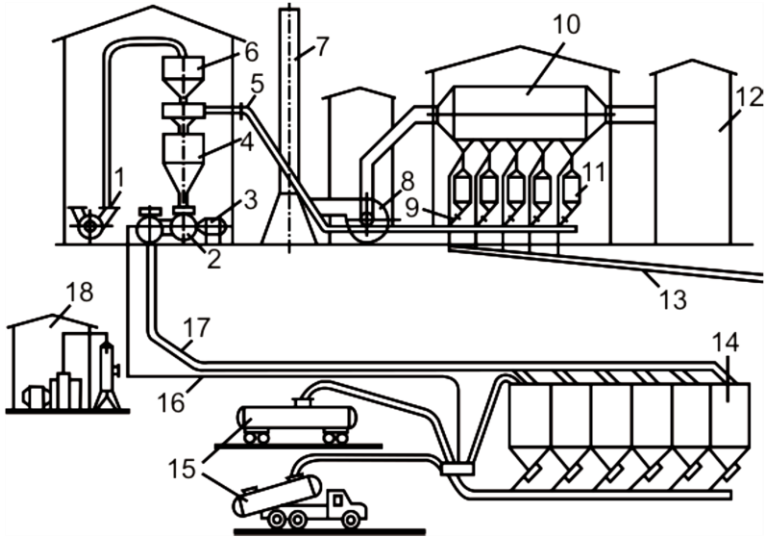


Рис. 1.4. Схема установки сухого відбору золи:

- 1 – вакуум-насос; 2 – пневмогвинтовий насос; 3 – електродвигун;
- 4 – бункер-накопичувач; 5 – водопровідвакуумний; 6 – осаджувальна камера; 7 – димар; 8 – димосос; 9 – пневматичні засувки;
- 10 – електрофільтри; 11 – золозбірники; 12 – котел ТЕС;
- 13 – трубопровід на відвал золи та шлаку; 14 – силосний склад золи; 15 – відвантаження золи на залізничний і автотранспорт;
- 16 – трубопровід стиснутого повітря; 17 – водопровід напірний;
- 18 – компресорна

Найбільш ефективними золовловлювачами є електрофільтри, ККД яких дорівнює 95...97 %.

Зола-винесення це тонкодисперсний матеріал, що складається переважно з частинок розміром 5...100 мкм. Хіміко-

мінералогічний склад золи-винесення відповідає складу мінеральної частини палива, що спалюється. Наприклад, при згорянні кам'яного вугілля зола складається з випаленої глинистої речовини з включенням дисперсних часток кварцового піску, при згорянні сланців — з мергелів з домішками гіпсу та піску. При випалюванні мінеральної частини палива дегідратується глиниста речовина й утворюються низькоосновні алюмінати та силікати кальцію.

Основним компонентом золи-винесення є склоподібна алюмосилікатна фаза, що складає 40...65 % усієї маси і має розмір частинок до 100 мкм. З кристалічних фаз у золах можуть бути присутні α -кварц і муліт, а при підвищеному вмісті Fe_2O_3 також гематит. Кількісне співвідношення між α -кварцом і мулітом визначається співвідношенням $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$. Зі збільшенням останнього вміст α -кварцу у кристалічній фазі зростає, а муліта зменшується. Відповідно дещо зростає активність зол за поглинанням вапна. Золи збагачені оксидами заліза більш легкоплавкі, у них утворюється більше скла.

Залежно від хіміко-мінералогічного складу зола може мати пуцоланові або гідравлічні властивості.

Пуцоланова активність пов'язана з хімічною взаємодією оксидів кремнію та алюмінію з гідроксидом кальцію, який виділяється при гідролізі клінкерних мінералів, з утворенням гідросилікатів та гідроалюмінатів кальцію. При цьому склоподібна фаза, що міститься в складі золи, сприяє її гідратації, а кристалічна є практично інертною.

Гідравлічна активність золи пов'язана з наявністю у її складі таких сполук як вільне вапно або ангідрит, що здатні до взаємодії з водою та з алюмосилікатним склом з утворенням водостійкого штучного каменю без введення додаткових активізаторів.

Скло у золі можна розглядати як компонент, що містить *аморфіти*– утворення, подібні за складом і структурою до відповідних кристалічних фаз, але з високою питомою поверхнею і неупорядковані глиноземисто-кремнеземисті прошарки між ними. Здатність склоподібної фази до гідратації і гідролізу пояснюється пухкою субмікроструктурою і відносно

високою проникністю аморфітів, що обумовлюється порожнинами між іонними угрупованнями. Активність склоподібної фази визначається співвідношенням глинозему і кремнезему, чим воно більше, тим легше йде процес гідратації зольного скла у лужному і в сульфатно-лужному середовищах. У нейтральному середовищі зольне скло є стійким. На активність кальцієво-алюмосилікатного скла, що міститься у золі, позитивно впливають домішки оксидів магнію, заліза і деяких інших елементів.

Певну активність у золі, поряд зі склоподібною фазою, має дегідратована й аморфізована глиниста речовина. Вона залежить від мінералогічного складу глин, що входять у мінеральну частину палива, і підвищується при тепловій обробці. Із підвищенням у золі вмісту аморфізованої глинистої речовини збільшується її водопотреба.

Якщо мінеральна частина палива містить значну кількість карбонатів, то в золі утворюються низькоосновні силікати і ферити кальцію, що здатні вступати у взаємодію з водою.

У невеликій кількості зола містить наступні домішки: вільні оксиди кальцію і магнію, сульфати, сульфіді й ін.

У золі, зазвичай, є вуглець у вигляді різних модифікацій коксових залишків. Їх вміст залежить від виду палива, що спалюється: для бурого вугілля і горючих сланців він менше 4 %, кам'яного вугілля – 3...12, антрациту – 15...25 %. Вміст невипалених частинок у тонкодисперсних фракціях золи менше, ніж у грубодисперсних.

Хімічний склад золи-винесення коливається в залежності від родовищ вугілля. Середній вміст головних оксидів у золі різних ТЕС, %: SiO_2 – 37...63; Al_2O_3 – 9...37; Fe_2O_3 – 4...17; CaO – 1...32; MgO – 0,1...5; SO_3 – 0,05...2,5; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ – 0,5...5. Втрати при прожарюванні, що характеризують вміст у золі невипалених частинок вуглецю, складають 0,5...30 %.

Важливими показниками якості золи є її дисперсність і гранулометричний склад. Дисперсність золи-винесення виражається її питомою поверхнею, що визначається методом повітропроникності, а також значеннями залишків на ситах при просіюванні. Прямої залежності між цими двома показниками

немає. Питома поверхня золи-винесення дорівнює 100...400 м²/кг. У багатьох випадках вона наближається до питомої поверхні цементу. Зола, що містить більшу кількість залишків невипаленого палива, має більш високі значення питомої поверхні.

Гранулометричний склад золи коливається у широких межах: розміри зерен 1...200 мкм. У золі-винесення вміст фракції більше 85 мкм зазвичай не перевищує 20%. Близько 50% частинок золи мають розміри 30...40 мкм. Більш крупна зола утворюється при підвищеному вмісті в мінеральній частині палива оксидів-плавнів CaO і Fe₂O₃. Дисперсність золи залежить від тонкості подрібнення пилоподібного палива. Також на дисперсність золи суттєво впливає режим спалювання палива. Важливим фактором є тип колектора для збору золи. Найбільш дисперсна зола вловлюється електрофільтрами.

Різні фракції золи мають різну істинну і середню густину, що пояснюється хіміко-мінералогічним складом і формою частинок. Крупні фракції мають підвищений вміст Al₂O₃. Густина частинок зменшується зі зростанням у них вмісту коксових частинок. Середня насипна густина золи дорівнює 600...1000 кг/м³, істинна густина – 1,8...2,4 г/см³.

Золи поділяють на *висококальцієві* (CaO>20%) та *низькокальцієві* (CaO<20%). В перших переважають кристалічні фази, а в других – скло й аморфізована глиниста речовина. Висококальцієві золи, у свою чергу, поділяють на *низькосульфатні* (SO₃<5%), що одержуються при спалюванні вугілля і торфу, і *сульфатні* (SO₃>5%) – при спалюванні сланців.

Інтегральною характеристикою хімічного складу золи є *модуль основності* M_о, що для основних зол дорівнює M_о>0,9; кислих – 0,6...0,9; над кислих – M_о<0,6. В основних золах сумарний вміст CaO+MgO досягає 50%, у над кислих – 12%. Останні є більш розповсюдженими.

За величиною питомої поверхні золи поділяють на: тонкодисперсні (S>400 м²/кг), середньодисперсні (200...400) і грубодисперсні (S<200). При насипній густині менше 800 кг/м³

золи вважаються легкими, 800...1000 – середньої густини і більш 1000 – важкими.

Відомі у світі класифікації золи базуються на американському стандарті ASTM C 618. Країни Європи працюють за загальним стандартом EN 450.

Американський стандарт ASTM C 618, як і канадський Can 3-A 23.5-M 86, базується на класифікації золи за джерелом її отримання та за хімічним складом. За цими критеріями золи поділяють на категорії F (отримують при випалюванні антрациту та бітумінізованого вугілля) і C (отримують при випалюванні малобітумінізованого вугілля). За хімічним складом до категорії F відносять золи із вмістом оксидів ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 70%, а для золи категорії C сума даних оксидів повинна бути не менше 50%.

Згідно сучасним уявленням при класифікації золи до уваги слід приймати не тільки джерела її отримання і хімічний склад, але й загальний вміст оксиду кальцію. За стандартом EN 450 золи запропоновано ділити на три категорії за вмістом CaO (низьким, середнім, високим), а також враховувати втрати при прожарюванні, які становлять залежно від типу золи від 6 до 12%.

При класифікації золи також слід акцентувати увагу на вмісті невипалених вуглецевих частинок, Fe_2O_3 та величині співвідношення оксидів $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Класифікація золи за вищевказаними критеріями наведена у табл. 1.8.

Крім головних оксидів, що визначають склад та структуру золи, потрібно враховувати наявність і другорядних оксидів, які можуть мати визначальний вплив на можливі галузі застосування відходів при їх утилізації під час виготовлення різноманітних будівельних матеріалів.

Таблиця 1.8

Класифікація золи за різними критеріями

Тип золи	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO, %	C, %	Fe ₂ O ₃	Вид використаного палива
Алюмосилі-катні золи	>2	<4	0...16	4...35	бітумінізоване вугілля
силіко-алюмінатні золи	1...2	4...20	<4	5...25	малобітумінізоване та бітумінізоване вугілля
кальцієві золи	<2	>20	<1	6...10	малобітумінізоване вугілля

Шлаки. Шлаки – основний вид відходів при спалюванні палива у вигляді кусків. При пилоподібному спалюванні вугілля шлаки складають 10...25% від маси утвореної золи. Шлаки утворюються в результаті спікання окремих частинок на колосникових решітках при температурі понад 1000°C або при охолодженні розплавленої мінеральної частини палива при температурі більше 1300° С.

У зв'язку з інтенсифікацією процесів спалювання твердого палива і переходом до використання у тепловій енергетиці багатозольних видів вугілля та сланців перспективним є застосування топок з рідким шлаковидаленням. Продуктами рідкого шлаковидалення з топок є *паливні гранульовані шлаки*, утворені в результаті швидкого охолодження водою мінерального розплаву. Рідке шлаковидалення забезпечується підігрівом повітря до температури близько 700°C або зниженням температури плавлення мінеральної частини палива при додаванні до неї флюсу.

На відміну від зол, шлаки, що утворені при більш високих температурах, практично не містять невипалене паливо і характеризуються більшою однорідністю.

Шлак видаляють гідравлічним або сухим способом. При гідравлічному способі, що має на даний час більше поширення, золи і шлаки змішуються.

Хімічний склад шлаків, як і зол, може змінюватися в широкому діапазоні – від надкислих ($M_o < 0,6$) до основних ($M_o > 1$). Більшість паливних шлаків характеризуються значною кількістю (20% і більше) оксидів заліза, що містяться переважно у закисній формі. Вміст склоподібної фази дорівнює 85...98%, а в основних шлаках може бути значно меншим. У кристалічній фазі можлива наявність муліту, геленіту, псевдоволластоніту, двокальцієвого силікату й інших мінералів.

Залежно від вмісту невипалених частинок вуглецю %, золи та шлаки ТЕС поділяють на 6 категорій: 1 – до 5; 2 – 6...10; 3 – 11...15; 4 – 16...20; 5 – 21...25; 6 – більше 25.

Золошлакова суміш – механічна суміш золи та шлаку, співвідношення між якими залежить від виду палива та технології його спалювання. В топках з твердим шлаковидаленням вміст золи в золошлакових сумішах складає 10...20%, в топках з рідким шлаковидаленням – 20...40%, а в циклонних топках – 85...90%.

Хімічний склад золошлакових відходів України дозволяє віднести їх до типу кислих та надкислих, в їхньому складі переважає аморфізована глиниста речовина з незначними включеннями кварцового компонента. Вміст золи в продуктах випалювання антрацитового кам'яного та бурого вугілля знаходиться в межах 15...50%, сланців – від 5 до 80%, паливного торфу – від 2 до 30%.

Дрібний заповнювач з золи ТЕС. Дрібний заповнювач у важкому і легкому бетонах частково або цілком може бути замінений золою. При виготовленні конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів класів В2,5...В7,5 зола, що використовується як пісок, повинна мати насипну густину до 1100 кг/м^3 та включати зерна розміром менше 0,16 мм у кількості не більше 90% маси. Вміст вуглецевих залишків у золі, яку отримують при спалюванні кам'яного вугілля й антрациту, повинен бути не більше 12%, бурого вугілля – не більше 5%.

Встановлено, що на довговічність бетону при використанні золи впливає, головним чином, склад паливних залишків, стійкість яких до окислювання та впливу вологи

залежить, у свою чергу, від мінералогічного складу вихідного вугілля.

Невипалені частинки вугілля переважно представлені залишками коксу та напівкоксу. Кокс та напівкокс є стійкими до окислювання на повітрі і поглинають незначну кількість вологи, внаслідок цього практично не піддаються об'ємним змінам при попереминому зволоженні-висушуванні або заморожуванні-відтаванні. Визначення вмісту і складу залишків невипаленого палива дає можливість оцінити доцільність застосування золи як дрібного заповнювача для бетону.

Властивості бетону суттєво залежать від вологості золи і вмісту в ній сірчистих і сірчаноокислих сполук. Кількість останніх у перерахунку на SO_3 не повинна перевищувати 3% за масою (у тому числі сульфідної сірки в перерахунку на SO_3 не більше 1%). Для одержання довговічного золобетону для армованих легкобетонних конструкцій золи ТЕС повинні також вміщувати знижену кількість глинистих частинок при підвищеному вмісті склофази (не менше 50...60%).

Властивості бетону у значній мірі залежать від гранулометричного складу заповнювачів. Оптимальним для легких бетонів є певне співвідношення між крупною (більше 0,3 мм) і дрібною (менше 0,08 мм) фракціями золи. Високі показники міцності бетону досягаються при використанні зол, у яких співвідношення між крупною і дрібною фракціями не перевищує 1:2,5, а вміст частинок середньої фракції дорівнює 50%.

Застосування в бетонах золи-винесення дозволяє замінити як частину піску, так і частину цементу. Кількість золи, що вводиться до складу бетону, може досягати 150...250 кг/м³ і більше. При виборі можливого вмісту золи в бетоні варто враховувати вплив золи на властивості бетонної суміші. У залежності від вмісту золи вплив її на водопотребу може бути несуттєвим або значним. Так, якщо введення до складу бетону 50...90 кг золи дисперсністю 300...450 м²/кг практично не позначається на водопотребі бетонної суміші, то подальше збільшення вмісту золи до 300 кг на 1м³ бетону призводить до

збільшення водопотреби бетонної суміші на 5...6% на кожні 50 кг золи.

Більш широке застосування знаходить зола як дрібний заповнювач у виробництві керамзитобетонів. Для забезпечення щільної структури цих матеріалів у піщаній фракції повинне бути 40...50 % за масою частинок розміром менше 0,15 мм. У зв'язку з дефіцитом керамзитового піску при виготовленні легких бетонів застосовують звичайний кварцовий пісок, що призводить до збільшення густини керамзитобетонів до 1400...1600 кг/м³ і відповідно до зниження термічного опору стін. Застосування золи у керамзитобетонах у кількості 180...200 кг/м³, а для однофракційного керамзиту й більше, поліпшує технологічні властивості легкобетонних сумішей та сприяє одержанню щільної структури бетону.

Повна заміна дрібного заповнювача золою найбільш доцільна в конструкційно-теплоізоляційних легких бетонах. Оптимальний вміст золи в конструкційно-теплоізоляційному керамзитобетоні дорівнює 300...450 кг/м³. Подальше збільшення її вмісту підвищує середню густину легкого бетону. При виготовленні легких конструкційних бетонів добавка золи в кількості до 100 кг на 1 м³ бетону може бути використана як мікронаповнювач.

Невипалений зольний гравій. Невипалений зольний гравій виготовляють у вигляді гранул кулькоподібної форми шляхом грануляції зволоженої суміші сухої золи з в'язучою речовиною та наступного твердіння у природних умовах або при тепловологісній обробці.

Для виробництва невипаленого зольного гравію використовують золи ТЕС сухого відбору, а також попередньо висушені відвальні золи та золошлакові суміші гідровидалення.

Зола повинна відповідати таким вимогам: вміст залишкового вуглецю для золи від спалювання кам'яного вугілля та антрациту – не більше 25%, для золи від спалювання бурого вугілля – не більше 5%. Вказаний вміст залишкового вуглецю істотно більший, ніж для виробництва випалених заповнювачів, що дає можливість збільшити використання золи. Вміст вільного оксиду кальцію має бути не більше 10%;

сульфідної сірки – не більше 1%, загальний вміст сірки в перерахунку на SO_3 – не більше 5%. Вологість золи або золошлакової суміші, що подається з відвалів на склад, не повинна перевищувати 3%, а питома поверхня золи повинна бути не менше $2500 \text{ см}^2/\text{г}$. Здатність до гранулювання шихти та характеристики сирцевих гранул є оптимальними при наявності у суміші до 30% частинок розміром менше 20 мкм.

При виробництві невивпаленого зольного гравію використовують як в'язучі портландцемент, вапно, гіпсові та гіпсоцементнопуцоланові в'язучі. Залежно від виду в'язучої речовини, твердіння гранул може відбуватися в пропарювальних камерах, автоклавах або на повітрі.

Існують різні варіанти технологій невивпаленого зольного гравію. Однією з технологій передбачено помел сировинної суміші (що складається з золи або золошлакової суміші та портландцементу у кількості 10...20%), зволоження шихти та одержання гранул в тарілчастих або барабанних грануляторах із наступним короткочасним пропарюванням гранул у камері протягом 4-х годин при температурі $90...95^\circ \text{C}$. Використання портландцементу обумовлює міцність гранул не тільки за рахунок власного твердіння, але й активізує процес гідратації золи та шлаку. Під час термообробки відбувається активація алюмосилікатних компонентів золи та їх хімічна взаємодія з гідроксидом кальцію з утворенням гідросилікатів та гідроалюмінатів кальцію змінного складу, а також гідросульфалюмінатів кальцію.

З метою підвищення міцності гранул у початковій строці (після першої доби твердіння у нормальних умовах міцність гранул може сягати $1...2 \text{ МПа}$) та прискорення твердіння при тепловологісній обробці використовують добавки-прискорювачі: сульфат натрію Na_2SO_4 , нітрит-нітрат-хлорид кальцію та інші солі неорганічних кислот, що вводять з водою в кількості 1...3% від маси в'язучої речовини.

Технологічна схема виготовлення заповнювача (рис. 1.5) складається з наступних етапів: підготовка та помел сировинної суміші, приготування розчинів добавок-прискорювачів

твердіння, зволоження сировинної суміші, грануляція, тепловологісна обробка, класифікація гранул за фракціями.

Насипна густина гравію становить 700...950 кг/м³, міцність при стиску у циліндрі – 0,6...0,8 МПа, що забезпечує можливість транспортування та складування готового продукту. Міцність зольного гравію продовжує зростати при повільному твердінні і досягає 5...6 МПа на 28-му добу, причому процес зростання міцності відбувається і при введенні гравію до складу бетону, що використовується при тепловологісній обробці виробів.

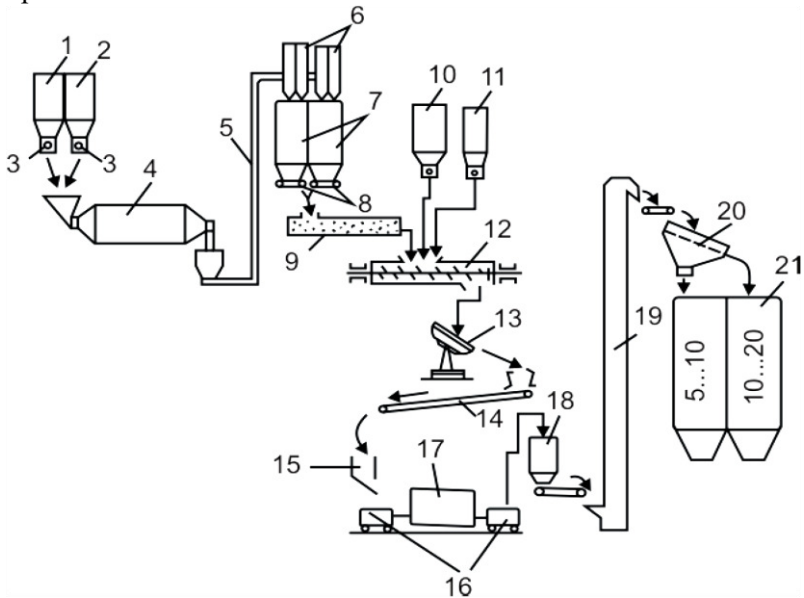


Рис. 1.5. Технологічна схема виготовлення невивпаленого зольного гравію на основі портландцементу:

- 1 – бункер в'язучої речовини; 2 – бункер сухої золи; 3 – дозатори;
- 4 – кульовий млин; 5 – система пневмотранспорту; 6 – циклони;
- 7 – бункер суміші в'язучої речовини з золою; 8 – живильник стрічковий;
- 9 – конвеєр гвинтовий; 10 – бак води з дозатором;
- 11 – бункер для рідких добавок з дозатором; 12 – змішувач двовальний;
- 13 – гранулятор тарілчастий; 14 – конвеєр стрічковий;
- 15 – бункер проміжний; 16 – вагонетки; 17 – камера пропарювальна;
- 18 – бункер приймальний; 19 – елеватор; 20 – грохот; 21 – силоси

Залежно від насипної густини невипалений зольний гравій поділяють за такими марками: 700, 800, 900, 1000. Середнє значення коефіцієнта форми зерен гравію має бути не більше 1,5. Фізико-механічні характеристики невипаленого зольного гравію, що визначають у віці 28 діб нормального тверднення, повинні відповідати таким показникам: міцність при стиску у циліндрі – 3...6 МПа; об'єм міжзернових порождин – 32...45%; істинна густина – 2,3...2,8 г/см³; густина зерен – 1,3...1,8 г/см³; водопоглинання – 17...25%; коефіцієнт розм'якшення – 0,8...1; морозостійкість – втрати маси після 15 циклів попереминого заморозування і відтавання – 0,5...10%.

При використанні гіпсоцементнопуцоланових в'язучих речовин, що швидко твердіють, отриманий заповнювач відразу після грануляції набирає достатню міцність і не потребує теплової обробки. Після 1 доби твердіння міцність при стиску у циліндрі становить 0,7...1,5 МПа, після 3 діб – 2,3...3,0 МПа.

Насипна густина зольного гравію може бути зменшена додаванням до сировинної суміші різних добавок: спученого перлітового піску, деревної тирси, відходів піноскла або газосилікату. Добавки додають у змішувач при підготовці маси до грануляції. Витрата цементу становить 60...100 кг/м³. Особливо легкий безвипалювальний зольний гравій має насипну густину 400...600 кг/м³, міцність при стиску у циліндрі в сухому стані – 1,0...1,6 МПа.

Виробництво невипаленого зольного гравію характеризується економією паливно-енергетичних ресурсів, витрати умовного палива у 2...3 рази нижчі, ніж при виробництві випалених штучних заповнювачів.

Використовують невипалений зольний гравій як крупний заповнювач для конструкційних і конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів.

Зольний випалений гравій. Сировиною для виробництва випаленого зольного гравію є золи теплоелектростанцій, в тому числі і з відвалів після їх гідровидалення.

Зола, що застосовується для виготовлення такого заповнювача, повинна відповідати наступним умовам: вміст невипалених вуглецевих частинок (НВЧ) – не більше 6%; вміст

Fe_2O_3 – не більше 65%; вміст $(\text{CaO}+\text{MgO})$ – не більше 8%. Зола, що містить більше 6% НВЧ, необхідно попередньо прожарити або ввести до її складу легкоплавку глину.

Глина, як добавка до золи в кількості від 10 до 20% (залежно від пластичності сировини), повинна відповідати наступним вимогам: вогнетривкість не більше 1320°C ; відношення $(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{RO}+\text{R}_2\text{O})$ – у межах від 3,5 до 10; число пластичності – не менше 7.

Технологія випаленого гравію передбачає сушіння і помел золи, її обкатування в гранули діаметром біля 15 мм. Для здійснення грануляції та забезпечення достатньої міцності гранул, золу змочують водним розчином ЛСТ або додають глину. Гранули підсушують та випалюють у коротких обертових печах, причому їх подають одразу у високотемпературну зону печі (температура біля 1200°C). Для підвищення пористості гравію до золи можна додавати деревну тирсу. Схему виготовлення випаленого зольного гравію наведено на рис. 1.6.

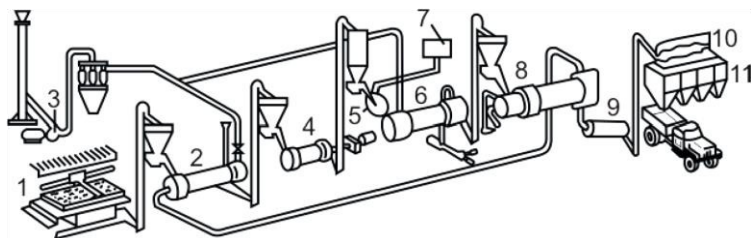


Рис. 1.6. Технологічна схема виготовлення випаленого зольного гравію:

- 1 – ящиківий живильник (з глинорозпушувачем); 2 – сушильний барабан контактного нагрівання; 3 – димосос; 4 – кульовий млин;
- 5 – тарілчастий гранулятор; 6 – сушильний барабан; 7 – вузол приготування рідкої добавки; 8 – обертова піч; 9 – холодильник;
- 10 – гравієсортувалька; 11 – бункери готової продукції

Можлива технологія гравію при вмісті палива в золі більше 6% прожарюванням золи, помелом, гранулюванням і випалюванням гранул в обертовій печі.

Випалений зольний гравій представлений гранулами кулькоподібної форми розміром від 5 до 40 мм. Поверхня гранул звичайно оплавлена і має бурий або сталевий колір, структура пориста. Насипна густина заповнювача – 300...800 кг/м³. Границя міцності випаленого зольного гравію при стиску у циліндрі приблизно відповідає вимогам до керамзитового гравію тієї ж насипної густини – 0,5...10 МПа. Вміст розколотих зерен – не більше 5%, втрата маси після 15 циклів попереминого заморожування і відтавання – не більше 10%, при прожарюванні – не більше 5%; водопоглинання – 3...13%.

Розроблена технологія одержання гравію із шлаків ТЕС випалюванням в киплячому шарі, яка включає підготовку шихти пластичним способом із подрібненого до питомої поверхні 2000...3000 см²/г шлаку в кількості 78%, пластичної глини – 20%, розчину ЛСТ – 2,0%. Готовий продукт характеризується таким зерновим складом: фракція більше 10 мм – 14%; 5...10 мм – 67%; менше 5 мм – 19%. Насипна густина складає 650...750 кг/м³; міцність при стиску у циліндрі – 2,76 МПа; водопоглинання – 7,5...10%.

Головне застосування зольний гравій знаходить при виготовленні конструкційно-теплоізоляційних бетонів. На основі зольного гравію можуть виготовлятися також конструкційні легкі бетони. Склади бетонів на зольному гравії наведені в табл. 1.9.

Таблиця 1.9

Склади легких бетонів на зольному гравії

Клас бетону	Витрата матеріалів на 1м ³ бетону					
	портланд-цемент марки 400, кг	зольний гравій, м ³	зольний пісок, м ³	зола (відвальна), м ³	Кварцовий пісок, м ³	вода, л
B3,5	140	0,95	0,10	0,35	-	170
B7,5	200	0,90	0,14	0,4	-	180
C18/ B22,5	400	0,85	-	-	0,5	170

Гравій та пісок на основі шлаків ТЕС. Гравій та пісок пористі шлакові отримують шляхом спучування при випалюванні гранул, які одержані із жорстких сумішей на основі сухих

тонкомелених порошків шлаків ТЕС, матеріалів, що містять паливо, і в'язучих речовин. Вміст оксидів заліза у складі шлаку повинен становити не менше 10% від маси, вогнетривкість шлаку не повинна перевищувати 1300° С. Істинна густина шлаку ТЕС – 2,45...2,65 г/см³, насипна густина – 1380...1400 кг/м³. Як матеріали, що містять паливо, використовують відходи збагачення кам'яного вугілля або інші відходи промисловості, що містять не менше ніж 20% органічної складової і характеризуються вогнетривкістю не більше 1200° С. Як в'язучий компонент зазвичай застосовують бентонітову глину.

Шихта для виробництва шлакового гравію складається з наступних компонентів, %: шлак ТЕС – 65...85; відходи вуглезбагачення – 10...15; бентонітова глина – 5...30. Сировинна суміш повинна мати число пластичності не менше 2...3; втрати маси при прожарюванні – 5...7%.

Процес виготовлення шлакового гравію передбачає здійснення таких операцій: сушіння та подрібнення сировини, змішування вихідних компонентів, грануляцію отриманої шихти, термічну обробку гранул, їх охолодження та класифікацію за фракціями. Технологічну схему одержання шлакового гравію наведено на рис. 1.7.

Гравій залежно від розміру зерен розділяють за фракціями 5...10 мм та 10...20 мм. Середнє значення коефіцієнта форми гравію не повинно перевищувати 1,1. За насипною густиною гравій розділяють за марками: 200, 250, 300, 350 та 400. Міцність його при стиску у циліндрі повинна бути 0,6; 0,9; 1,2; 1,6; 2,0 МПа відповідно вищенаведеним маркам за насипною густиною. Морозостійкість гравію повинна перевищувати 15 циклів.

Технічні характеристики шлакового гравію наведено в табл. 1.10.

Таблиця 1.10

Технічні характеристики шлакового гравію

Розмір фракції, мм	Насипна густина, кг/м ³	Міцність при стискуванні у циліндрі, МПа	Коефіцієнт форми зерен	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м ⁰ С)
10...20	200...300	0,8...2,0	1...1,2	0,112
5...10	300...350	2,0...3,0	1...1,1	0,162
2,5...5	400...600	–	–	–

Пісок залежно від насипної густини розділяють за марками 500, 600, 700.

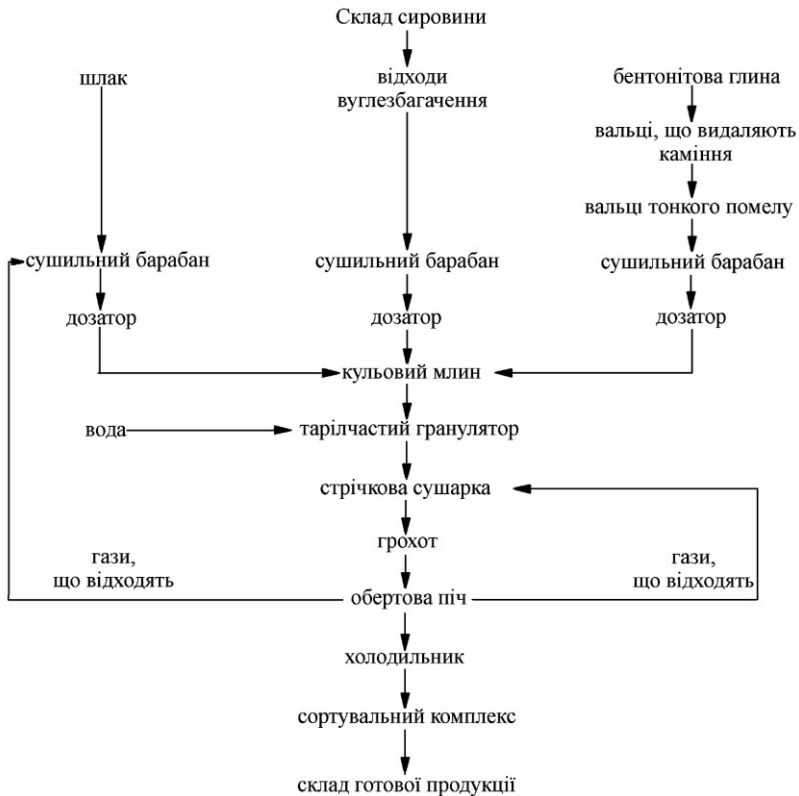


Рис. 1.7. Технологічна схема виготовлення шлакового гравію

Пористі шлакові гравій та пісок використовують як заповнювачі легких бетонів, для теплоізоляції підлоги та панелей покриттів житлових та цивільних споруд, а також для ізоляції трубопроводів.

Глинозольний гравій та пісок. Глинозольний гравій – це продукт спучування та спікання в обертівій печі гранул, що виготовлені із суміші глини і золи ТЕС, при вмісті золи 10...80% від усєї маси сировини.

Орієнтовний вміст окремих оксидів в глинозольній шихті повинен бути у межах, %: SiO_2 – 40...60; Al_2O_3 – 15...25; $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ – 7...15; CaO – 1...6; С – не більше 10.

Для виробництва глинозольного гравію використовують золу, яку постачають із золовідвалів від спалення торфу, бурого і кам'яного вугілля. Застосовують переважно золи з відвалів гідровидалення, тому що використання сухої золи-винесення ускладнює процес гомогенізації глинозольної шихти. Придатні золи, що містять SiO_2 – 33...57%, Al_2O_3 – 14...37%. З підвищенням ступеня дисперсності та кількості золи в складі сировинної суміші збільшується міцність керамзиту та зростає його середня густина. Дисперсність золи повинна становити не менш ніж $1000 \text{ см}^2/\text{г}$, вологість – не більше 30%, вміст неспаленого вугілля – до 10%, CaO – до 10%, сірчаніх і сірчаноокислих сполук – не більше 5%. Максимальна температура плавлення золи повинна дорівнювати 1380°C . При надлишковій кількості вуглецю гранули керамзиту оплавляються і якість заповнювача погіршується.

Регулювання властивостей глинозольного гравію може відбуватися за рахунок використання золи з визначеними характеристиками. Наприклад, для отримання глинозольного гравію низьких марок за насипною густиною (до 500) використовують золи дисперсністю від 1000 до $3000 \text{ см}^2/\text{г}$ із вмістом оксидів заліза у межах 12...20%; а для одержання глинозольного керамзиту підвищеної міцності потрібно застосовувати золи дисперсністю вище $3000 \text{ см}^2/\text{г}$, що містять Al_2O_3 більше 20%, вуглецю – до 5%.

З метою підвищення інтервалу спучування пористого заповнювача використовують золи ТЕС з температурою плавлення вище 1380°C .

Додавання глинистого компонента до складу шихти покращує її формувальні властивості, сприяє спаленню залишків вугілля у золі, що дає змогу використовувати відходи з підвищеним вмістом невипаленого палива.

Отримання глинозольного гравію спеціального призначення досягається за рахунок використання відповідних типів золи. Наприклад, для жаростійкого глинозольного гравію

застосовують золи з вмістом Al_2O_3 більше 25%; для кислотостійкого гравію придатні золи, що містять муліт; для лугостійкого гравію – золи ТЕС, що містять обмежену кількість силікатної скловидної фази (не більше 40%).

Коригуючи добавки у виробництві глинозольного гравію використовують для зниження або підвищення щільності і міцності, вогнетривкості, жаростійкості, стійкості заповнювача до агресивних середовищ, а також для регулювання реологічних властивостей шихти, її пластичності, в'язкості та адгезії. Добавки для коригування складу вводять у шихту або наносять на поверхню відформованих гранул.

При реалізації технології виготовлення глинозольного гравію (рис. 1.8) глиниста сировина повинна мати число пластичності вище 15, а глинозольна шихта – не нижче 7. Формувальна вологість глинозольної маси – 18...28%, причому у шихті для виготовлення гранул обмежується кількість включень вуглецю до 10%. Згідно з технологічними вимогами температура випалювання глинозольних сирцевих гранул не повинна перевищувати 1250° С, а інтервал спучування повинен становити більше 50 градусів.

Властивості глинозольного гравію залежать від виду та співвідношення глинистого і зольного компонентів у складі шихти. З підвищенням кількості золи у складі шихти збільшується насипна густина і відповідно зростає міцність глинозольного гравію.

Виробництво глинозольного гравію відбувається за технологічною схемою, що прийнята для керамзиту, і включає наступні технологічні операції: послідовне подрібнення й усереднення золи та глинистого компонента і їх змішування, введення добавок (рідких та твердих) у шихту, одержання сирцевих гранул, їх обпудрювання та випалювання в обертових печах.



Рис. 1.8. Технологічна схема виготовлення глинозольного гравію

Головною особливістю технології виготовлення глинозольного гравію є більш ретельна підготовка сировинної суміші. Для цього використовують двостадійне перемішування глинистої породи і золи в послідовно встановлених агрегатах. Золю змішують з глиною в глинозмішувачі з парозволоженням, глинозольна маса подається на вальці для переробки та гомогенізації, а потім в агрегат для грануляції. Зола, що використовується як добавка до глини, сприяє збільшенню кількості органічних домішок у складі сировини і підвищує її здатність до спучування. Виробництво глинозольного гравію може здійснюватися на діючих керамзитових підприємствах при

різних методах підготовки шихти. В цьому випадку керамзитові підприємства повинні бути обладнані закритим складом з окремим збереженням золи та глини; дозуючими пристроями для золи, глини, добавок; механізмами для усереднення двокомпонентної шихти.

Властивості глинозольного гравію повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-17-95. Насипна густина глинозольного гравію становить 400...700 кг/м³, міцність при стиску в циліндрі – 2,3...4,8 МПа, водопоглинання – 10...21%, морозостійкість – більше 15 циклів, коефіцієнт форми – 1,2...1,8; вміст розколотих зерен – до 15%; за зерновим складом глинозольний гравій може включати фракції 5...10 мм – 5...40% та 20...40 мм – 2...20%.

Технологія виготовлення глинозольного піску принципово не відрізняється від технології виготовлення керамзитового піску.

Глинозольний гравій та пісок використовують як пористі заповнювачі для легких бетонів класів від В3,5 до В30. Глинозольний гравій також можна застосовувати для виготовлення легких бетонів спеціального призначення.

1.3. Пористі заповнювачі на основі металургійних шлаків

Загальна характеристика металургійних шлаків. Металургія є однією з провідних галузей промисловості за обсягом мінеральної сировини, що перероблюється, та за питомою її витратою на тону кінцевої продукції. На основних технологічних стадіях виробництва металів утворюються відходи, хіміко-мінералогічний склад і фізико-механічні властивості яких дозволяють віднести їх до досить цінної сировини для виробництва будівельних матеріалів.

Нерудні породи та відходи збагачення є найбільшими за обсягом відходами металургії.

Металургійні шлаки є другим за обсягом відходом металургійних процесів.

Шлаки – це штучні силікатні матеріали, які утворюються під час виплавлення металів з руди внаслідок високотемпературної взаємодії руди, палива, плавнів і газового

середовища. Їхній хімічний склад і структура змінюються залежно від складу пустої породи, виду виплавленого металу, особливостей металургійного процесу, умов охолодження та ін.

Шлаки можуть бути отримані в результаті наступних процесів: без появи розплаву при спалюванні низькокалорійних видів палива та в алюмотермічних процесах; при частковому розплавленні вихідних компонентів у процесі спалювання палива; при повному розплавленні вихідних компонентів (у більшості металургійних процесів). В останньому випадку шлаки майже однорідні за складом і містять переважно склоподібну фазу. Необхідно відмітити, що основним засобом впливу на фазовий склад шлаків є регулювання швидкості охолодження розплаву. При підвищенні швидкості охолодження збільшується вміст склофазы, а, отже, і гідралічна активність шлаку.

Металургійні шлаки поділяють на *шлаки чорної такольорової металургії*.

Залежно від характеру процесу і типу печі шлаки чорної металургії поділяють на: доменні; сталеплавильні (мартенівські, конвертерні, бесемерівські, томасівські, електроплавильні); шлаки виробництва феросплавів; ваграночні шлаки. Найбільшим є вихід доменних шлаків, на 1 т чавуну він становить 0,6...0,7 т. При виплавці сталі вихід шлаків на 1 т значно менший: при мартенівському способі – 0,2...0,3 т, при бесемерівському і томасівському – 0,1...0,2 т; при виплавленні сталі в електропечах – 0,04...0,10 т.

Кількість шлаків феросплавного виробництва і ваграночних шлаків порівняно невелика і постійно зменшується з удосконаленням технологій виготовлення феросплавів та заміни ваграночних технологій виплавки на більш сучасні та ефективні.

Вихід шлаків у кольоровій металургії залежить від вмісту металу у вихідній шихті та технології виплавки. При плавленні у відбивних печах мідних концентратів з вмістом міді до 10...15 % вихід шлаків становить 10...20 т на 1 т металу, при плавленні в шахтних печах мідних руд з вмістом міді до 1...2 % – 50...100 т, при шахтній плавці окисленої нікелевої руди – 100...200 т.

Хімічний склад доменних шлаків представлений переважно такими оксидами, як CaO (29...30 %), MgO (0...18 %), Al₂O₃ (5...23%) і SiO₂ (30...40%). У невеликій кількості в них є оксиди заліза (0,2...0,6%) і марганцю (0,3...1%), а також сірка (0,5...3,1%). Сталеплавильні шлаки характеризуються більш високим вмістом оксидів заліза (до 22%) і марганцю (до 10%).

Для шлаків кольорової металургії характерний знижений вміст оксидів CaO+MgO (7...13%) і високий вміст FeO (21...61%). Крім основних компонентів, шлаки кольорової металургії можуть включати у невеликих кількостях метали – мідь, цинк, свинець, нікель і ін.

За хімічним складом шлаки, залежно від модуля основності, що визначається за формулою:

$$M_o = (CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3), \quad (1.4)$$

поділяють на основні ($M_o > 1$), нейтральні ($M_o = 1$) та кислі ($M_o < 1$). Ця характеристика є важливою при оцінці шлаків як сировини для отримання будівельних матеріалів.

Хімічний склад значно впливає на фізичні властивості шлакових розплавів, структуру й властивості затверділих шлаків. Так, збільшення вмісту оксиду кальцію в шлаках обумовлює підвищення температури їхнього плавлення і зниження текучості. При високій температурі (більше 1300°C) наявність CaO знижує в'язкість розплаву, а при низькій – підвищує. Зменшують в'язкість шлакового розплаву оксиди MgO, MnO, FeO, SO₃. До збільшення в'язкості розплавів приводять підвищення в них вмісту кремнезему вище 40%, а також вмісту оксиду алюмінію Al₂O₃. Знижують в'язкість розплаву газові включення.

Оксиди, що входять до складу шлаків, утворюють різноманітні мінерали. В результаті аналізу діаграм стану відповідних систем оксидів встановлена можливість існування в шлаках до сорока сполук, провідне місце серед яких займають силікати, алюмосилікати, алюмінати і ферити. У повільно охолоджених кислих доменних шлаках основними мінералами є анортит CaO·Al₂O₃·2SiO₂, діопсид CaO·MgO·2SiO₂, у нейтральних і основних – геленіт 2CaO·Al₂O₃·SiO₂, окерманіт

$2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$, мервініт $3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$, двокальцієвий силікат $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, тверді розчини окерманіту і геленіту – меліліти та ін. Фазовий склад сталеплавильних шлаків є більш складним ніж доменних. Такі компоненти шлаків як оксиди заліза і марганцю, сірка можуть утворювати тверді розчини з основними мінералами, а при значному вмісті можуть виділятися у виді самостійних фаз – залізистих, сульфідних, марганцевих сполук.

При повільному охолодженні шлаків поряд з утворенням мінералів можуть відбуватися і їхні поліморфні перетворення, що веде до розпаду і самочинного перетворення кусків шлаку на порошок.

Силікатний розпад наслідком поліморфного перетворення $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ в $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ при температурі нижче 525°C , що супроводжується збільшенням об'єму матеріалу приблизно на 10%. Ця форма розпаду спостерігається при вмісті оксиду кальцію в шлаках більше 44...46%. Запобігти такому розпаду можна швидким охолодженням шлаків та грануляцією.

Залізистий і марганцевий розпад викликані збільшенням об'єму при взаємодії сульфідів заліза або марганцю з водою і утворенням гідрооксидів. Таким чином розпадаються шлаки, які містять більше 3% FeO або більше 1% сульфідної сірки.

Розпад шлаків можливий також в результаті гідратації вільних оксидів CaO та MgO з утворенням гідрооксидів. Такі види розпаду називаються відповідно *вапняним* та *магнезіальним*.

Практично у всіх металургійних шлаках у тій або іншій кількості поряд із продуктами кристалізації утворюється склоподібна фаза. У відвальних повільно охолоджених основних шлаках кількість склофази невелика, а в гранульованих доменних може досягати 98%. Скло є термодинамічно нестійкою фазою, яка значною мірою визначає хімічну активність шлаків. Шлакове скло взаємодіє з водою значно інтенсивніше, ніж мінерали, що входять до складу шлаку.

З усіх видів металургійних шлаків у виробництві будівельних матеріалів найбільш широко застосовуються *доменні шлаки*, що обумовлено близькістю їхнього хімічно-мінералогічного складу до складу цементів, а також здатністю

при швидкому охолодженні набувати гідравлічної активності. Основну масу доменних шлаків одержують при виплавлнні передільних та ливарних чавунів.

Доменні шлаки є продуктами взаємодії флюсів (або плавнів, карбонатів кальцію і магнію) з пустою породою залізної руди і золюю коксу. Перелік основних процесів, що відбуваються при виплавлнні чавуну та отриманні шлаку, наведено на рис.1.9. Утворений шлак спливає на поверхню чавуну, оскільки є легшим. Шлак випускають з печі через льотки у ковші-шлаковози або (рідше) – подають безпосередньо на грануляцію чи використовують в інших спеціальних технологічних процесах (як то виготовлення волокна).

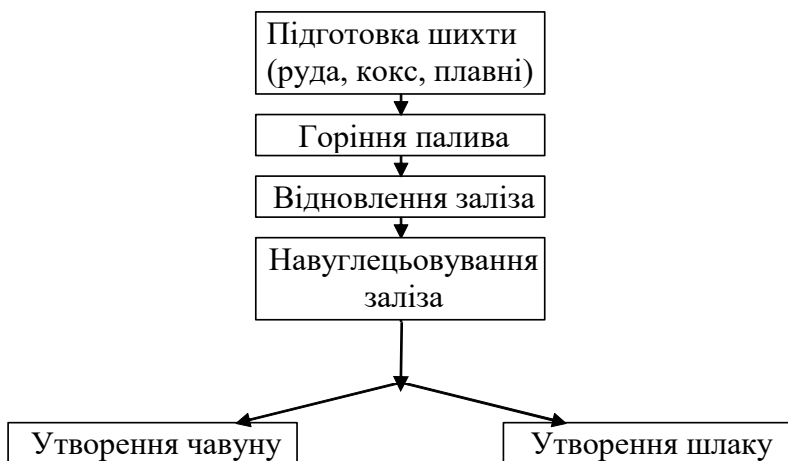


Рис. 1.9. Основні етапи процесу виплавлнення чавуну та утворення доменного шлаку

Різниця в складах залізних руд і коксу обумовлюють відповідні розходження в складі шлаків. Більшість доменних шлаків України є основними, тобто характеризуються модулем основності $M_o > 1$. У загальному випадку основні шлаки мають більшу гідравлічну активність, ніж нейтральні і кислі, а тому більш доцільні для використання в промисловості будівельних матеріалів.

Хімічна активність шлаків визначається коефіцієнтом якості K , який розраховується за формулами:

- при вмісті MgO до 10 %:

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + TiO}, \quad (1.5)$$

- при вмісті MgO більше 10 %:

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO + (MgO - 10)}. \quad (1.6)$$

Другими за обсягом отримання та використання є *конвертерні сталеплавильні шлаки*.

Гранульований пористий шлак. Основним способом переробки шлаків є грануляція, сутність якої полягає у швидкому охолодженні шлакових розплавів і утворенні склоподібних зерен розміром до 10 мм.

Найбільш ефективним способом грануляції можна вважати напівсухий, схема якого представлена на рис. 1.10.

Пористі різновиди гранульованого шлаку можна застосовувати як заповнювачі для легких бетонів, а також як теплоізоляційний матеріал при влаштуванні покрівель.

Міцність при стиску пористих відвальних шлаків – 2,5...40 МПа; середня густина шлаку у куску становить 400...1600 кг/м³. За зерновим складом пористий шлак відповідає крупному природному піску. Приблизно 50% його маси – це зерна крупністю більше 2,5 мм. Насипна густина гранульованого шлаку залежить від властивостей шлакового розплаву і технології грануляції та становить 600...1200 кг/м³.

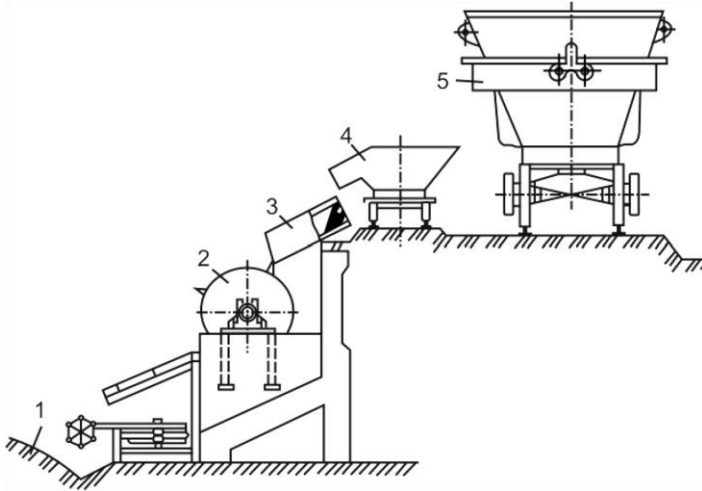


Рис. 1.10. Схема напівсухого способу грануляції доменного шлаку:
 1 – гранульований шлак; 2 – обертовий барабан; 3 – жолоб;
 4 – приймальний бункер; 5 – шлаковозний ківш

Шлакова пемза. Це штучний пористий заповнювач ніздрюватої структури (рис. 1.11), який одержують поризацією розплавів шлаків металургійного виробництва шляхом швидкого охолодження водою, повітрям або паром. Ефективність цього виду заповнювача пояснюється тим, що для отримання шлакової пемзи використовують готовий розплав, який має температуру близько 1300°C , а поризація його можлива за допомогою достатньо простих способів. В'язкість розплаву не повинна перевищувати $5 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Як вихідну сировину використовують переважно доменні шлаки, причому не відвальні, а ті, що зливаються з доменних печей у вогнянорідкому стані.



Рис. 1.11. Шлакова пемза

Існує декілька способів виробництва шлакової пемзи, але всі вони базуються на спучуванні шлакового розплаву водою. Промислове виробництво шлакової пемзи здійснюють чотирима способами: басейновим, бризкально-траншейним, гідроекранним та вододуттьовим.

Басейновий спосіб виробництва шлакової пемзи у перекидному басейні наведено на рис. 1.12. Шлаковий розплав виливають шлаковозним ковшем до перекидного басейну для спучування. Перекидний басейн складається з металевої чаші з перфорованим дном з такою місткістю, що дає змогу відразу прийняти весь розплав із шлаковозного ковша (до $16,5 \text{ м}^3$). Перекидання басейну відбувається за допомогою спеціальної гідравлічної системи. Знизу крізь отвори до басейну подається вода, на її фонтануючі струмені виливають шлаковий розплав. Розплав спучується і твердне, застигаючи у вигляді брил, після цього відвантажуються, піддається подрібненню та розсіванню за фракціями. Об'єм одержаної шлакової пемзи – до 25 м^3 . Режим поризації розплаву можна регулювати з урахуванням зміни його складу.

Бризкально-траншейний спосіб є найбільш простим. Розплав під час зливу до траншеї пронизується водяними струменями. Після закінчення зливу одержаний шар спученого шлаку витримують протягом 1,5 годин, поливають великою

кількістю води, а потім зливають наступний шар шлаку. Після заповнення траншеї поризована маса розроблюється екскаватором, подрібнюється і розсівається за стандартними фракціями. Наведений спосіб не можна вважати перспективним внаслідок низької якості отриманого продукту: шлакова пемза неоднорідна за структурою, розмір пор коливається в інтервалі 0,1...8 мм, насипна густина – від 700 до 900 кг/м³, міцність при стиску у циліндрі – 2...3,5 МПа.

Вододуттьовий спосіб передбачає поризацію розплаву за допомогою спеціальної конструкції струминних апаратів, що складаються з приймальної камери, робочого сопла, направляючого лотка і камери змішування (рис. 1.13).

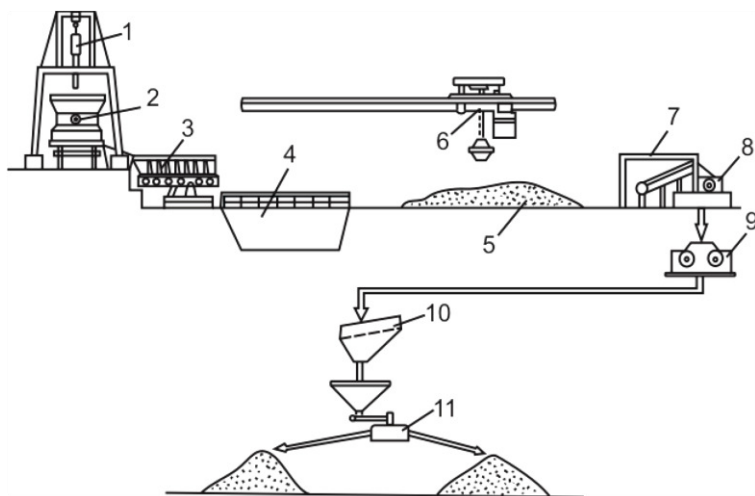


Рис. 1.12. Технологічна схема виробництва шлакової пемзи в перекидному басейні:

- 1 – машина для вдування порошкових добавок; 2 – шлаковозний ківш;
- 3 – басейн, що перевертається; 4 – приямок; 5 – проміжний склад;
- 6 – грейферний кран; 7 – приймальний пристрій дробильно-сортувального відділення; 8 – перший ступінь подрібнення;
- 9 – другий ступінь подрібнення; 10 – грохот; 11 – сепаратор для розподілу щебеню

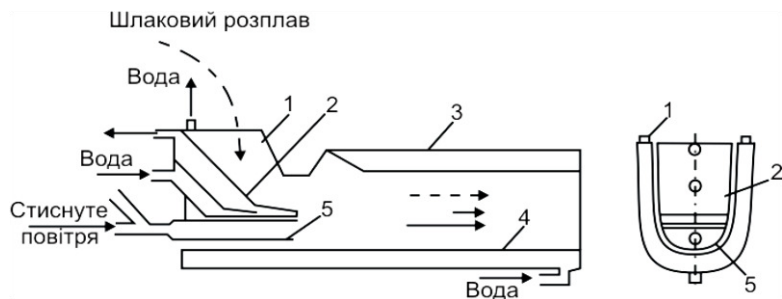


Рис. 1.13. Схема струминного вододуттєвого апарата:

1 – стінка приймальної камери; 2 – направляючий лоток; 3 – водяна сорочка; 4 – камера змішування; 5 – робоче сегментне сопло

Шлаковий розплав за допомогою жолоба попадає на лоток і розбивається на окремі краплі сильним струменем стиснутого повітря з розпиленою в ньому водою, потім рідкі гранули розплаву інтенсивно змішуються з водоповітряною сумішшю в камері змішування, спучуються і відкидаються на екран, звідки подаються в приймальні пристрої, де відбувається їх агрегація у крупні брили. Шлакова пемза, одержана таким способом, має однорідну дрібнопористу структуру з розміром пор до 1 мм.

Гідроекранний спосіб передбачає багаторазову дію на шлаковий розплав струменів води у відкритих жолобах, обладнаних екранами. При цьому регулюються процеси виділення газів із шлаку, швидкість кристалізації і зміна в'язкості розплаву.

Гідроекранний пристрій може мати два або три ступеня обробки (рис. 1.14).

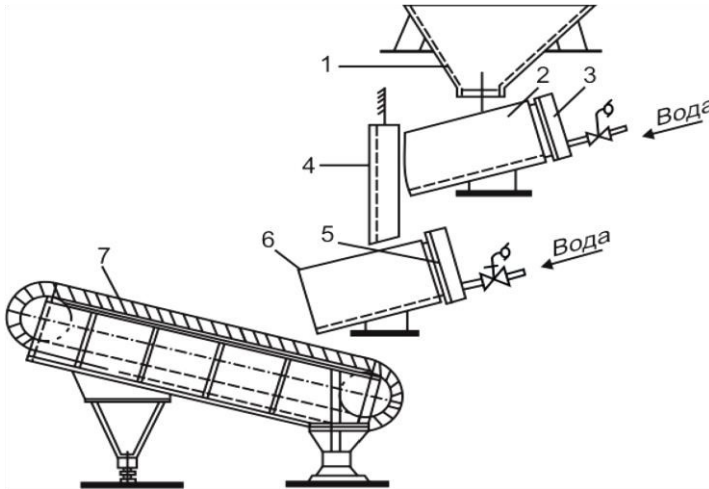


Рис. 1.14. Схема гідроекранного пристрою:

1 – приймальний бункер; 2 – перший жолоб; 3 – перша гідромоніторна насадка; 4 – екран; 5 – друга гідромоніторна насадка; 6 – другий жолоб; 7 – перевантажувач

В результаті дії води та перемішування в об'ємі шлаку газові бульбашки більшого діаметра руйнуються, а в'язкість розплаву набуває значень, при яких фіксуються бульбашки газів діаметром до 1 мм, що позитивно впливає на властивості отриманого матеріалу. При отриманні шлакової пемзи гідроекранним способом ківш з вогнянорідким доменним шлаком подають у приймальне відділення та встановлюють проти гідроекранного апарата. Кірку на поверхні розплаву руйнують копром. При нахилі ковша шлаковий розплав зливають у приймальний бункер гідроекранного апарата, звідки розплав подається у перший жолоб апарата під вплив струменів води, що виходять із сопел зі швидкістю 20...35 м/с (тиск води 1 МПа). Сопла розташовані паралельно внутрішній поверхні дна жолоба. Розплав при змішуванні з водою частково охолоджується і відкидається на перший екран. В цей час відбувається інтенсивне газовиділення і утворення пор у розплаві. Потім розплав, що підлягає поризації, стікає з першого екрана на другий жолоб, де таким же чином його вдруге оброблюють струменями води, охолоджують і відкидають на другий екран, на

якому відбувається подрібнення крупних пор, що залишилися, і подальше підвищення в'язкості матеріалу.

З другого екрана маса шлакового розплаву, що поризується, надходить на лоток накопичувача, що перевертається, звідти окремими брилами, які застигають, подається на жолобчасту стрічку конвеєра-перевантажувача, яка безперервно рухається. На перевантажувачі маса продовжує охолоджуватися і твердіти. Брили матеріалу при температурі 100...110° С перевантажувачами подаються на проміжний склад, який має кранову естакаду з мостовим грейферним краном.

Зі складу шлакову пемзу у вигляді брил та дрібняку завантажують у приймальні бункери дробильно-сортувального комплексу, де її подрібнюють у дві стадії: перша відбувається у цоківій дробарці, друга – у конусній. Подрібнений продукт розсіюють на вібраційних грохотах на три фракції: 0...5, 5...10 та 10...20 мм. Фракціоновану шлакову пемзу стрічковими конвеєрами подають на склад готової продукції. Одержана таким способом шлакова пемза, має однорідну дрібнопористу структуру з розміром пор до 1 мм; її насипна густина становить 600...700 кг/м³, міцність при стискуванні в циліндрі – 0,8...1,5 МПа.

Гідроекранний, басейновий та вододуттьовий способи дають змогу отримувати шлакову пемзу однакової якості у вигляді пористого щебеню і піску. Шлакопемзовий щебінь має зерна гострокутної форми з відкритими порами, відрізняється великою міжзерною пустотністю.

Найбільш перспективною можна вважати технологію одержання шлакової пемзи у вигляді гравію із закритими порами. Для спучування і диспергації розплаву використовують вдосконалений вододуттьовий апарат (водоповітряний гранулятор), в якому контакт з водою і спучування розплаву починається у приймальному жолобі.

Технологія одержання *гравієподібної шлакової пемзи* передбачає такі етапи (рис. 1.15): дисперговані частинки розплаву з повітряного гранулятора направляють на екран, де спучена піропластична маса розплаву з'єднується в крупні куски, а потім ще у рухомому стані оброблюється у барабанному холодильнику. В обертовому барабані з повздовжніми лопатями відбувається

додаткове спучування, руйнування брил на окремі зерна і їх обкатування, що надає їм гравієподібної форми. Вихід фракції 0...5 мм становить приблизно 30%, фракції 5...20 мм – не менше 50% і фракції 20...40 мм – близько 20%.

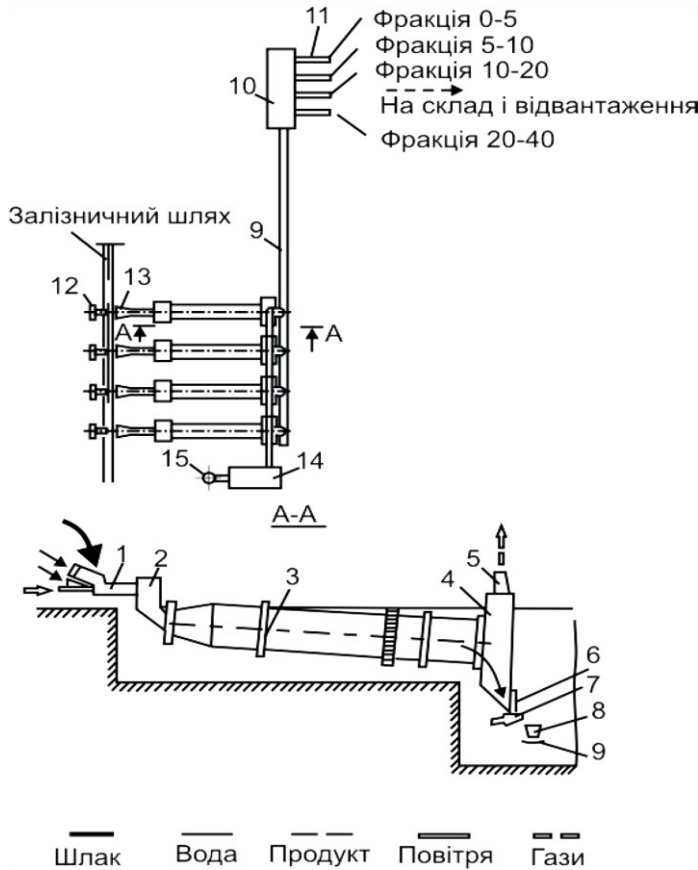


Рис. 1.15. Технологічна схема установки для виробництва гравієподібної шлакової пемзи:

- 1 – водоповітряний гранулятор; 2 – приймальна камера;
- 3 – барабанний холодильник; 4 – розвантажувальна камера;
- 5 – парогазоповітропровід; 6 – затвор; 7 – віброживильник; 8 – короб;
- 9 – конвеєр нефракціонованого продукту; 10 – грохот; 11 – конвеєр фракціонованого продукту;
- 12 – пристрій для пробивання кірки; 13 – приймальна ванна; 14 – газоочищення; 15 – витяжна труба

Показники якості гравієподібної шлакової пемзи суттєво вище, ніж у шлакопемзового щебеню.

Вдосконалення технології отримання шлакової пемзи може відбуватися шляхом застосування автоматизації для додержання заданого співвідношення “шлак-вода”, керуванням режимом охолодження маси, що підлягає поризації, сепарацією готового продукту за насипною густиною; обкаткою шлакової пемзи у барабанах, використанням спеціальних добавок, що сприяють регулюванню властивостей матеріалу в заданому напрямку.

Загальними властивостями, що визначають якість шлакової пемзи, є насипна густина, міцність та теплопровідність, а також морозостійкість. Вони визначаються складним комплексом факторів, найважливішими з яких є характер пористої структури, ступінь закристалізованості, мінералогічний склад.

Розміри пор шлакової пемзи залежно від способу її одержання коливаються від 0,04 до 4,5 мм, товщина стінок пор від 0,01 до 1,6 мм. Пористість матеріалу становить 52...78%, а водопоглинання – 10...53%. Насипна густина залежить від характеру пористості структури і міжзерновоїпустотності, що визначається формою та розміром зерен шлакової пемзи. Пустотність фракціонованого щебеню не повинна перевищувати 52%, середнє значення коефіцієнта форми зерен повинно становити не більше 2,5.

Шлакову пемзу виробляють у вигляді щебеню трьох фракцій: 5...10, 10...20 та 20...40 мм і піску (рядового з зернами крупністю менше 5 мм, дрібного – менше 1,25 і крупного – 1,25...5 мм). За насипною густиною щебінь із шлакової пемзи розподіляють за марками від 300 до 800, пісок – від 700 до 1000. Марки щебеню за міцністю залежно від марок за насипною густиною – від П15 до П50, що відповідають міцності при стиску у циліндрі від 0,5 до 1,5 МПа. Маркам за насипною густиною 900 та 1000 відповідають марки за міцністю П75 та П100 відповідно, тобто міцність змінюється від 1,5 до 2,5 МПа. Коефіцієнт форми зерен – не більше 2; об'єм міжзернових пустот – не більше 50%. Марку щебеню із шлакової пемзи за морозостійкістю визначають кількістю циклів попереминого заморожування та відтавання, при чому втрати маси не повинні перевищувати 8%. Морозостійкість щебеню повинна становити не менше 15 циклів.

Пісок з шлакової пемзи повинен мати марки за насипною густиною від 700 до 1000.

На основі шлакової пемзи виготовляють легкі бетони двох різновидів: конструкційно-теплоізоляційний, який має середню густину 1300...1600 кг/м³ при міцності 5...7,5 МПа та конструкційний з середньою густиною 1500...1800 кг/м³ та міцністю 10...20 МПа. Внаслідок меншої теплопровідності можливе використання шлакової пемзи для одержання бетону підвищеної міцності без погіршення його теплозахисних властивостей у порівнянні, наприклад, з керамзитобетоном: шлакопемзобетон середньою густиною 1400 кг/м³ характеризується такою ж теплопровідністю, як керамзитобетон густиною 1200 кг/м³.

Шлакова пемза марок 750...900 може використовуватися при одержанні високоміцних бетонів для несучих конструкцій. Але необхідно мати на увазі можливість виникнення корозії сталевій арматури в шлакопемзобетоні внаслідок вмісту у складі шлаку сірки. При виготовленні попередньо напружених конструкцій, особливо з дротяною арматурою, стійкість останньої повинна бути перевірена спеціальними дослідженнями.

1.4. Органічні пористі заповнювачі

Пористі заповнювачі на основі переробки відходів деревини. Для виробництва легких бетонів в якості пористих заповнювачів застосовують відходи переробки деревини: тирсу, технологічну тріску, дрібняк та стружку, а також інші відходи рослинних культур.

Тирса – один з найбільш масових відходів деревини, який утворюється при лісопилянні і деревообробці. Тирсу використовують при гідролізі на заводах з виробництва спирту і дріжджів; як пороутворюючу добавку при виробництві керамічної цегли, як дрібний заповнювач при виготовленні тирсобетону і гіпсотирсових плит та блоків. Фракційний склад тирси залежить від виду деревини й способу одержання та становить 0,2...10 мм. Частинки крупністю менш 0,2 мм відносяться до деревного борошна. Середня насипна густина тирси залежить від виду

деревини, фракційного складу і становить 175...225 кг/м³, пористість – 71...75% (табл. 1.11).

Спосіб отримання тирси впливає на її зерновий склад та фізичні властивості. Так при розпилюванні стовбурів на лісопилній рамі отримують тирсу крупністю до 7 мм майже кубічної форми. При обробці деревини на круглопилних верстатах отримують тирсу волокнистої структури розміром 1...2 мм. На відміну від вищенаведеної, тирса, що отримана при розпилюванні на лісопилній рамі, має більші розміри поперек волокна, що призводить до зниження міцності виробів.

Таблиця 1.11

Властивості деревної тирси в залежності від фракційного складу

Фракційний склад, %, часток крупністю, мм			Насипна густина у сухому стані, кг/м ³	Пористість, % від об'єму
20...10	10...5	5...2,5		
–	100	–	194,0	74,7
40	40	20	175,7	72,0
25	25	50	217,0	71,9
35	35	30	226,5	70,8

Технологічна тріска – це продукт первинного подрібнення кускових відходів і неділової деревини на дискових або барабанних рубальних машинах для подальшої переробки на дрібняк, стружку та волокнисту масу. Технологічна схема виробництва тріски наведена на рис. 1.16.

Вимоги до тріски визначаються можливими сферами її застосування. Звичайно, нормують розміри тріски, вміст гнилизни і трухлявості, кори та мінеральних домішок. При виготовленні волокнистої маси для нормальної роботи розмельних машин бажано, щоб куски тріски були приблизно однакові, для виготовлення деревно-волокнистих плит довжина тріски складає вздовж волокна – 20...25 мм, ширина поперек волокна – 15...30 мм і товщина – 3...5 мм; для виготовлення пресованих деревно-стружкових плит (ДСП) оптимальна довжина тріски складає 40 мм, а при екструзійному методі формування – 20 мм, оптимальна товщина тріски в обох випадках становить 30 мм; вміст кори при виробництві деревно-волокнистих плит (ДВП) не повинен бути більшим 15 мас.%, а деревно-стружечних (ДСП) – 12 мас.%. Вміст гнилизни (трухлявини) незалежно від способу виготовлення

допускається до 5 мас.%, а для деяких виробів взагалі не допускається; вміст мінеральних домішок – 0,3...1 мас.%

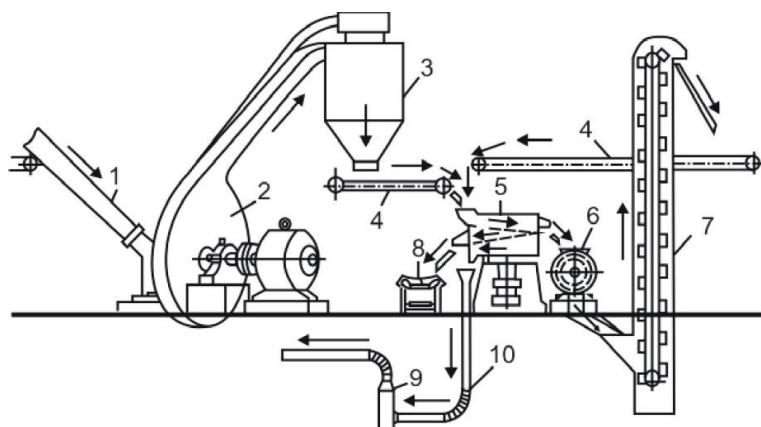


Рис. 1.16. Технологічна схема отримання технологічної тріски:

- 1 – деревина; 2 – рубальна машина; 3 – циклон; 4 – конвеєр;
- 5 – класифікатор; 6 – дезінтегратор; 7 – елеватор; 8 – ланцюговий конвеєр; 9 – приймач; 10 – пневмоконвеєр

Характер переробки тріски залежить від виду матеріалу або виробу. Для виготовлення арболіту застосовують дрібняк та стружку, для виготовлення ДСП – стружку, ДВП – волокнисту масу.

Дрібняк включає частинки деревини, що отримують при подрібненні на дробарках і молоткових млинах. Він повинен мати коефіцієнт форми (відношення довжини до ширини) в межах 5...10, товщину – 3...5 мм, максимальну довжину до 25 мм. Така форма і розміри дрібняку дозволяють наблизити значення деформацій деревини внаслідок зміни вологості уздовж і поперек волокон і зменшити їхній негативний вплив на процеси структуроутворення і міцність арболіту.

До подрібненої деревини відноситься також *стружка*. Її отримують спеціально на станках, або як відходи деревообробки. Стружка для виготовлення арболіту повинна мати товщину – 0,1...1 мм і довжину – 2...20 мм, для зовнішніх шарів ДСП – 0,1...0,2 і 10...20 мм, для середніх шарів – 0,4 і 40...60 мм відповідно. Деревина перед переробкою на стружку підлягає спеціальній підготовці, яка

включає сортування та виділення окремих порід, гідротермічну обробку, обкорування, видалення гнилі і трухлявини. Гідротермічна обробка деревини відбувається в автоклавах при тиску водяної пари 0,25...0,3 МПа іноді може бути передбачена обробка у воді з температурою – 70... 85° С. Такий вид обробки зменшує шорсткість стружки та вихід дрібних фракцій. Деревина, яка надходить для переробки на стружку, повинна мати вологість в межах 30...40%

Волокнисту масу отримують при переробці деревини механічними, хіміко-механічними та термомеханічними способами.

Механічна обробка ґрунтується на стиранні зовнішньої деревини в спеціальних дробарках, робочими органами яких є швидкооберткові рифлені диски або металеві ножі. Термомеханічна обробка ґрунтується на попередній обробці твердих відходів деревини водяною парою при тиску 0,8...1,0 МПа.

Хіміко-механічні способи обробки складаються з двох процесів – хімічної обробки тріски і механічного подрібнення. Хімічна обробка деревини полягає в тому, що при дії на неї водних розчинів спиртів, ацетону, лугів і кислот із складу деревини виводяться цукри і смоли, які негативно впливають на цементний камінь.

Для виробництва легких бетонів застосовують відходи як хвойних так і листяних порід деревини, причому віддають перевагу хвойним породам як таким, що мають менший вміст водорозчинних шкідливих дубильних та смолистих речовин, полісахаридів, які негативно впливають на довговічність цементних виробів. Для зменшення кількості таких речовин у відходах деревини вміст домішок кори повинен бути мінімальним, корисно витримувати деревину на складах протягом 4...6 місяців. Для зниження дії «цементної отрути» деревину просочують (мінералізують) розчинами хлориду кальцію, сульфату алюмінію, рідинним склом тощо.

Розроблено технології одержання будівельних матеріалів з *кори та одубини* – відходу виробництва дубильних екстрактів.

Дубильні екстракти використовуються у шкіряній промисловості, для обробки та "облагороджування" натуральної шкіри.

Дослідження підтвердили можливість організації виробництва арболіту на одубині фракції 2,5...10 мм. Отриманий на цих відходах арболіт має середню густину близько 650 кг/м³ і міцність 1,5...2 МПа.

Кількість кори на стовбурах дерев різних порід у відсотках до об'єму стовбурів складає: для сосни – 11...17, ялини – 9...16, берези – 13...15, осики – 11...18, дуба – 16...23, модрини – 22...24, кедра – 11...16, ялиці – 11...15%.

Механічні властивості кори залежать від вологості і змінюються в значних межах. Так, при збільшенні вологості кори сосни від 20 до 70% опір розтягуванню вздовж волокон знижується в 2,3 рази, поперек волокон – у 6,7 разів, опір зрізуванню поперек волокон – у 2,1 рази, вздовж волокон – у 3,8 рази.

Хімічний склад кори різко відрізняється від складу деревини. Ця відмінність обумовлюється їхньою різною анатомічною будовою. Кора містить значно більше екстрактивних речовин, ніж деревина.

Важливим джерелом сировини для виготовлення будівельних матеріалів є відходи сільського господарства рослинного походження – стебла бавовнику; соняшника, кукурудзи, костриця льону і коноплі, а також відходи від переробки круп'яних культур – лузга насіння соняшника, проса, гречки тощо.

Костриця – відхід первинної переробки стебел коноплі і льону після їх обробки в коноплетіпальних машинах, які відділяють волокно від подрібненої частини стебел, що задеревеніла. Довжина костриці становить – 10...70 мм, ширина – до 3 мм; товщина – 0,2...0,3 мм; середня густина – 100...120 кг/м³.

Оскільки луб'яні культури вимочують перед переробкою на заводах, костриця не містить екстрактивних речовин, і тому її не потрібно попередньо обробляти мінералізаторами.

Стебла бавовнику, кукурудзи і соняшника залишаються після збирання відповідних культур. В цих стеблах так само, як і в деревині, присутні водорозчинні екстрактивні речовини, вміст яких зменшується при тривалому вилежуванні. Вміст пачосів, клоччя і інших включень не повинен перевищувати 4%.

Як заповнювачі композиційних будівельних матеріалів крім розглянутих вище відходів, можуть бути використані рисова солома, рисова і соняшникова лузга.

Пінополістирол. Пінополістирол є газонаповненим матеріалом, що отримується з полістиролу, а також співполімерів стиролау низької щільності. Технологія пінополістиролу включає спінювання матеріалу парами низькокиплячих рідин. У промисловій практиці для спінювання полістиролу використовується водяна пара, яка проникає всередину гранул і сприяє спінюючій дії пентану, що міститься в ньому.

Спінений гранульований полістирол – продукт одно- або багаторазового спінювання суспензійних полістирольних гранул. Гранули для спінювання мають сферичну форму із середнім діаметром зерен 0,45...0,85 мм з антипіреновими добавками. Насипна густина спіненого полістиролу не повинна перевищувати 18 кг/м³. При техніко-економічному обґрунтуванні допускається використання гранул із насипною густиною не більше 20 кг/м³. Фракційний склад гранульованого заповнювача для полістиролбетону класів за міцністю В0,35 і вище повинен відповідати вимогам, зазначеним у табл. 1.12. Не допускається наявність зерен крупністю більше 10 мм.

Таблиця 1.12

Фракційний склад спіненого полістиролу

Розмір фракцій,мм	Вміст,% за масою
5...10	2...10
2,5...5	80...90
1,25...2,5	5...10

Для теплоізоляційного полістиролбетону з марками за крупністю менше М5 допускається застосування пінополістирольних гранул з крупністю понад 10 мм. Теплопровідність гранул у сухому стані не повинна перевищувати 0,035 Вт/(м·°С). Вологість гранул до виготовлення полістиролбетонної суміші не повинна перевищувати 15%. Гранули пінополістиролу мають низку позитивних особливостей. Вони не токсичні, не схильні до деформацій, вологостійкі, біологічно стійкі, стійкі до корозії та займання.

Для рівномірного розподілу полістирольних гранул у бетоні, покращення зчеплення з цементним розчином їх обробляють адгезійною добавкою.

2. ЛЕГКІ БЕТОНИ НА НЕОРГАНІЧНИХ ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ

2.1. Властивості бетонів на неорганічних пористих заповнювачах

Основними нормованими властивостями легких бетонів на основі неорганічних пористих заповнювачів є:

- міцність на стиск;
- міцність на осьовий розтяг;
- міцність на розтяг при згині;
- середня густина;
- морозостійкість;
- водонепроникність.

Марка бетону за міцністю (М) вказує на мінімальне середнє арифметичне значення міцності у кг/см^2 , сучасним показником міцності є клас, що характеризує мінімальну міцність в МПа для бетону, яка забезпечується з довірчою імовірністю 95%. Для легких бетонів з порівняно низькою міцністю на стиск встановлені класи В0,35; В0,75; В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5. При більш високій міцності бетону згідно діючих ДБН і Європейських норм встановлені класи С8/10, С10/12,5, С12/15, С16/20, С18/22,5, С20/25, С25/30, С28/35, С32/40, С35/45, С40/50, С45/55. Над ризикою при позначенні класу вказується мінімально необхідна міцність на стиск стандартних зразків-циліндрів, під ризикою – зразків-кубів.

Нормативні показники для основних видів легких бетонів наведено у табл. 2.1, 2.2.

Для отримання легких бетонів як крупний заповнювач застосовують пористий гравій та щебінь фракцій 5...10, 10...20 і 20...40 мм або суміші декількох фракцій, у яких повинно бути за об'ємом 25...50% дрібної фракції 5...10 мм. Для конструкційних бетонів фракція 20...40 мм не використовується, а в конструкційно-теплоізоляційних бетонах вона повинна складати не більше 30% за об'ємом. У дрібнозернистих бетонах використовується фракція 5...10 мм.

Таблиця 2.1

Основні марки і класи легких бетонів

Марки за середньою густиною	Керамзитобетон, шунгітобетон, бетон на зольному грав'їю і пористому піску	Керамзитобетон, шунгітобетон, бетон на зольному грав'їю без піску	Бетон на щебні з пористих гірських порід	Бетон на шлакопемзовому щебені	Бетон на скловидному пористому заповнювачі	Перлітобетон	Вермикулітобетон
Теплоізоляційні							
D200	–	M3... M5	–	–	M3...M5	–	M3...M5
D300	M3...M5	M3... M5	–	–	M5... M10	M5... M10	M5... M10
D400	M5... M15	M5... M15	–	–	M5... M15	M10... M15	M10... M15
D500	M10... M25	M10... M15	–	–	M10... M15	–	–
Конструкційно-теплоізоляційні							
D500	B0,75... B1,5	B0,75... B1,5	–	–	B1... B2,5	–	–
D600	B1... B2,5	B1... B15	–	–	B0,75... B3,5	B2,0; B2,5	–
D700	B15... B3,5	B1,5... B5	–	–	B1... B5	B2,5; B3,5	–
D800	B2...B5	B2,5... B7,5	B2,5	–	B1,5... B7,5	B2,5... B5	–
D900	B2,5... B7,5	B3,5... C8/10	B2,5; B3,5	–	–	B2,5... B7,5	–
D1000	B3,5... C8/10	B3,5... C8/10	B2,5... B5	B2,5	–	B5... C8/10	–
D1100	B3,5... C8/10	B3,5... C8/10	B2,5... B7,5	B2,5, B3,5	–	B5... C8/10	–
D1200	B5... C8/10	B3,5... C8/10	B2,5... C8/10	B2,5... B5	–	B7,5... C8/10	–
D1300	B6... C8/10	B3,5... C8/10	B3,5... C8/10	B2,5... B7,5	–	C8/10	–
D1400	B5... C8/10	B3,5... C8/10	B5... C8/10	B3,5... C8/10	–	–	–

продовження табл. 2.1

Марки за середньою густиною	Керамзитобетон, шунгізитобетон, бетон на зольному грав'їно і пористому піску	Керамзитобетон, шунгізитобетон, бетон на зольному грав'їно без піску	Бетон на щебні з пористих гірських порід	Бетон на шлакопемзовому щебні	Бетон на скловидному пористому заповнювачі	Перлітобетон	Вермикулітобетон
D1500	-	-	B7,5... C8/10	B5... C8/10	-	-	
D1600	-	-	C8/10	B7,5... C8/10	-	-	
Конструкційні							
D1100	C10/12,5	-	-	-	-	C10/12, 5	-
D1200	C10/12,5... C16/20	-	-	-	-	C10/12, 5	-
D1300	C10/12,5... C16/20	-	C10/12,5	-	-	C10/12, C12/15	-
D1400	C10/12,5... C25/30	-	C10/12,5	C10/12,5	-	C10/12; C12/15	-
D1500	C10/12,5... C25/30	-	C10/12; C12/15	C10/12; C12/15	-	C12/15	-
D1600	C12/15... C32/40	-	C10/12,5 ... C16/20	C10/12,5... C16/20	-	C12/15	-
D1700	C12/15... C32/40	-	C12/15... C18/22,5	C10/12,5... C20/25	-	-	-
D1800	C16/20... C32/40	-	C12/15... C20/25	C16/20... C25/30	-	-	-
D1900	C20/25... C32/40	-	C16/20... C25/30	C18/22,5... C32/40	-	-	-
D2000	C20/25... C32/40	-	C20/25... C25/30	C32/40	-	-	-

Таблиця 2.2

Теплопровідність бетонів в сухому стані

Маркабетону за середньою густиною	Коефіцієнт теплопровідності бетону у сухому стані $\lambda_2, \text{Вт}(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$							
	Керамзитобетон, шунгітбетон, бетон на зольному гравії та пористому піску	Керамзитобетон, шунгітбетон, бетон на зольному гравії без піску	Бетон на щебені з пористих гірських порід	Бетон на шлакопемзовому щебені	Бетон на склоподібному пористому заповнювачі	Бетон на золотшлакових сумішах ТЕС, пористому паливному шлаку, аглопоритовому щебені	Перлібетон	Вермикулібетон
D200	0,10	0,09	–	–	0,09	–	–	–
D300	0,11	0,10	–	–	0,10	–	–	0,08
D400	0,12	0,11	–	–	0,11	–	–	0,09
D500	0,14	0,12	–	–	0,12	–	–	0,11
D600	0,1в	0,13	–	–	0,13	–	0,12	0,14
D700	0,19	0,15	–	–	0,15	–	0,14	0,16
D800	0,21	0,17	0,20	–	0,16	–	0,16	0,21
D1000	0,27	0,23	0,25	0,23	–	0,29	0,22	–
D1200	0,36	0,31	0,33	0,29	–	0,35	0,29	–
D1400	0,47	0,35	0,37	0,35	–	0,47	–	–
D1600	0,58	–	0,52	0,41	–	0,58	–	–
D1800	0,66	–	–	0,52	–	0,70	–	–

Мінімальні марки за насипною густиною в $\text{кг}/\text{м}^3$ для різних видів пористих гравію і щебеню, а також піску наведені нижче:

щебінь і пісок перлітовий –	75
щебінь і пісок вермикулітів –	100
гравій і щебінь керамзитовий –	250
гравій шунгізитовий –	400
гравій аглопоритовий –	500
щебінь аглопоритовий –	400
щебінь шлакопемзовий –	400
пісок керамзитовий і шунгізитовий –	500
пісок аглопоритів –	600
пісок шлакопемзовий –	700

Для кожного виду пористого заповнювача з насипною густиною корелюється його міцність, що визначається випробуванням при стиску у циліндрі. Для перлітового щебеню певної марки за насипною густиною нормується також водопоглинання.

Гравій, щебінь і пісок, призначені для приготування теплоізоляційних легких бетонів, періодично випробовують на теплопровідність.

Усереднені значення коефіцієнтів теплопровідності легких, зокрема теплоізоляційних бетонів наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Коефіцієнти теплопровідності легких бетонів

Марка бетону за середньою густиною	Значення коефіцієнту теплопровідності в сухому стані, Вт/(м·°С)		
	Керамзитобетон	Перлітобетон	Вермикулітобетон
D200	–	–	0,07
D300	–	0,09	0,08
D400	0,11	0,10	0,09
D500	0,14	0,11	0,11

У реальних умовах експлуатації значення коефіцієнта теплопровідності бетону у вологому стані можуть на 10...30% відрізнятись від розрахункових залежно від характеру та розміру пор, а також складів бетону та теплофізичних властивостей його компонентів.

Для легких бетонів характерні *щільна, поризована* або *крупнопориста* структури. У легких бетонах щільної структури цементний камінь може включати до 6% (за об'ємом) втягнутого повітря. При поризації 6...25%, яка досягається введенням мікропіно- і газоутворюючих добавок, структуру легкого бетону відносять до поризованої.

Легкі бетони щільної структури характеризуються практично повним заповненням розчином порожнин між зернами крупного заповнювача. Щільна структура забезпечується підбором відповідного зернового складу заповнювача, необхідним ущільненням бетонної суміші, оптимальною витратою води і цементу. Встановлено, що найбільша середня густина та міцність бетону досягаються при певній оптимальній витраті води (рис. 2.1). Цій же витраті води відповідає і

найменший коефіцієнт виходу бетонної суміші, обчислений за формулою:

$$\beta = \frac{V_{б.с}}{V_{ц} + V_{п} + V_{щ}}, \quad (2.1)$$

де $V_{б.с}$ – об'єм бетонної суміші в ущільненому стані;

$V_{ц}$, $V_{п}$, $V_{щ}$ – об'єми цементу, піску та крупного заповнювача в насипному стані.

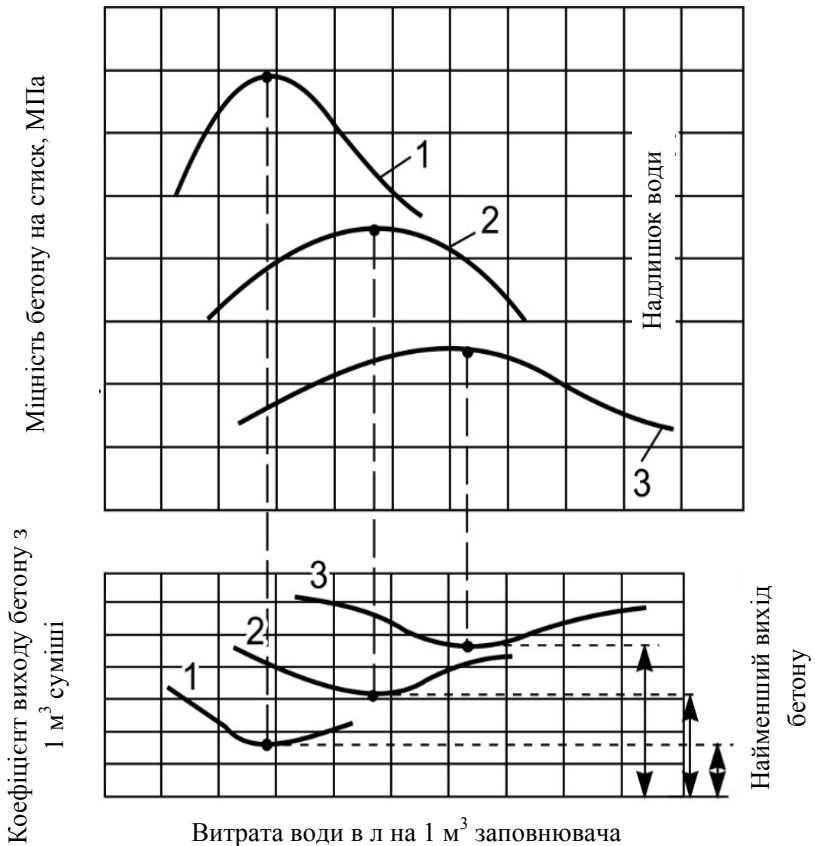


Рис. 2.1. Вплив витрати води на міцність та коефіцієнт виходу легкого бетону:
1 – сильне ущільнення; 2 – середнє; 3 – слабке

Коефіцієнт виходу бетону можна розглядати як його структурну характеристику, що виражає компактність розміщення складових бетону в одиниці його об'єму. Величина коефіцієнта виходу легких бетонів залежить від їх складу, об'єму порожніх компонентів, ступеня ущільнення бетонної суміші та об'єму повітряних пор, що залишаються в ущільненому бетоні.

Основна відмінність структури легких бетонів на пористих заповнювачах – наявність в зернах заповнювача пор різної величини. Ця особливість істотно позначається на більшості його технічних властивостей. Для легких бетонів характерне покращене зчеплення в'язучого із заповнювачем. У бетонах цього виду товщина контактної зони коливається від 30 до 60 мкм, тоді як у важких вона становить 25...50 мкм.

Цементний камінь і зерна пористого заповнювача мають різну міцність і деформативність. Напруження, викликані механічними впливами, а також як результат усадкових і температурних деформацій у легкому бетоні розподіляються рівномірніше, ніж у важкому.

Пористість пористих заповнювачів призводить до вологообміну між ними та цементним тестом. Після замішування відбувається міграція води з цементного тіста в зерна сухого заповнювача, а через деякий час у міру твердіння бетону із заповнювача в матричну фазу. Можливість відсмоктування капілярами заповнювачів води, що віджалася з цементного тіста, призводить до зменшення внутрішнього та зовнішнього водовідділення в легких бетонах.

Особливості структури легких пористих заповнювачів позначаються на реологічних властивостях легкобетонних сумішей. Розвинена поверхня пористих заповнювачів призводить до підвищення внутрішнього тертя і відповідно водопотреби бетонних сумішей. Внаслідок інтенсивного капілярного поглинання води зернами заповнювачів легкобетонні суміші порівняно швидко втрачають рухливість. У той же час ця особливість може мати позитивне значення, оскільки підвищення початкової структурної міцності бетону дозволяє швидше виконувати розпалубку виробів, зменшити металоємність парку форм. Значна відмінність густини

цементного тіста і зерен наповнювачів обумовлює підвищену схильність легкобетонних сумішей до розшарування. Позитивно на однорідність бетонних сумішей впливають ПАР, важливим є також оптимізація параметрів віброущільнення з урахуванням виключення розшарування.

Середня густина легких бетонів у сухому стані залежить від густини зерен заповнювачів (рис. 2.2), витрати цементу, об'ємної концентрації крупного заповнювача, об'ємів міжзернових пористот і втягнутого повітря. Ефективним способом зниження середньої густини є поризація бетонної суміші повітровтягувальними або пороутворюючими добавками.

Густина легкого бетону може бути виражена формулою:

$$\rho_{\bar{o}} = \rho_{\kappa} \varphi + \left(1 - \varphi - \frac{V_n}{100} \right) \rho_p, \quad (2.2)$$

де ρ_{κ} и ρ_p – відповідно густина зерен пористого заповнювача та цементно-піщаного розчину;

V_n – об'єм міжзернових пористот;

φ – об'ємна концентрація пористого заповнювача.

Для орієнтовного розрахунку густини легких бетонів можна використовувати формулу М.З.Симонова:

$$\rho_{\bar{o}} = 1,15Ц + (800 - Ц / \rho_{\kappa}) \rho_{3.3}, \quad (2.3)$$

де $Ц$ – витрата цементу, кг/м³;

$\rho_{3.3}$ і ρ_{κ} – відповідно густина зерен заповнювача та цементу ($\rho_{\kappa} = 3,1$ кг/л).

При виведенні цієї формули абсолютний об'єм, що займає пористий заповнювач, прийнятий в середньому 800 л/м³.

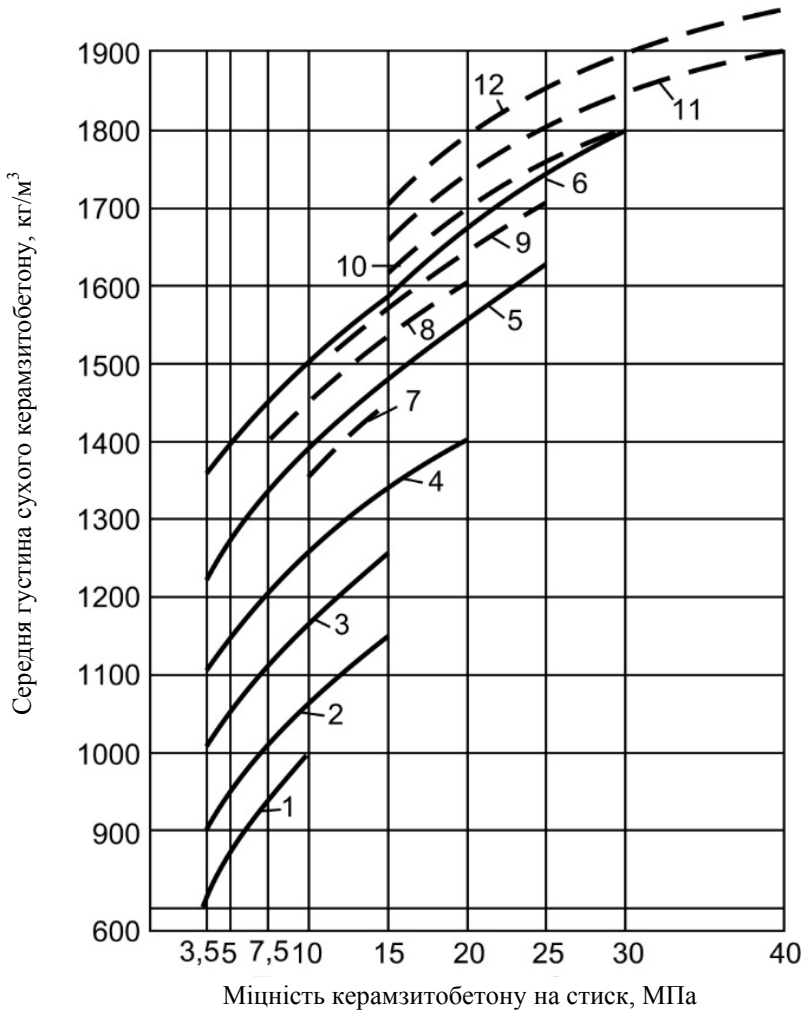


Рис. 2.2. Вплив насипної густини заповнювача на густину та міцність при стиску керамзитобетону: на керамзитовому піску при насипній густині керамзитового гравію кг/м^3 :
 1 – 300; 2 – 400; 3 – 500; 4 – 600; 5 – 700; 6 – 800;
 на кварцовому піску при насипній густині керамзитового гравію кг/м^3 :
 7 – 300; 8 – 400; 9 – 500; 10 – 600; 11 – 700; 12 – 800

Теоретичні уявлення про *міцність легких бетонів* базуються на двох основних підходах до механізму їх руйнування, найбільш чітко сформульованих стосовно керамзитобетону. Було встановлено, що граничні деформативні характеристики керамзиту і розчину в бетоні є досить близькими і в момент руйнування напруження в керамзиті і розчині практично одночасно досягають границі міцності. Експериментальні дослідження, однак, не підтверджують достатньою мірою даний підхід. Показано, що для легких бетонів залежність їх міцності від міцності розчинової частини можна розділити на дві ділянки (рис. 2.3). На відносно прямолінійній ділянці в міру збільшення міцності розчину має місце пропорційне зростання міцності бетону. У цьому інтервалі міцність бетону не залежить від міцності заповнювача. На другій криволінійній ділянці міцність легкого бетону визначається граничною деформативністю пористого заповнювача. Гранична міцність бетону зменшується із зменшенням міцності пористого заповнювача. Для керамзитобетону граничну міцність можна знайти за емпіричною формулою:

$$R_{\sigma} = 9,5R_{\kappa} \frac{1-\varphi}{0,5}, \quad (2.4)$$

де R_{κ} – міцність керамзиту в циліндрі;

φ – об'ємна концентрація керамзиту.

Міцність легких бетонів скорельована з їх густиною (рис. 2.3). Великий вплив має об'єм міжзернових пустот заповнювача, не заповнений цементним тістом. При 5%-му об'ємі незаповнених міжзернових пустот міцність легкого бетону знижується приблизно на 20% порівняно з бетоном щільної структури.

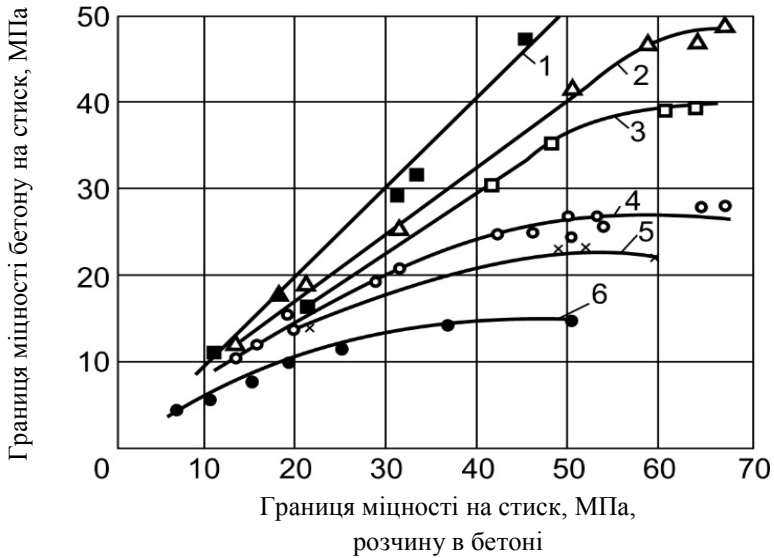


Рис. 2.3. Залежність міцності на стиск керамзитобетону від густини заповнювачів та міцності розчинової частини бетону:
 1 – бетон на гранітному щебні (для порівняння); 2 – керамзитобетон на керамзитовому гравії із щільністю в шматку $\rho_{\text{ш}}=1,4 \text{ т/м}^3$;
 3 – $\rho_{\text{ш}}= 1,05 \text{ т/м}^3$; 4 – $\rho_{\text{ш}}= 0,86 \text{ т/м}^3$; 5 – $\rho_{\text{ш}}= 0,66 \text{ т/м}^3$;
 6 – $\rho_{\text{ш}}= 0,52 \text{ т/м}^3$

Запропоновані різні формул для визначення міцності легких бетонів на стиск, які можна поділити на три групи:

1. До першої групи можна віднести формули, в яких міцність легкого бетону залежить від міцності компонентів і їх відносного вмісту. Типовою з цієї групи є формула:

$$R_{\sigma} = R_p (1 - \varphi) + R_k \varphi, \quad (2.5)$$

де R_p – міцність розчинової складової;

R_k – міцність крупного пористого заповнювача;

φ – об'ємна концентрація крупного заповнювача.

2. До другої групи входять формули, що зв'язують міцність бетону з деформативними властивостями компонентів. Найбільш відомою формулою цієї групи є формула:

$$R_{\sigma} = E_{\sigma} \varepsilon_c = \frac{1}{\mu} E_{\sigma} \varepsilon_p, \quad (2.6)$$

де E_{σ} – модуль деформації бетону у момент руйнування;

ε_c – гранична стискуваність заповнювача;

ε_p – гранична розтягуваність заповнювача;

μ – коефіцієнт Пуассона.

3. Третя група поєднує формули, що враховують міцність компонентів, їх об'ємний вміст та деформативні властивості. При початку руйнування бетону з розчинової частини може бути використана формула:

$$R_{\sigma} = R_p \left[1 + \left(\frac{E_3}{E_p - 1} \right) \varphi \right], \quad (2.7)$$

де E_3 і E_p – відповідно модулі пружності заповнювача та розчину.

На початку руйнування бетону із заповнювача застосовують формулу:

$$R_{\sigma} = R_3 \left[1 + \left(\frac{E_p}{E_3} - 1 \right) (1 - \varphi) \right], \quad (2.8)$$

де R_3 – міцність заповнювача.

Істотний вплив міцності пористого заповнювача призводить до меншого відносного впливу на міцність легкого бетону таких факторів як В/Ц та активність цементу. При незмінній якості пористих заповнювачів для збільшення міцності легких бетонів необхідно підвищувати міцність розчинової складової (рис. 2.3), що досягається підвищенням витрати цементу або зменшенням об'ємної концентрації крупного заповнювача. При цьому збільшується середня густина бетону. У табл. 2.4 наведено орієнтовні значення середньої

густини керамзитобетону різних класів за міцністю при використанні керамзитового гравію з різною насипною густиною.

Таблиця 2.4

Орієнтовні значення середньої густини
конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів

Вид заповнювача	Марка заповнювача за насипною густиною	Середня густина бетону, кг/м ³ різних класів на піску							
		пористому				щільному			
		B2,5	B3,5	B5	B7,5	B2,5	B3,5	B5	B7,5
Керамзитовий гравій	300	700	750	800	900	950	900	950	1050
	400	800	850	900	950	900	950	1000	1100
	500	900	950	1000	1050	1000	1050	1100	1200
	600	1000	1050	1100	1150	1100	1150	1200	1250

Більшість розрахункових формул міцності легких бетонів базується на гіпотезі розподілу напруження між компонентами легких бетонів при їх руйнуванні. Ці формули з більшою або меншою похибкою дозволяють прогнозувати міцність при відомих фізико-механічних характеристиках компонентів і складі бетону. Використання їх для проектування складу неможливе або важко, оскільки вони не пов'язані однозначно з тим чи іншим визначальним параметром бетонної суміші. Таким параметром, однозначно пов'язаним із міцністю, для легких бетонів може бути "приведене Ц/В":

$$Z = \frac{V_c + K_{ц.е} V_d}{B + (P_3 - W_3^o) V_3 + V_{нов}}, \quad (2.9)$$

де V_c , B , V_3 , $V_{нов}$, V_d – відповідно абсолютні об'єми цементу, води, пористого заповнювача, повітря та мінеральної добавки в 1 м³ бетонної суміші;

P_3 – пористість заповнювача;

W_3^o – об'ємне водопоглинання заповнювача;

$K_{ц,е}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності мінеральної добавки.

У параметрі Z вплив об'єму пор, утворених заповнювачем і втягнутим повітрям, "приводиться" до впливу еквівалентної кількості води – основного пороутворюючого фактора у складі бетонної суміші.

"Приведене Ц/В" є більш універсальним параметром, ніж Ц/В і трансформується в останнє при $P_3V_3 = 0$ і $V_{пов} = 0$.

При врахуванні пор заповнювача і втягнутого повітря в бетонній суміші фізично обумовлена однозначна залежність міцності легких бетонів від "приведеного Ц/В" (*правило "приведеного Ц/В"*), яку можна покласти в основу розрахунково-експериментального методу проектування їх складів.

Обробка довідкових та експериментальних даних (рис.2.4) показала, що міцність легких бетонів на стиск на пористих заповнювачах пов'язана з параметром Z лінійною залежністю, що підтверджує справедливість правила "приведеного Ц/В":

$$R_o = AR_y Z, \quad (2.10)$$

де A – коефіцієнт, що визначає вплив особливостей заповнювачів (для керамзитобетону на кварцовому піску $A \approx 1,7$);

R_y – активність цементу.

Лінійна залежність міцності легких бетонів від приведенного Ц/В повинна зберігатися в області ефективних складів, коли крупний заповнювач працює спільно з розчиною складовою.

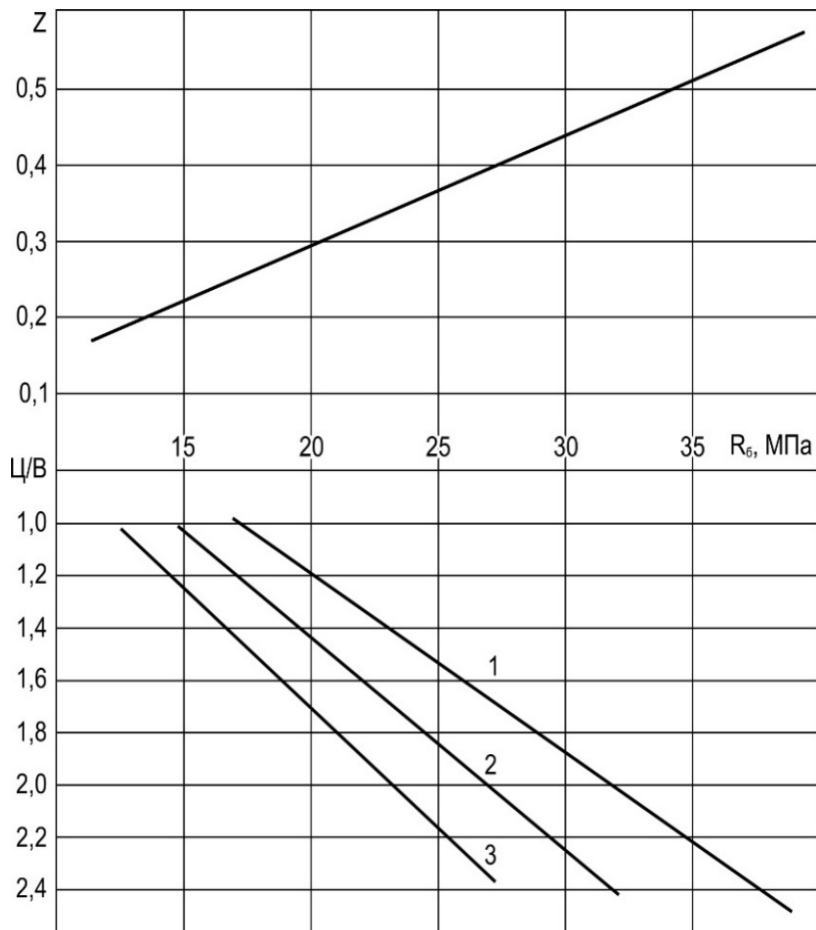


Рис. 2.4. Залежність міцності конструкційних керамзитобетонів від ρ/V та Z :
 1 – пористість керамзиту 0,4; 2 – 0,55; 3 – 0,7

Міцність при розтягу легких бетонів дещо вища за цей показник для важких бетонів. Для конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів класів В7,5 і менше міцність при осьовому розтягу становить 12...17% від міцності при стиску, для конструкційних – 7...10%.

У загальному вигляді міцність легких бетонів при розтягу можна розрахувати за формулою:

$$R_p = 2,1\sqrt[3]{R_0^2}. \quad (2.11)$$

Підвищена міцність легких бетонів при розтягуванні пояснюється міцнішим зчепленням пористого заповнювача з цементним каменем.

Деформації під навантаженням легких бетонів приблизно в 1,5...2 рази більші ніж для важких бетонів. Гранична розтяжність бетонів на пористих заповнювачах коливається від 0,03 до 0,4 мм/м. Вона тим вища, чим більша міцність бетону та деформативність заповнювача. Зі збільшенням класу бетону від В3,5 до В15 гранична розтяжність підвищується в 2 рази.

Усадочні деформації легких бетонів зростають із зменшенням модуля пружності крупного пористого заповнювача та його об'ємної концентрації, а також збільшенням В/Ц. Найбільша усадка, що сягає 1,5 мм/м, спостерігається у перлітобетонів, для керамзитобетону вона становить 0,4...1 мм/м.

Повзучість легкого бетону збільшується із зменшенням його густини та збільшенням вмісту цементного каменю, а також його пористості. Заміна пористого піску щільним знижує повзучість конструкційних бетонів у 1,5...2 рази.

Теплопровідність легких бетонів залежить від теплофізичних властивостей пористого заповнювача, середньої густини та вологості бетону. Скловмісні заповнювачі (шлакова пемза, перліт та ін.) дозволяють на 10...20% при однаковій середній густині зменшити теплопровідність бетонів у порівнянні з заповнювачами, в структурі яких переважає кристалічна фаза (аглопорит, керамзит із записочених глин та ін.) (табл. 2.5).

Орієнтовно теплопровідність легких бетонів можна розрахувати за такою формулою:

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_p \frac{2\lambda_p + \lambda_k - 2\varphi(\lambda_p - \lambda_k)}{2\lambda_p + \lambda_k + \varphi(\lambda_p - \lambda_k)}, \quad (2.12)$$

де λ_p – теплопровідність розчинової складової;
 λ_k – теплопровідність пористого заповнювача.

Таблиця 2.5

Теплопровідність легких бетонів

Марка бетону засередньою густиною	Теплопровідність бетонів у сухому стані, Вт/(м·°С)		
	керамзитобетон, шунгізитобетон, аглопоритобетон, бетон на зольному гравії	шлакобетон	перлітобетон
D400	0,11	–	0,10
D500	0,14	–	0,11
D600	0,16	–	0,12
D700	0,19	0,15	0,14
D800	0,21	0,17	0,16
D900	0,24	0,20	0,19
D1000	0,28	0,23	0,22
D1100	0,32	0,26	0,25
D1200	0,36	0,29	0,29

Морозостійкість легких бетонів визначається насамперед морозостійкістю цементного каменю. Збільшення густини цементного каменю в контактній зоні з пористим заповнювачем сприяє підвищенню морозостійкості бетонів. Морозостійкість легких бетонів зменшується при застосуванні пористих пісків, що збільшують В/Ц і капілярну пористість цементного каменю. Так само як і для важких, для легких бетонів ефективним засобом збільшення морозостійкості є втягнення повітря за допомогою повітровтягувальних ПАР.

Легкі бетони щільної структури характеризуються досить високою *водонепроникністю*. Для конструкційних бетонів класів В10...В30 марки бетонів за водонепроникністю можуть складати W8...W16.

Зчеплення легкого бетону з арматурою є приблизно таким самим як і у важких бетонів аналогічних марок. Знижується зчеплення для бетонів низьких марок, у яких пористі міжзернами заповнювачів залишаються частково вільними. Слід враховувати також, що багато видів пористих заповнювачів є гідралічно активними і здатні зв'язувати гідроксид кальцію, що виділяється при гідратації цементу і забезпечує необхідну лужність середовища.

Для теплоізоляційних бетонів характерна підвищена сорбційна вологість. Вона залежить від початкового водовмісту свіжовідформованого бетону і при застосуванні пористих пісків більша в 1,5...2 рази, ніж у бетонів на щільних пісках. Для керамзитобетону при відносній вологості (за об'ємом) сорбційна вологість становить: при використанні керамзитового піску – 8...11%, перлітового піску – 10...14%, золи ТЕС – 9...12%.

Для отримання поризованої структури після попереднього визначення витрат вихідних матеріалів знаходять необхідний об'єм втягнутого повітря. Орієнтовно його можна розрахувати у % за формулою:

$$V_{нов} = \frac{1}{10} \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} + B \right) \right], \quad (2.13)$$

де Ц, П, Щ і В – відповідно витрати цементу, піску, щебеню (гравію) і води на 1 м³ бетону, кг;

$\rho_{ц}$ – густина цементу, кг/л;

$\rho_{п}$ і $\rho_{щ}$ – густини пористого піску і щебеню (гравію) у цементному тісті.

На підставі довідкових даних (табл. 2.6) встановлюється витрата повітровтягувальної добавки, піно або газоутворювача залежно від необхідного об'єму втягнутого повітря та обраного способу поризації, що уточнюється експериментально.

Таблиця 2.6

Орієнтовна витрата повітровтягувальних добавок для приготування поризованих легких бетонів

Добавка	Необхідний об'єм втягнутого повітря, %	Витрата добавки, % від маси цементу при застосуванні піску		
		дробленого керамзитового	шлакості	шлакопемзового, аглопоритового
Смола нейтралізована повітровтягувальна (СНП)	4...8	0,02...0,1	0,05...0,15	0,04...0,15
	8...12	0,05...0,15	–	0,1...0,2
Омилений деревний пек	4...8	0,03...0,12	0,07...0,2	0,05...0,17
	8...12	0,07...0,17	–	0,12...0,25

Примітки: 1. Орієнтовна витрата водного розчину піноутворюючих добавок при об'ємі втягнутого повітря близько 10% становить (% від маси цементу): смолосапонинового (густиною 1,02) – 2...3, клеєканіфольного (густиною 1,015) – 1,5...2,5, омиленої каніфолі (густиною 1,018) – 2,5...3,5. 2. Витрата добавок збільшується зі зменшення рухомості бетонної суміші.

2.2. Проектування складів легких бетонів

Метою проектування складів легких бетонів, як і важких, є забезпечення нормативних показників їх якості зазвичай при мінімально можливих витратах цементу або вартості матеріалів на 1 м³ бетону. Для конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів критерієм оптимізації складів може бути також мінімально можлива густина при забезпеченні інших нормованих властивостей.

Основним міцнісним параметром легких бетонів при проектуванні їх складів для збірних залізобетонних виробів є відпускна міцність. Для конструкційно-теплоізоляційних бетонів вона приймається 80% проектної, конструкційних – 70%. Для конструкційних легких бетонів, призначених для попередньо напружених конструкцій, нормується передаточна міцність. За умови забезпечення нормованих значень відпускної

(передаточної) міцності перевіряється також необхідна міцність бетону в проектному віці.

Середній рівень міцності легкого бетону, який забезпечує заданий клас, так як і для важкого бетону розраховується із врахуванням однорідності бетону за міцністю.

Середній рівень густини бетону визначається також з урахуванням однорідності за формулою:

$$\rho_{cm} = \rho_n K_T K_{m.n.}, \quad (2.14)$$

де ρ_n – нормована густина легкого бетону;

K_T і $K_{m.n.}$ – коефіцієнти, що приймаються залежно від досягнутого рівня однорідності густини за табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Значення добутку коефіцієнтів K_T і $K_{m.n.}$

Коефіцієнт варіації за середньою густиною, $V_n, \%$	Значення добутку $K_T K_{m.n.}$ для бетонів з середньою густиною		Коефіцієнт варіації за середньою густиною, $V_n, \%$	Значення добутку $K_T K_{m.n.}$ для бетонів з середньою густиною	
	700...1400 кг/м ³	>1400 кг/м ³		700...1400 кг/м ³	>1400 кг/м ³
2	1,0	0,98	6	0,93	0,92
3	0,985	0,985	7	0,92	0,90
4	0,97	0,95	8	0,90	–
5	0,95	0,94			

Легкоукладальність бетонних сумішей призначається залежно від виду конструкцій і технології їх виготовлення (табл. 2.8), вона повинна зберігатися не менше 30 хв.

Поряд зі щільними виготовляють *поризовані легкі бетони*. В поризованих легкобетонних сумішах об'єм втягнутого повітря підбирається за умови забезпечення нормованих характеристик бетону і, разом з тим, захисту сталеві арматури від корозії.

Таблиця 2.8

Рекомендована легкоукладальність легкобетонних сумішей

Конструкції	Марки бетонних сумішей за легкоукладальністю
Тонкостінні, які бетонуються у вертикальному положенні	P2...P3
Масивні, які виготовляються за стендовою технологією	P1
Масивні, які виготовляються на вібромайданчиках	Ж1...Ж2
Тонкостінні, які бетонуються в горизонтальному положенні	Ж2...Ж3

Мінімальна витрата цементу в легкому бетоні для армованих конструкцій повинна бути не менше 200 кг/м^3 , а при застосуванні зол ТЕС або інших мікронаповнювачів – 180 кг/м^3 . При застосуванні зол ТЕС із питомою поверхнею більше $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ і втратами при прожарюванні (ВПП) більше 15% мінімальна витрата цементу для армованих конструкцій має бути не менше 220 кг/м^3 . Для неармованих виробів мінімальна витрата цементу не обмежується за умови забезпечення необхідних властивостей бетонної суміші і проектних характеристик бетону.

Для високорухомих сумішей витрата цементу повинна бути не менше 300 кг/м^3 , а сумарна витрата цементу і пиловидних фракцій піску (або золи) – не менше 400 кг/м^3 .

Для приготування конструкційних бетонів підвищеної водонепроникності, які застосовуються в агресивному середовищі, витрати цементу повинні бути не менше, вказаних в табл. 2.9.

Витрата крупного заповнювача за насипним об'ємом л/м^3 , не повинна перевищувати:

600 – в сумішах, які призначені для внутрішніх стінових панелей з підвищеною звукоізоляцією;

700 – в сумішах, які призначені для перекачування по трубопроводам;

850 – в сумішах для бетонів з підвищеною водонепроникністю і в нерозшарованих високорухомих сумішах.

Таблиця 2.9

Мінімальні витрати цементу для легких бетонів
з підвищеною водонепроникністю

Марка за водонепроникністю	Мінімальні витрати цементу, кг/м ³ , для легкобетонних сумішей марок за легкоукладальністю		
	Ж1	P1	P2
W4	290	310	400
W6	330	380	430
W8	380	430	480

При цьому мінімальна витрата крупного заповнювача за насипним об'ємом повинна бути не менше 400 л/м³.

Крупний заповнювач для легкого бетону підбирається за густиною і міцністю. Залежно від виду дрібного заповнювача, міцності бетону на стиск і його марки за середньою густиною встановлюється максимальна марка крупного заповнювача за насипною густиною і міцністю (табл. 2.10...2.13).

Таблиця 2.10

Максимальні марки гравійних пористих заповнювачів за насипною густиною для конструкційно-теплоізоляційних бетонів

Характеристична міцність бетону на стиск*, МПа	Марка бетону за середньою густиною	Максимальна марка гравійного крупного заповнювача за насипною густиною залежно від виду піску				
		подрібнений із гравію або зола ТЕС	природний пористий або гранульований шлак	случений перлитовий марок 200, 250 за насипною густиною	без піску (поризований)	щільний
3,5	D700	–	–	400	350	–
	D800	350	–	500	450	–
	D900	500	350	550	550	300
	D1000	600	500	600	600	500
	D1100	–	600	–	–	600
5	D800	300	–	400	350	–
	D900	450	300	500	500	–
	D1000	550	500	600	600	450
	D1100	600	600	–	–	550
	D1200	–	–	–	–	600
7,5	D800	–	–	350	–	–
	D900	400	–	450	400	–
	D1000	500	350	550	500	–
	D1100	550	500	600	600	450
	D1200	600	600	–	–	550
	D1300	–	–	–	–	600

*Характеристична (нормативна) міцність бетону має забезпеченість 95% для даного класу.

Таблиця 2.11

Максимальні марки щєбєневих пористих заповнювачів за насипною густиною для конструкційно-теплоізоляційних бетонів

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка бетону за середньою густиною	Максимальна марка крупного щєбєневидного заповнювача за насипною густиною залежно від виду піску		
		подрібнений із щєбєню (крім перлітовий)	спучений перлітовий марок 200, 350 за насипною густиною	зола ТЕС, гранульований шлак
3,5	D800	–	400	–
	D900	–	500	400
	D1000	400	600	500
	D1100	500	700	600
	D1200	600	800	700
	D1300	700	900	800
	D1400	800	–	900
	D1500	900	–	–
5	D900	–	400	–
	D1000	–	500	400
	D1100	400	600	500
	D1200	500	700	600
	D1300	600	800	700
	D1400	700	900	800
	D1500	800	–	900
	D1600	900	–	–
7,5	D1000	–	400	–
	D1100	–	500	400
	D1200	400	600	500
	D1300	500	700	600
	D1400	600	800	700
	D1500	700	900	800
	D1600	800	–	900
	D1700	900	–	–

Примітка. Наведені дані відповідають бетонам, які виготовлені з повітрявтягувальними добавками. При приготуванні бетонних сумішей без повітрявтягувальних добавок значення насипної густини крупного заповнювача зменшується для бетонів на піску того ж виду і золи ТЕС на 100 кг/м^3 , для бетонів на спученому перлітному піску – 50 кг/м^3 .

Таблиця 2.12

Максимальні марки крупних пористих заповнювачів за насипною густиною для конструкційних бетонів

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка бетону за середньою густиною	Максимальна марка крупного заповнювача за насипною густиною			
		гравію		щебеню	
		пісок щільний	пісок пористий	пісок щільний	пісок пористий
10...20	D1200	–	500	–	–
	D1300	–	600	–	400
	D1400	500	700	–	500
	D1500	600	800	400	600
	D1600	700	–	500	700
	D1700	800	–	600	800
	D1800	900	–	700	900
25...40	D1400	–	600	–	–
	D1500	–	700	–	–
	D1600	600	800	–	–
	D1700	700	–	–	700
	D1800	800	–	600	800
	D1900	900	–	700	900
	D2000	–	–	800	1000

Примітка. Згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008 для легких бетонів встановлені наступні класи міцності на стиск (LC): 8/9; 12/13; 16/18; 20/22; 25/28; 30/33; 35/38; 40/44; 45/50 та більш високі – до 80/88 включно.

Таблиця 2.13

Марки крупних пористих заповнювачів за міцністю

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за міцністю	Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за міцністю
3,5	П 25	20	П 150
5	П 35	22,5	П 200
7,5	П 50	25	П 250
10	П 75	30	П 300
12,5	П 100	35	П 350
15	П 125	40	П 400

Примітка. Крупний заповнювач відносять до тієї чи іншої марки за результатами випробувань в циліндрі.

Насипна густина пористих пісків для конструкційно-теплоізоляційних бетонів повинна знаходитись в межах 200...1000 кг/м³. Для конструкційних бетонів насипна густина піску повинна бути не менше 600 кг/м³ для бетону класів 12,5...20 і не менше 800 кг/м³ для бетонів класів 25 і вище. Залежно від класів бетонів за міцністю рекомендується вибирати пісок із міцністю при здавлюванні в циліндрі не менше вказаної в табл. 2.14.

Таблиця 2.14

Міцність піску при здавлюванні в циліндрі

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Міцність піску при здавлюванні в циліндрі, МПа, не менше			
	керамзитового	керамзитового і шунгізитового, перлітового	шлакопемзового	аглопоритового
15	2,5	1,2	1,0	0,8
25	4,5	2,2	1,2	1,0
30	6,5	3,3	1,4	1,2
40	8,0	4,0	1,8	1,4

Розрахунок номінальних складів конструкційно-теплоізоляційних бетонів послідовно включає орієнтовне визначення витрати крупного пористого заповнювача залежно від його марки за міцністю і виду дрібного заповнювача; витрати цементу з урахуванням класу бетону за міцністю і марки заповнювача за насипною густиною; витрати дрібного заповнювача і води.

Витрата крупного заповнювача встановлюється (табл. 2.15) за умови максимального насичення ним легкого бетону.

Для визначення витрати цементу використовують рекомендації табл. 2.16, 2.17.

Витрату дрібного заповнювача в кг/м³ розраховують за формулою:

$$П = \rho_{\bar{b}} - 1,15Ц - К, \quad (2.15)$$

де $\rho_{\bar{b}}$ – заданий середній рівень густини бетону в сухому стані, кг/м³;

$Ц$ – витрата цементу, кг/м³;

K – витрата крупного заповнювача, $\text{кг}/\text{м}^3$, ($K=V_{\kappa}\rho_{\kappa}$, де V_{κ} – об'єм крупного заповнювача, $\text{м}^3/\text{м}^3$, (табл. 2.16),
 ρ_{κ} – його густина $\text{кг}/\text{м}^3$).

Таблиця 2.15

Орієнтовна витрата крупного заповнювача в конструкційно-теплоізоляційному бетоні

Фракція заповнювача, мм	Витрата крупного заповнювача, $\text{м}^3/\text{м}^3$, залежно від його марки за міцністю та виду дрібного заповнювача			
	П 75 і менше		Більше П 75	
	пісок пористий	зола ТЕС або щільний пісок	пісок пористий	зола ТЕС або щільний пісок
5-10 і 10-20	1,05-1,1	1,1-1,2	1,0-1,05	1,05-1,15
5-20	1,0-1,05	1,05-1,15	0,95-1,0	1,0-1,10

Примітка. Приведені в таблиці значення передбачають застосування при приготуванні бетонної суміші повітрявтягувальних добавок. При відсутності добавок для отримання щільної структури бетону витрата крупного заповнювача зменшується на 5-10%. Для поризованих безпіщаних бетонів витрату крупного заповнювача приймають такою ж, як в бетонах на золі ТЕС або щільному піску.

Таблиця 2.16

Орієнтовні витрати цементу для легких бетонів на гравійних заповнювачах

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за насипною густиною	Витрата цементу марки 400, $\text{кг}/\text{м}^3$, залежно від дрібного заповнювача				
		того ж виду, що і крупний заповнювач	случений перлитовий марки 300	зола і золошлакова суміш	щільний	без піску (поризований бетон)
3,5	300	230	250	210	240	-
	350 - 400	220	230	200	230	260
	450 - 500	210	220	200	220	245
	550 - 600	200	210	200	210	230
5	300	240	270	230	250	-
	350 - 400	230	250	220	240	280
	450 - 500	220	230	210	230	260
	550 - 600	210	220	200	220	250
7,5	350 - 400	250	300	230	270	-
	450 - 500	240	270	220	250	-
	550 - 600	230	250	210	230	-

Таблиця 2.17

Орієнтовні витрати цементу для легких бетонів на щебених заповнювачах

Характеристична міцність бетону на стиск, МПа	Марка заповнювача за насипною густиною	Витрата цементу марки 400, кг/м ³ , залежно від дрібного заповнювача		
		того ж виду, що і крупний заповнювач	спучений перлитовий марки 300	зола і золошлакова суміш
3,5	400	260	280	240
	500	240	260	230
	600	235	250	220
	700	225	240	210
	800	215	230	200
	900	205	220	200
5	400	280	320	255
	500	265	290	240
	600	255	270	230
	700	245	260	220
	800	235	250	210
	900	225	240	200
7,5	400	340	390	300
	500	310	360	280
	600	290	240	260
	700	270	210	240
	800	260	300	230
	900	250	290	220

Орієнтовна витрата води приймається за формулою (2.16) залежно від легкоукладальності бетонної суміші, крупності і водопоглинання крупного заповнювача, водопотреби і кількості дрібного заповнювача:

$$B = B_0 + B_1 + B_2, \quad (2.16)$$

де B_0 – початковий вміст води за табл. 2.20, л/м³;

B_1 – поправка на водопотребу дрібного заповнювача, л/м³;

B_2 – поправка на водопоглинання крупного пористого заповнювача (водопоглинання крупного пористого заповнювача прийнята в табл. 2.20 – 15%).

Водопотреба пористих пісків в 2...3 рази більше ніж щільних. Наприклад, водопотреба подрібненого керамзитового

піску 13...16%, шлакопемзового – 16...18%. При середній витраті піску 250 л/м³ за абсолютним об'ємом зміна водопотреби піску на 1% буде відповідати зміні витрати води на 0,02 л/л об'єму піску.

Поправку B_1 можна розрахувати за формулою:

$$B_1 = 0,025 \frac{\Pi}{\rho_n} (B_n - 7), \quad (2.17)$$

де B_n – водопотреба піску, %,

Π – витрата піску, кг/м³.

При відсутності даних по водопотребі піску можна збільшувати значення B_0 при застосуванні дрібного кварцового піску на 5 л/м³ на кожні 0,1 м³/м³ його насипного об'єму, подрібненого керамзитового піску – 7...10 л/м³, спученого перлітового піску – 12...15 л/м³, аглопоритового – 15 л/м³, шлакопемзового – 10 л/м³, золи ТЕС – 15...20 л/м³.

Правильність орієнтовного розрахунку складів легкого бетону перевіряють визначенням сумарного абсолютного об'єму його компонентів ΣV_{abc} :

$$\Sigma V_{abc} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{\Pi}{\rho'_{з.н}} + \frac{K}{\rho'_{з.к}} + B, \quad (2.18)$$

де $\rho_{ц} \approx 3,1$ кг/л;

$\rho'_{з.н}$ і $\rho'_{з.к}$ – густина зерен дрібного і крупного заповнювачів, визначена в цементного тісті.

При відсутності повітрявтягувальних добавок знайдене значення ΣV_{abc} повинно знаходитись в межах 950...1050 л/м³. Якщо воно виходить за вказані межі розрахунок повторюють, змінивши витрату крупного заповнювача (табл. 2.15) або передбачивши введення повітрявтягувальних, піноутворюючих добавок та ін.

Розрахунковий вміст втягнутого повітря, %:

$$V_{в.н} = 0,1(1000 - \Sigma V_{abc}). \quad (2.19)$$

Визначене за формулою (2.19) значення об'єму втягнутого повітря не повинно перевищувати 12% для бетонів, які містять дрібний заповнювач і мають у своєму складі повітрявтягувальну добавку і 20% для безпіщаних поризованих бетонів.

Розрахунок складів конструкційних легких бетонів зазвичай виконують у наступній послідовності:

1) залежно від заданих показників міцності і середньої густини бетону, а також насипної густини та міцності крупного заповнювача з'ясовують можливість приготування бетону на щільному або пористому піску з врахуванням його міцності при здавлюванні в циліндрі (табл. 2.12–2.14);

2) відповідно до заданого середнього рівня міцності бетону на стиск визначають витрату цементу (C) залежно від його марки, а також виду піску, крупності і марки за міцністю крупного заповнювача, легкоукладальності бетонної суміші (табл. 2.18, 2.19);

3) залежно від заданої легкоукладальності бетонної суміші, найбільшої крупності і виду крупного заповнювача визначають початкову витрату води (B_0), (табл. 2.20);

4) залежно від заданого середнього рівня густини бетону та зерен крупного заповнювача, а також знайдених витрат цементу і води встановлюється об'ємна концентрація крупного заповнювача (φ) і його витрата (кг), (табл. 2.21);

5) за умови правила абсолютних об'ємів розраховують витрату піску;

6) уточнюють розрахункову витрату води з урахуванням поправок на водопотребу піску, водопоглинання крупного заповнювача, його об'ємну концентрацію і витрату цементу.

Об'ємну концентрацію крупного заповнювача можна знайти залежно від густини зерен в цементному тісті (табл. 2.21), або об'єму міжзернових пустот крупного заповнювача (α) для бетонних сумішей із маркою за легкоукладальністю P1 за формулою:

$$\varphi = 0,85 - \alpha . \quad (2.20)$$

Для бетонних сумішей марок P2 і більше значення φ зменшується на 0,02, Ж1 і Ж2 – збільшується на 0,02.

Таблиця 2.18

Орієнтовна витрата цементу, кг/м^3 , при застосуванні пористих заповнювачів із крупністю до 20 мм і щільного піску для бетонних сумішей з $Ж=5\dots 8$ с.

Міцність бетону, МПа	Рекомендована марка цементу	Марка пористого заповнювача за міцністю зерен						
		75	100	125	150	200	250	300
15	400	300	280	260	240	230	220	210
20	400	–	340	320	300	230	260	250
25	400	–	–	390	360	330	310	290
30	500	–	–	–	420	390	360	330
35	500	–	–	–	–	450	410	380
40	500	–	–	–	–	–	480	450
50	500	–	–	–	–	–	570	540

Густина зерен крупного заповнювача ($\rho'_{з.к}$) в цементному тісті орієнтовно можна визначити за формулами:

- для пористого гравію:

$$\rho'_{з.к} = 1,05 \rho_{з.к} \quad (2.21)$$

- для пористого щебеню:

$$\rho'_{з.к} = 1,1 \rho_{з.к} \quad (2.22)$$

де $\rho_{з.к}$ – насипна густина зерен крупного заповнювача.

Таблиця 2.19

Коефіцієнти зміни витрати цементу при зміні його марки, виду піску, крупності заповнювача і легкоукладальності бетонної суміші

Характеристика матеріалів	Міцність бетону, МПа						
	15	20	25	30	35	40	50
Цемент марки:							
300	1,15	1,2	-	-	-	-	-
400	1	1	1	1,5	1,2	1,25	-
500	0,9	0,88	0,85	1	1	1,1	1,1
Пісок:							
щільний	1	1	1	1	1	1	1
пористий	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Найбільша крупність заповнювача, мм							
40	0,9	0,9	0,93	0,93	0,95	0,95	0,95
20	1	1	1	1	1	1	1
10	1,1	1,1	1,07	1,1	1,05	1,05	1,05
Жорсткість, с							
5...8	1	1	1	1	1	1	1
8...12	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
12...20	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Осадка конуса, см							
1...2	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
2...5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
8...12	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

Примітки. 1. Коефіцієнти зміни витрати цементу при застосуванні піску з $M_k=1,5...2$ ($V_n=10\%$) – 1,05; $M_k=1...1,5$ ($V_n>10\%$) – 1,1. 2. Для цементу I групи за ефективністю при пропарюванні – 0,93; III – 1,07.

Таблиця 2.20

Орієнтовна витрата води (V_0) для легкобетонної суміші

Осадка конуса, см	Жорсткість, с	Масимальна крупність, мм					
		пористого гравію			пористого щебеню		
		10	20	40	10	20	40
8...12	-	235	220	205	265	250	235
3...7	-	220	205	190	245	230	215
1...2	3...5	205	190	175	225	210	195
	5...8	195	180	165	215	200	185
	8...12	185	170	160	200	185	175
	12...20	175	160	150	190	175	165

Примітки. 1. Початкові витрати води приведені для бетонів з витратою цементу 450 кг/м^3 і менше, застосуванні щільного піску з $V_n=7\%$ при об'ємній концентрації крупного заповнювача $\phi=0,37$ і водопоглинанні 15%. 2. Бетонні суміші марок ПЗ і П4 виготовляють із пластифікуючими добавками.

Значення φ за табл. 2.21 не повинно перевищувати більш ніж на 0,05 оптимальну величину, що розраховується за формулою (2.20). Якщо ця умова не забезпечується, частину щільного піску замінюють пористим, золошлаковою сумішшю або золою. Для конструкційного бетону міцністю 15...20 МПа рекомендується також при застосуванні щільного піску введення повітровтягувальних добавок, які залучають 3...6% повітря і знижують значення φ на 0,03...0,06.

Таблиця 2.21

Об'ємна концентрація крупного пористого заповнювача (φ) в бетонній суміші

Середня густина бетону в сухому стані, кг/м ³	Об'ємна концентрація заповнювача φ з густиною зерен в цементному тісті, кг/л						
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1300	0,47	0,51	0,54	-	-	-	-
1400	0,43	0,47	0,51	0,54	-	-	-
1500	0,39	0,43	0,47	0,51	-	-	-
1600	0,33	0,37	0,42	0,46	0,51	-	-
1700	-	0,29	0,36	0,41	0,46	0,51	-
1800	-	-	-	0,32	0,4	0,46	0,51
1900	-	-	-	-	0,3	0,38	0,46
2000	-	-	-	-	-	-	0,37

Примітки: 1. Приведені значення справедливі для бетонів із витратою цементу $C=400$ кг/м³, початковим водовмістом $B_0=200$ л/м³, водопотребою піску $B_n = 8\%$. 2. При зміні витрати цементу на ± 100 кг/м³ φ відповідно змінюється на 0,01 – 0,02, а при зміні C на ± 200 кг/м³ – на 0,03 – 0,05. 3. При збільшенні B_0 на кожні 20 л/м³ φ зменшується на 0,02, при зменшенні B_0 на кожні 20 л/м³ φ збільшується на 0,02. 4. При зменшенні або збільшенні B_n на 2% φ відповідно збільшується або зменшується на 0,01.

Витрату крупного пористого заповнювача, кг/м³, за масою і насипному об'єму визначають за формулами:

$$K = 1000\varphi \cdot \rho_k; \quad (2.23)$$

$$V_k = \frac{K}{\rho_k^H}, \quad (2.24)$$

де ρ_k і ρ_k^H – відповідно дійсна і насипна густина крупного пористого заповнювача.

Витрату піску, $\text{кг}/\text{м}^3$, залежно від середньої густини бетону, витрати цементу і крупного заповнювача визначають за формулою:

$$П = \rho_{\sigma} - 1,15Ц - K . \quad (2.25)$$

Загальну водопотребу бетонної суміші знаходять додаючи до початкової витрати води (B_0) за табл. 2.20 поправки на водопотребу піску (B_1), підвищений вміст цементу (B_2) і неоптимальну об'ємну концентрацію крупного заповнювача (B_3). При можливості вводять і інші поправки, що враховують, наприклад, водопоглинання заповнювачів та ін.

Поправка B_1 на водопотребу пористого піску (B_p) знаходиться за формулою (2.17).

Поправка на підвищену витрату цементу ($Ц > 450 \text{ кг}/\text{м}^3$):

$$B_2 = 0,15(Ц - 450) . \quad (2.26)$$

Поправка на неоптимальну з умови водопотреби суміші об'ємну концентрацію крупного заповнювача:

$$B_3 = 2000(\varphi - 0,37)^2 . \quad (2.27)$$

Розрахунок складів конструкційних легких бетонів методом "приведеного Ц/В". Традиційна методика проектування складів конструкційних легких бетонів, що викладена вище, ґрунтується на призначенні орієнтовної витрати цементу й об'ємної концентрації пористого заповнювача на основі довідкових емпіричних даних, що враховують міцність і густину бетону, рухомість бетонної суміші, густину та міцність заповнювачів. З цією метою можуть бути використані як табличні та графічні дані, так і відповідні рівняння регресії.

Параметром суміші, однозначно пов'язаним з міцністю, для легких бетонів може бути "приведене Ц/В" визначене за формулою (2.9).

З формули (2.28), отриманої з формул (2.9) і (2.10) можна знайти витрату цементу при відомих значеннях необхідної витрати води (B), об'єму пор пористого заповнювача ($П_3V_3$),

втягнутого повітря ($V_{\text{пов}}$), вмісту мінеральної добавки (Д) і коефіцієнту її цементуючої ефективності ($K_{\text{ц.е}}$):

$$Ц = Z \cdot \rho_{\text{ц}} (B + (P_3 - W_3^o) V_3 + V_{\text{нов}}) - K_{\text{ц.е}} V_{\text{д}}, \quad (2.28)$$

$$Ц = \frac{R_{\sigma} \cdot (B + (P_3 - W_{\text{д}}^o + V_{\text{нов}}))}{AR_{\text{ц}}} - K_{\text{ц.е}} V_{\text{д}}, \quad (2.28 \text{ a})$$

де R_{σ} – необхідна міцність бетону на стиск, МПа;

$R_{\text{ц}}$ – активність цементу, МПа;

A – коефіцієнт, що враховує вид заповнювача.

Для керамзиту $A \approx 1,7$.

Пористість крупного заповнювача, якщо він представлений керамзитовим гравієм, можна знайти за формулою:

$$P_3 = 1 - \frac{1,8 \cdot \rho_{\text{к}}^{\text{н}}}{\rho}, \quad (2.29)$$

де $\rho_{\text{к}}^{\text{н}}$ – насипна густина керамзитового гравію;

ρ – дійсна густина керамзиту.

Об'ємну концентрацію крупного пористого заповнювача в легкому бетоні (φ) можна знайти за допомогою формули, що враховує коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином (K_p):

$$\varphi = 1 - P_{\text{к}}^{\text{МЗ}} \cdot K_p, \quad (2.30)$$

де $P_{\text{к}}^{\text{МЗ}}$ – об'єм міжзернових пустот крупного заповнювача.

Витрату крупного пористого заповнювача можна знайти з виразів:

об'ємну:

$$V_{\text{к}} = 1000 \cdot \varphi; \quad (2.31)$$

масову:

$$K = 1,89 \varphi \cdot \rho_{\text{к}}^{\text{н}}. \quad (2.32)$$

В табл. 2.22 наведені значення K_p для конструктивних керамзитобетонів, отримані обробкою довідкових даних.

Таблиця 2.22

Значення K_p для конструктивних керамзитобетонів

ρ_k^H , кг/м ³	Густина бетону ρ_b , кг/м ³				
	1400	1500	1600	1700	1800
400	1,25	1,33	1,45	-	-
500	1,18	1,25	1,36	1,50	-
600	1,10	1,19	1,28	1,39	1,54
700	-	-	1,20	1,29	1,45
800	-	-	-	1,21	1,33
900	-	-	-	-	1,22

Примітка. Значення K_p приведені для керамзитобетонних сумішей з ОК=5...9 см. Для сумішей з ОК=10...15 см – значення K_p збільшуються на 0,05...0,15, з ОК=15...20 см на 0,15...0,2 в залежності від середньої густини бетону. Для жорстких бетонних сумішей K_p зменшується в залежності від значень жорсткості і середньої густини бетону.

Вибір крупного пористого заповнювача здійснюється на основі емпіричних даних, що зв'язують його насипну густину (ρ_k^H) з густиною (ρ_b) і міцністю бетону (R_b).

Мінімально можлива насипна густина крупного пористого заповнювача (ρ_k^H) визначається з умови досягнення заданої міцності бетону в зоні ефективних складів. Статистична обробка відомих експериментальних даних для керамзитобетону показує можливість використання рівняння зв'язку:

$$R_k = 0,008\rho_k^H - 1,88, \quad (2.33)$$

де R_k і ρ_k^H – відповідно міцність в МПа і насипна густина керамзитового гравію в кг/м³.

Максимально можлива густина крупного пористого заповнювача при $\varphi=const$ лімітується необхідною середньою густиною бетону (ρ_b) і густиною його розчинової складової (ρ_p). Вона може бути знайдена з рівняння:

$$\rho_b = \rho'_k\varphi + \rho_p(1-\varphi) - B_{вин}, \quad (2.34)$$

де ρ'_k і ρ_p – відповідно густина зерен крупного заповнювача в цементному тісті і густина розчину;

$B_{вип}$ – маса води, що випаровується і утворює додатковий об'єм пор.

Величину $B_{вип}$ можна знайти, знаючи загальний водовміст бетонної суміші і її частину, що хімічно зв'язується з цементом:

$$B_{вип} \approx B - 0,15Ц . \quad (2.35)$$

З формули (2.34) максимальна можлива густина крупного заповнювача:

$$\rho'_k = \frac{\rho_b - \rho_p(1 - \varphi) + B_{вип}}{\varphi} . \quad (2.36)$$

Густина зерен крупного заповнювача в цементному тісті (ρ'_k) і насипна густина (ρ_k^H) пов'язані залежністю:

$$\rho'_k \approx 1,05 \frac{\rho_k^H}{1 - P_k^{МЗ}} , \quad (2.37)$$

де $P_k^{МЗ}$ – міжзернова пустотність крупного заповнювача.

Для керамзитового гравію при $P_k^{МЗ} = 0,43$, $\rho'_k \approx 1,89 \rho_k^H$.

Орієнтовно максимальну можливу насипну густину крупного заповнювача можна знайти з нормативних і довідкових даних. Відомо, зокрема, що для щільного легкого бетону максимальне відношення ρ_k^H / ρ_b , що рекомендується при ρ_b до 800 кг/м³ – 0,40; 800...1100 кг/м³ – 0,45; 1200...1400 кг/м³ – 0,50; 1400...1800 кг/м³ – 0,55.

Вид піску, що характеризується його густиною (ρ_n), залежить від необхідної густини розчинової складової, а остання від необхідної густини бетону. Номограми, що дозволяють знайти ρ_n і встановити необхідну середню густину розчину приведені на рис. 2.5, 2.6.

Номограма (рис. 2.5) отримана обробкою відомих довідкових даних.

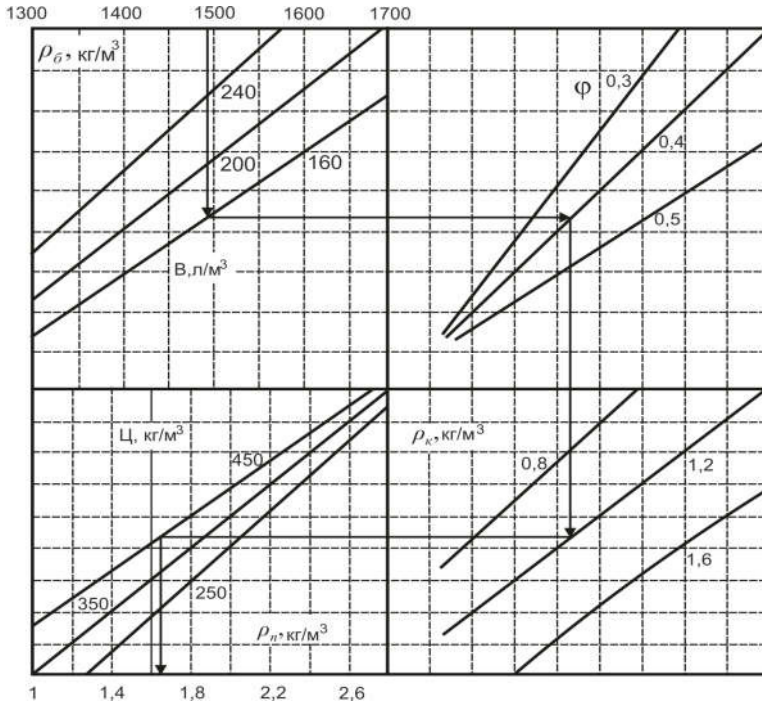


Рис. 2.5. Номограма для визначення необхідної густини піску ρ_n залежно від ρ_s , витрат води (В), цементу (Π), параметра ϕ і ρ_c

Для отримання номограми (рис. 2.6) використане рівняння:

$$\rho_p = \frac{1,15 + \Pi / \Pi}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{\Pi / \Pi}{\rho_n} + B / \Pi}, \quad (2.38)$$

де ρ_c – густина цементу;

Π / Π і B / Π – відповідно піщано-цементне і водоцементне відношення.

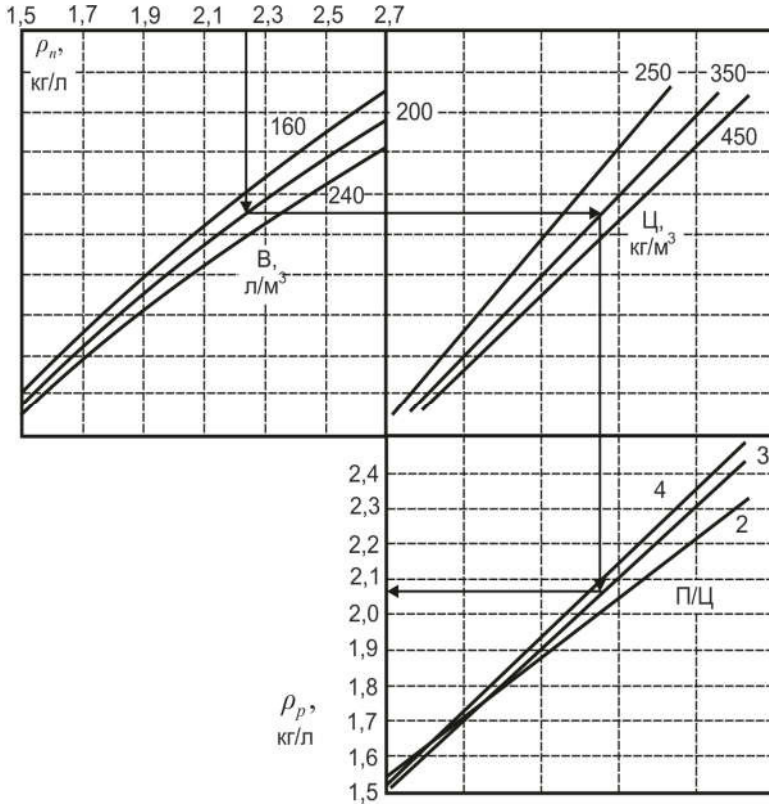


Рис. 2.6. Номограма для визначення необхідної густини розчину ρ_p в залежності від ρ_n , витрат води, цементу і співвідношення П/Ц

З (2.38) при $\rho_c=3,1$ г/см³ випливає, що максимально допустима густина зерен піску:

$$\rho_n = \frac{\rho_p \text{ П / Ц}}{1,15 + \text{П / Ц} - \rho_p (0,32 + \text{В / Ц})}. \quad (2.39)$$

Густина розчинової складової легкого бетону може бути зменшена її поризацією за рахунок введення

повітровтягувальноїдобавки. Необхідний об'єм повітря ($V_{нов}$) у % для доведення розчину з густиною ρ_p до ρ'_p знаходиться з умови:

$$V_{нов} = 100 - \frac{100\rho'_p}{\rho_p}. \quad (2.40)$$

Перехід від $V_{нов}$ до необхідного вмісту повітровтягувальної добавки виконується за допомогою відповідних емпіричних залежностей.

Для бетонів на щільному піску витрата останнього знаходиться з умови абсолютних об'ємів (2.15) після визначення з рівняння (2.28) витрати цементу.

З урахуванням виду матеріалів, що використовують, і заданого показника легкоукладальності призначається витрата води. Статистичною обробкою відомих довідкових даних отримані базові рівняння регресії для визначення витрати води в л/м³ для бетону на керамзитовому ґравії і кварцовому піску:

$$B_0^{OK} = 2,33OK - 0,04\rho_k^H + 230, \quad (2.41)$$

$$B_0^{\mathcal{K}} = 258 - 21,87 \ln(\mathcal{K}) - 0,04\rho_k^H, \quad (2.42)$$

де OK і \mathcal{K} – відповідно рухомість (см) і жорсткість (с) бетонної суміші.

Базові значення витрати води уточнюються із урахуванням крупності крупного і дрібного заповнювачів, виду цементу, добавок та ін.

При застосуванні поряд зі щільним (Π) пористого піску ($\Pi_{пор}$) для визначення їх вмісту в бетонній суміші при певних значеннях витрат цементу, початкового вмісту води, об'ємної концентрації крупного заповнювача необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\Pi / \rho_n + \Pi_{пор} / \rho_{пор.n} + B_o = 1000(1 - \phi) + \mathcal{C} / \rho_c; \quad (2.43)$$

$$\Pi + \Pi_{пор} = \rho_{\sigma} - 1,15\mathcal{C} - 1000\phi\rho'_k \quad (2.44)$$

Загальну витрату цементу знаходять за наступним виразом:

$$Ц' = Ц \cdot K_{ц} \cdot K_{OK(ж)}, \quad (2.45)$$

де $Ц$ – початкова витрата цементу, визначена з формули (2.28). Поправку $K_{ц}$ вводять на активність цементу, при використанні цементу з активністю, відмінною від $R_{ц}=40$ МПа (для $R_{ц}=40$ МПа $K_{ц}=1$). Для $R_{ц}=50$ $K_{ц}=0,89$; $R_{ц}=30$ – $K_{ц}=1,17$;
 $K_{OK(ж)}$ – поправка на легкоукладальність суміші:
 – для пластичних сумішей:

$$K_{OK} = (0,0164 \cdot ОК) + 1,054 ; \quad (2.46)$$

– для жорстких сумішей:

$$K_{жс} = 1,038 - 0,094 \cdot Ж . \quad (2.47)$$

Приклади

2.1. Розрахувати склад конструкційно-теплоізоляційного керамзитобетону поризованої структури з необхідною міцністю 3,5 МПа, густиною в сухому стані 900 кг/м³ із показником легкоукладальності бетонної суміші $OK=1 \dots 2$ см.

Матеріали: портландцемент М400, керамзитовий гравій фракції 5...20 мм з насипною густиною 500 кг/м³, густиною зерен в цементному тісті 0,9 кг/л; подрібнений керамзитовий пісок з насипною густиною 640 кг/м³ і густиною зерен в цементному тісті 1,4 кг/л.

1. За даними табл. 2.10 визначаємо, що на даних матеріалах можна отримати керамзитобетон із заданою середньою густиною.

2. Орієнтовну витрату керамзитового гравію приймаємо (табл. 2.15) 1 м³ на 1 м³ бетону (500 кг/м³).

3. Приблизна витрата цементу М400 складає (табл. 2.16) 210 кг/м^3 . Однак для армованих конструкцій з умови корозійної стійкості арматури витрату цементу приймаємо 220 кг/м^3 .

4. Витрату піску знайдемо за формулою (2.15):

$$П = 900 - (500 + 1,15 \cdot 220) = 147 \text{ кг};$$

$$V_n = 147/640 = 230 \text{ л.}$$

5. Витрата води з урахуванням рекомендацій табл. 2.20 і поправки на застосування подрібненого керамзитового піску складе:

$$B = 190 + 10 = 200 \text{ л.}$$

6. Розраховуємо необхідну ступінь поризації (аерації) бетонної суміші:

$$V_{пор} = \frac{1000 - \left(\frac{220}{3,1} + \frac{147}{1,4} + \frac{500}{0,9} + 200 \right)}{10} = \frac{1000 - 932}{10} = 6,8\%.$$

Розрахунковий склад керамзитобетону:

$$Ц = 220 \text{ кг/м}^3; K = 500 \text{ кг/м}^3; П = 147 \text{ кг/м}^3; B = 200 \text{ л/м}^3.$$

2.2. Розрахувати склад керамзитобетону з заданою міцністю 25 МПа, густиною в сухому стані 1700 кг/м^3 при рухомості бетонної суміші за осадкою конуса ОК=3...7 см.

Матеріали: цемент М500; пісок щільний із $\rho_n = 2,65 \text{ кг/л}$ і водопотребою 6,5%; керамзитовий гравій двох фракцій 5...10 мм і 10...20 мм у співвідношенні 40:60% з середньою густиною зерен в цементному тісті $\rho'_{з.к} = 1,22 \text{ кг/л}$ та маркою за міцністю зерен П250.

За своїми властивостями керамзитовий гравій задовольняє вимогам, необхідним для отримання заданих властивостей бетону (табл. 2.14).

1. За табл. 2.18 орієнтовна витрата цементу складає 310 кг/м^3 . З урахуванням поправочних коефіцієнтів на цемент М500 – 0,85 і осадку конуса 3...7 см – 1,15, (табл. 2.19), витрата цементу:

$$Ц = 310 \cdot 0,85 \cdot 1,15 = 305 \text{ кг/м}^3.$$

2. За табл. 2.20 початкова витрата води $B_0=205 \text{ л/м}^3$.

3. Об'ємна концентрація керамзиту (табл. 2.21) $\varphi=0,38$.

Витрата керамзиту за масою: $K=1000 \square 0,38 \square 1,22=465 \text{ кг/м}^3$.

4. Витрата піску(за формулою 2.25):

$$П = 1700 - 1,15 \cdot 305 - 465 = 885 \text{ кг/м}^3.$$

Загальна витрата води з урахуванням поправок на водопотребу піску (2.17) і об'ємну концентрацію крупного заповнювача (2.27):

$$B = 205 + 0,025 \cdot 885/2,65(65 - 7) + 2000(0,38 - 0,37)^2 = 221 \text{ л/м}^3.$$

Розрахунковий склад керамзитобетону:

$$Ц = 305 \text{ кг/м}^3, K = 465 \text{ кг/м}^3, П = 885 \text{ кг/м}^3, B = 221 \text{ л/м}^3.$$

2.3.Запроектувати склад конструкційного керамзитобетону міцністю 25 МПа і густиною 1700 кг/м³ на керамзитовому ґравії з насипною густиною $\rho_k^H = 700 \text{ кг/м}^3$ і кварцовому піску. Рухомість суміші ОК=5 см. Активність цементу $R_{ц}=50 \text{ МПа}$. Міжзернова пористість керамзиту $\Pi_k^{мз} = 0,44$. Кількість втягнутого повітря в бетоні $V_{пв}=2\%$. Дійсна густина керамзиту: $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$. Об'ємне водопоглинання керамзиту $W_k^0 = 20\%$.

1. Визначасмо необхідне "приведене Ц/В" для забезпечення заданої міцності бетону з формули (2.10):

$$Z = \frac{25}{1,7 \cdot 50} = 0,294.$$

2. Визначасмо витрату води (ф-ла 2.41).

При ОК=5 см і $\rho_n = 700 \text{ кг/м}^3$:

$$B_{ок} = 2,33 \cdot 5 - 0,04 \cdot 700 + 230 = 214 \text{ л.}$$

3. Знаходимо значення коефіцієнта розсунення K_p . Для прийнятих значень густин бетону і заповнювача $K_p = 1,45$ (табл. 2.22).

4. Розраховуємо об'ємну концентрацію й об'ємний вміст керамзиту в бетоні використовуючи формулу (2.30).

При міжзерновійпустотності керамзиту $P_{\kappa}^{M3} = 0,44$:

$$\varphi = 1 - 0,44 \cdot 1,45 = 0,362 .$$

Тоді об'ємний вміст керамзиту (ф-ла 2.31):

$$V_3 = 1000 \cdot 0,362 = 362 \text{ л.}$$

5. Знаходимо витрату керамзиту(ф-ла 2.32):

$$K = 1,89 \cdot 0,362 \cdot 700 = 479 \text{ кг.}$$

6. Знаходимо пористість керамзиту (ф-ла 2.29):

$$P_3 = 1 - \frac{1,8 \cdot 700}{2700} = 0,53.$$

7. Визначаємо початкову витрату цементу з рівняння (2.28) з урахуванням відсутності в бетонній суміші активної мінеральної добавки:

$$C = 0,294 \cdot (214 + (0,53 - 0,2) \cdot 362 + 20) \cdot 3,1 = 322 \text{ кг.}$$

8. Розраховуємо поправки на:

– активність цементу, для $R_u = 50$ МПа; $K_u = 0,89$;

– для пластичних сумішей (ф-ла 2.46):

$$\Delta C = 0,0164 \cdot OK + 1,054 = 0,0164 \cdot 5 + 1,054 = 1,136.$$

9. Загальна витрата цементу визначена за формулою (2.45):

$$C' = C_o \cdot K_u \cdot \Delta C,$$

буде складати $C' = 322 \cdot 0,89 \cdot 1,136 = 326$ кг.

10. З формули (2.15) знаходимо витрати піску:

$$П = 1700 - 1,15 \cdot 326 - 479 = 846 \text{ кг.}$$

Розрахунковий склад конструктивного керамзитобетону:

$$C = 322 \text{ кг/м}^3; B = 214 \text{ кг/м}^3; K = 479 \text{ кг/м}^3; П = 846 \text{ кг/м}^3.$$

3. ЛЕГКІ БЕТОНИ НА ОРГАНІЧНИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ

З легких бетонів цієї групи в будівництві поширені бетони на основі пінополістирольних гранул, а також продуктів переробки деревини і іншої рослинної сировини.

3.1. Полістиролбетон

Полістиролбетон – бетон на основі гранул пінополістиролбетону (рис. 3.1), має ряд переваг: низькі середню густину (до 150 кг/м^3), сорбційну вологість і водопоглинання (8-12%), яке у 3-4 рази менше, ніж у газобетону, достатню паропроникність та високу екологічну безпеку. На його основі одержують матеріали від теплоізоляційного до конструктивного призначення. Основні властивості полістиролбетону наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Основні вимоги до полістиролбетону

Марки за міцністю на стиск (М)	Клас за міцністю на стиск (В)	Границя міцності на розтяг при згині, МПа*	Марки за густиною	Марки за морозостійкістю	Коефіцієнт теплопровідності у сухому стані, Вт/(м·°С)
М2	-	0,08	150...200	35-50	0,055...0,065
М2,5	-	0,10	150...200	50-75	0,055...0,065
М3,5	-	0,15	200...250	75-100	0,065...0,075
М5	В0,35	0,25	200...300	100-150	0,065...0,085
-	В0,5	0,35	250...350	100-150	0,075...0,095
-	В0,75	0,50	300...400	150	0,085...0,10
-	В1,0	0,60	350...450	150-200	0,095...0,115
-	В1,5	0,65	400...500	200-250	0,10...0,125
-	В2,0	0,70	500...600	250-300	0,125...0,145
-	В2,5	0,73	500...600	250-300	0,125...0,145

*Міцність полістиролбетону на осьовий розтяг дорівнює міцності на розтяг при згині, помноженій на коефіцієнт $K=0,32$.



Рис. 3.1. Полістиролбетон

Теплотехнічні характеристики полістиролбетону наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Теплотехнічні характеристики полістирол бетону

Марка за середньою густиною	Коефіцієнт теплопровідності у сухому стані (λ_c , Вт/м·°C)	Розрахункові характеристики виробів залежно від умов експлуатації		
		Вологість	Коефіцієнт теплопровідності λ , (Вт/м·°C)	Паропроникність Мг/(м·год·Па)
D150	0,051	3,0...4,0	0,054...0,056	0,135
D175	0,055	3,0...4,0	0,058...0,060	0,128
D200	0,062	3,0...4,0	0,066...0,069	0,120
D225	0,066	3,0...4,5	0,071...0,075	0,115
D250	0,070	3,0...4,5	0,076...0,080	0,110
D300	0,073	3,0...5,0	0,085...0,091	0,100
D350	0,085	3,0...5,0	0,095...0,101	0,090
D400	0,095	3,5...6,0	0,106...0,117	0,085
D450	0,105	4,0...7,0	0,118...0,130	0,080
D500	0,115	4,0...7,0	0,130...0,145	0,075
D550	0,125	4,0...8,0	0,143...0,160	0,070
D600	0,135	4,0...8,0	0,158...0,176	0,068

Модуль пружності полістиролбетону збільшується при збільшенні середньої густини і міцності від $0,42 \cdot 10^{-3}$ МПа до $2,1 \cdot 10^{-3}$ МПа.

Опір повітряпроникності полістиролбетону при розрахунках огорожуючих конструкцій приймають $120 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год.}$ на товщину 100 мм.

Полістиролбетон з середньою густиною D250 і вище з витратою цементу не менше, ніж $200 \text{ кг}/\text{м}^3$ забезпечує при звичайних умовах експлуатації збережуваність сталевій арматури від корозії.

Полістиролбетонні вироби можуть виконувати одночасно функції стінових та теплоізоляційних матеріалів. Вони застосовуються у вигляді блоків, плит, перемичок і використовуються в зовнішніх огорожувальних конструкціях житлових і громадських будівель. Високі показники якості полістиролбетону забезпечуються при додатковій поризації за рахунок повітровтягування та введення добавок, що забезпечують необхідну зв'язність, зручність та ущільнюваність бетонних сумішей і дрібнопористу структуру розчинової частини.

Виходячи з правила «приведеного Ц/В» і абсолютних об'ємів можна запропонувати алгоритм (рис. 3.2) розрахунку полістиролбетону з заданими міцністю та густиною.

Нижче наведено методику розрахункового визначення складу полістиролбетону.

1. Визначасмо витрату цементу з умови заданої густини бетону.

Запишемо рівняння густини бетону:

$$\begin{aligned} \rho_o &= 1,15Ц + П + Д + Пс = 1,15Ц + C_nЦ + \\ &+ C_oЦ + C_{пс}Ц = Ц(1,15 + C_n + C_o + C_{пс}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

де П – витрата піску кг на 1 м^3 бетону;

$C_n = П/Ц$ – співвідношення «пісок:цемент» за масою;

$C_o = Д/Ц$ – співвідношення «активна мінеральна добавка: цемент» за масою;

$C_{Пс} = Пс/Ц$ – співвідношення «пінополістирольні гранули: цемент» за масою.

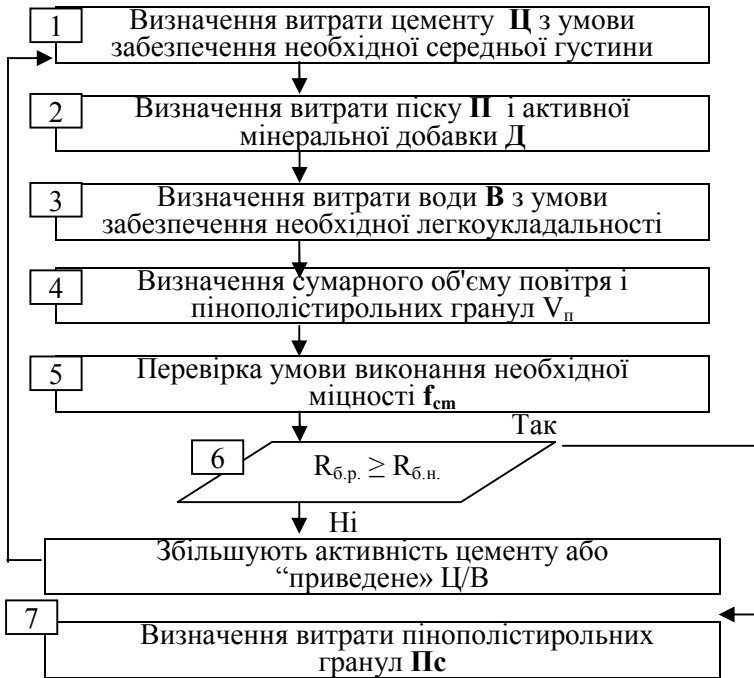


Рис. 3.2. Алгоритм розрахунку полістиролбетону з заданими міцністю та густиною
($R_{б.р.}$ – розрахункова міцність, МПа, $R_{б.н.}$ – необхідна міцність, МПа)

Оскільки витрата пінополістирольних гранул складає 3...5% від маси цементу, то на стадії розрахунку складу можна орієнтовно прийняти $C_{Пс} \approx Пс/Ц \approx 0$.

Тоді витрата цементу з умови забезпечення необхідної густини:

$$Ц = \frac{\rho_0}{1,15 + C_n + C_\delta} \quad (3.2)$$

На стадії проектування складів значення C_n для теплоізоляційного бетону можна приймати в межах 0,25...0,5,

для конструкційно-теплоізоляційного $C_n=0,5\dots1,5$ з урахуванням заданих вимог до полістиролбетону. Коефіцієнт $C_o=0,25\dots0,5$ для меленого доменного шлаку і $C_o=0,5\dots1$ для золи винесення.

2. Визначаємо витрату піску і активної мінеральної добавки:

$$П = C_n Ц, \quad (3.3)$$

$$Д = C_o Ц. \quad (3.4)$$

3. Призначаємо за емпіричними даними витрату води для досягнення необхідної рухомості полістиролбетонної суміші. Можливе зменшення водопотреби при застосуванні добавок пластифікаторів в середньому складає $20\dots60$ л/м³.

4. Визначаємо сумарний об'єм у бетоні пінополістирольних гранул V_{nc} і повітря V_{ne} методом абсолютних об'ємів.

$$V_{nc} + V_{ne} = 1000 - (V_u + V_n + V_o + V_e) \quad (3.5)$$

де V_u, V_n, V_o, V_e – об'єми цементу, піску, добавки і води.

5. Перевіряємо можливість досягнення необхідної міцності бетону за залежністю:

$$R_o = p A_i R_u \left(\frac{V_u + K_{u.e.} \cdot V_o}{V_e + V_{n.e}} + b \right), \quad (3.6)$$

де $p A_i$ – мультиплікативний коефіцієнт, який враховує якість вихідних матеріалів, легкоукладальність суміші, вид і концентрацію добавок та ін.;

R_u – активність цементу, МПа;

V_u – витрата цементу на 1 м³ бетону, л;

$K_{u.e.}$ – коефіцієнт цементуючої ефективності або «цементний еквівалент» активної мінеральної добавки;

V_o – витрата активної мінеральної добавки на 1 м³ бетону, л;

V_e – витрата води на 1 м³ бетону, л;

V_{ne} – об'єм повітря залученого в бетонну суміш в т.ч. пористими заповнювачами.

Для розрахунку міцності полістиролбетону можна орієнтовно прийняти:

$$V_{ne} = V_{nc} + V_{z.n} + V_{e.n}, \quad (3.7)$$

де $V_{n.c}$ – об’єм пінополістирольних гранул, л;

$V_{e.n}$ – об’єм повітря, яке вводиться завдяки повітрявтягуючої добавки або технічної піни,

$V_{z.n}$ – об’єм залишкового повітря.

Виходячи із метода абсолютних об’ємів, з достатньою точністю можна вважати, що

$$V_{ne} = 1000 - (Ц / \rho_{ц} + Д / \rho_{д} + П / \rho_{п} + V_{e}), \quad (3.8)$$

де $\rho_{ц}$, $\rho_{д}$, $\rho_{п}$ – дійсна густина цементу, активної мінеральної добавки і піску відповідно.

Мультиплікативний коефіцієнт pA_1 у формулі (3.6) можна записати у вигляді:

$$pA_1 = 0,5A_1A_2A_3, \quad (3.9)$$

де множник A_1 залежить від діаметра полістирольних гранул, A_2 враховує наявність або відсутність піску у складі полістиролбетону, A_3 – вплив хімічних добавок.

У міру накопичення експериментальних даних у мультиплікативний коефіцієнт pA_1 можна вводити і інші множники, які враховують вплив технологічних факторів, суттєво змінюючих міцність бетону при постійних значеннях активності цементу і “приведеного Ц/В”.

Статистична обробка результатів виконаних досліджень дозволила графічно апроксимувати залежність коефіцієнта A_1 від середнього діаметра гранул пінополістиролу d (рис. 3.3). Коефіцієнт A_2 при наявності у складі полістиролбетону кварцового піску можна прийняти рівним 1,19, при його відсутності $A_2=1$.

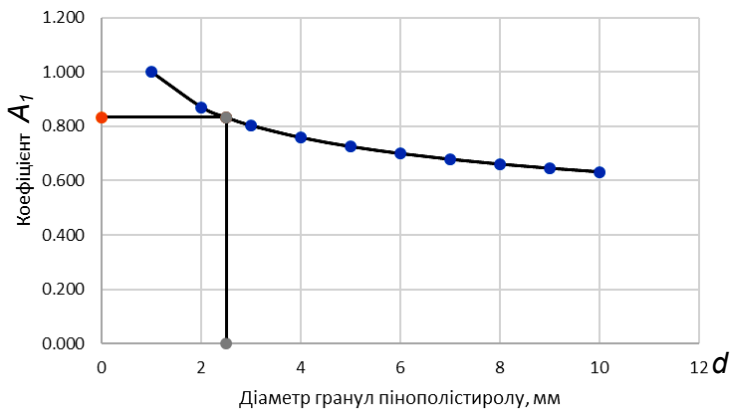


Рис. 3.3. Графік для визначення коефіцієнта A_1

Середню густину легкого бетону можна описати відомою залежністю:

$$\rho_o = 1,15Z + 3, \quad (3.10)$$

де Z – сумарна витрата заповнювачів та активних наповнювачів на 1 м^3 бетону.

Співвідношення густини і міцності полістиролбетону залежить від параметрів його складу (табл. 3.3).

6. Перевіряємо можливість досягнення необхідної міцності за залежністю (3.6). Значення коефіцієнта “ v ” для найбільш поширених складів полістиролбетону можна прийняти “-0,05”.

Якщо умова міцності виконується, тобто розрахункове значення міцності полістиролбетону не менше нормованого, то можна переходити до наступного кроку. При суттєвому (більше 20%) перевищенні R_{cm} його нормованого значення вживають заходів щодо економії цементу – замінюють його частину на пісок або активну мінеральну добавку, збільшивши коефіцієнти C_n і C_d у рівнянні (3.2).

У разі невиконання умови міцності (3.6) слід використовувати цемент з більш високою активністю або збільшити значення “приведеного цементно-водного

відношення”, зменшивши вміст піску C_n або замінивши його на активну мінеральну добавку.

Таблиця 3.3

Рекомендовані значення максимально можливої міцності полістиролбетону певної густини

Середня густина бетону, кг/м^3	Параметри складу					
	$C_d=C_n=0$	$C_d=0,5$ $C_n=0$	$C_d=0$ $C_n=1$	$C_d=0,5$ $C_n=0,5$	$C_d=0,5$ $C_n=1$	$C_d=0,5$ $C_n=1,5$
	Максимальна міцність полістиролбетону, МПа					
300	0,92	-	-	-	-	-
400	1,78	1,29	-	-	-	-
500	2,69	2,06	0,91	1,52	0,97	-
600	3,66	2,90	1,46	2,29	1,60	1,12

7. Визначаємо витрату пінополістирольних гранул (V_{nc}) і повітрявтягуючої (піноутворюючої) добавки, якщо вона вводиться:

– при дозуванні гранул за об’ємом (у насипному стані):

$$V_{nc} = V_{в.п} - V_{в.п} - V_{з.п}, \quad (3.11)$$

де $V_{в.п}$ – об’єм втягнутого повітря (як правило $V_{в.п}$ становить 20...60 л),

$V_{з.п}$ – об’єм залишкового повітря ($V_{з.п}=10...20$ л).

Розрахункові склади полістиролбетону як і інших видів бетону підлягають експериментальному підтвердженню.

Приклад 3.1. Розрахувати склад полістиролбетону з середньою густиною у сухому стані $\rho_0=600$ кг/м^3 і необхідною міцністю при стиску $R_0=2,2$ МПа. В’яжуче – портландцемент з активністю 53 МПа, заповнювач – кварцовий пісок з густиною $\rho_n=2,7$ кг/л , і пінополістирольні гранули з густиною 15 кг/м^3 і пористістю у насипному стані 41%, середнім діаметром 2,5 мм. Застосовується активна мінеральна добавка – доменний гранульований шлак з $\rho_{ш}=2,5$ кг/л і коефіцієнтом цементуючої ефективності $K_{ц.е.}=0,33$ і повітровтягуюча добавка СНП, що забезпечує об’єм втягнутого повітря $V_{в.п.}=40$ л. Витрата води для досягнення необхідної рухомості $B=160$ л.

1. Приймавши за табл. 3.3 $C_n=0,5$ і $C_d=0,5$, визначаємо вміст цементу за формулою (3.2):

$$Ц = \frac{600}{1,15 + 0,5 + 0,5} = 279 \text{ кг/м}^3.$$

2. Витрата піску Π за формулою (3.3):

$$\Pi = 0,5 \cdot 279 = 139,5 \text{ кг/м}^3.$$

3. Витрата шлаку за формулою (3.3):

$$Д = 0,5 \cdot 279 = 139,5 \text{ кг/м}^3.$$

4. Призначаємо за емпіричними даними витрату води:

$$B = 160 \text{ кг/м}^3.$$

5. Сумарний об'єм пінополістирольних гранул, втягнутого і залишкового повітря за формулою (3.8);

$$V_{n.c.} = 1000 - \left(\frac{279}{3,1} + \frac{139,5}{2,5} + \frac{139,5}{2,7} + 160 \right) = 1000 - (90 + 55,8 + 51,7 + 160) = 642,5 \text{ м}^3.$$

6. Знайдемо за формулою (3.6) розрахункову міцність полістиролбетону, приймавши коефіцієнт $A_1=0,83$ (рис. 3.1) і коефіцієнт $A_2=1,19$:

$$R_{б.р} = 0,5 \cdot 1,19 \cdot 53 \left(\frac{279/3,1 + 0,33 \cdot 139,5/2,5}{160 + 642,5} \right) - 0,05 = 2,23 \text{ МПа}.$$

Розрахункова міцність бетону забезпечує необхідну проектну міцність 2,2 МПа.

7. Витрата пінополістирольних гранул у насипному стані (об'єм залишкового повітря приймаємо 15 л/м^3):

$$V_{n.c.} = 642,5 - 40 - 15 = 587,5 \text{ л/м}^3.$$

Для забезпечення втягування 40 л повітря згідно рекомендаціям для добавки СНП вводимо її в кількості 0,02% від маси цементу.

Розрахунковий склад 1 м^3 полістиролбетонної суміші: цемент – 279 кг; доменний шлак – 139,5 кг; пісок – 139,5 кг;

пінополістирольні гранули – 0,587 м³; вода – 160 л/м³; добавка СНП – 0,0002×279=0,056 кг.

Сумарний об'єм всіх компонентів 1м³ бетону:

$$V_{\sigma} = V_{\text{ц}} + V_{\text{п}} + V_{\text{ш}} + V_{\text{п.с}} + V_{\text{в}} + V_{\text{с.п}} + V_{\text{з.п}} = \\ = 90 + 55,8 + 51,7 + 587,5 + 160 + 40 + 15 = 1000 \text{ л/м}^3.$$

3.2. Матеріали на основі деревних відходів та мінеральних в'язучих

Деревні відходи без попередньої переробки (тирса, стружка) або після подрібнення (тріска, дрібняк та ін.) можуть бути використані як заповнювачі в будівельних матеріалах на основі мінеральних в'язучих речовин.

Останніми десятиліттями будівельні матеріали з використанням відходів деревини та мінеральних в'язучих речовин (арболіт, фірболіт, цементно-стружкові плити тощо) знаходять все більше застосування в будівництві. Комплексне використання деревини сприяє не тільки вирішенню екологічних проблем, але й забезпечує отримання якісних будівельних матеріалів, які відрізняються невисокою середньою густиною ($\rho_0=300\text{...}800 \text{ кг/м}^3$) та досить низьким коефіцієнтом теплопровідності ($\lambda=0,093\text{...}0,23 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$), неспалімістю, біостійкістю, легко піддаються різним видам обробки.

Залежно від складу вихідної суміші, ступеня ущільнення, а також від виду і форми заповнювача, можливе отримання будівельних матеріалів конгломератної будови з суттєво відмінними властивостями. Просоченням деревних заповнювачів мінералізаторами і наступним змішуванням їх з мінеральними в'язучими забезпечується біостійкість і важкоспалімість матеріалів на їхній основі. Недоліками матеріалів на деревних заповнювачах є високе водопоглинання та порівняно низька водостійкість.

За призначенням ці матеріали поділяють на теплоізоляційні, конструкційно-теплоізоляційні й конструкційні.

Ступінь придатності основних порід деревини для виготовлення матеріалів із застосуванням портландцементу наведена в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Придатність деяких порід деревини для отримання будівельних матеріалів конгломератної будови

Порода деревини	Вміст водорозчинних речовин, %	Показник придатності деревини*
Ялина	1,12	1
Тополя	1,29...1,45	2
Береза	2,67	3
Сосна	3,16...6,2	4
Дуб	2,55...7,33	5
Ясен	2,24...5,81	6
Модрина	10,6	7

*При збільшенні показника ступінь придатності порід зменшується

Поряд з деревними заповнювачами для виробництва матеріалів із застосуванням мінеральних в'язучих можуть застосовуватися й інші целюлозомісткі заповнювачі.

У композиції з деревними заповнювачами можуть застосовуватися всі види мінеральних в'язучих речовин, основним серед яких залишається портландцемент.

При застосуванні деревних і інших рослинних заповнювачів ефективно використання швидкотверднучого портландцементу з переважанням аліту як основного мінералу цементного клінкера. Використання швидкотверднучих цементів дозволяє одержати достатню міцність матеріалів до початку активного виділення шкідливих речовин деревини. Поряд із застосуванням високоалітових цементів є позитивний досвід використання швидкотужавіючих *білітошлямових цементів*, що не містять аліт. Основним компонентом цих в'язучих є біліт, який меншою мірою піддається дії екстрактивних речовин, що містяться в заповнювачі рослинного походження. Ці в'язучі одержують шляхом спільного помелу випаленого при 650...700° С т.зв. білого шламу – відходу металургійного виробництва та 12...15% гіпсу.

З успіхом можуть бути також використані *алінітовий цемент* і в'язуче ВНВ (в'язуче низької водопотреби). Алінітовий цемент одержують на основі алінітового клінкера низькотермального синтезу (випалом до спікання при температурі 1000...1200° С), який містить хлорид кальцію (хлорид магнію) і забезпечує переважний вміст у клінкері високоосновного хлорсилікату кальцію (*алініту*), а також ортосилікату, хлоралюмінату, хлоралюмофериту і хлорфериту. Алінітовий цемент випускається марок 400, 500 і 550. Його доцільно використовувати для неармованих конструкцій і виробів.

В'язучі низької водопотреби одержують спільним помелом портландцементного клінкеру, піску, шлаку і суперпластифікатора. Питома поверхня в'язучого ВНВ – 4500...5200 см²/г. Строки тужавлення його можна регулювати в широкому діапазоні. Порівняно з портландцементом ВНВ має значно меншу водопотребу і більшу швидкість набору міцності, що дозволяє покращити структуроутворення в контактній зоні з деревним заповнювачем.

На відміну від цементу *високоміцний гіпс* забезпечує більш швидке твердіння, а також одержання матеріалів з меншою густиною і більшою міцністю при однаковій витраті в'язучих. При взаємодії з водою гіпс утворює нейтральне середовище, що на відміну від лужного не викликає виділення з деревини цукрів, які негативно впливають на твердіння цементу, і немає необхідності мінералізувати подрібнену деревину.

До числа кращих в'язучих для будівельних виробів на заповнювачах рослинного походження відносяться магнезіальні в'язучі речовини (*каустичний магнезит* і *каустичний доломіт*), які замішуються водними розчинами хлористого магнію та деяких інших солей. Виробництво цих в'язучих, однак, досить обмежене, в основному, у зв'язку з дефіцитом сольових замішувачів.

Головними представниками групи матеріалів на деревних заповнювачах і мінеральних в'язучих є арболіт, фіброліт та тирсобетони.

Арболіт – це легкий бетон на заповнювачах рослинного походження, що попередньо оброблені розчином мінералізатора,

рис. 3.4. Цей матеріал застосовується в промисловому, цивільному і сільськогосподарському будівництві у вигляді панелей і блоків для зведення стін і перегородок, теплоізоляційних і звукоізоляційних плит тощо. Арболітові конструкції експлуатують при відносній вологості повітря приміщень не більше 60%, при більшій вологості необхідне влаштування пароізоляційного шару.



Рис. 3.4. Арболіт

Небажаними для арболіту є впливи агресивних середовищ, температури понад 50°C та нижче -40°C .

Залежно від середньої густини у висушеному до постійної маси стані, арболіт поділяється на теплоізоляційний (із середньою густиною до 500 кг/м^3) та конструкційний ($500\text{...}850\text{ кг/м}^3$) (табл. 3.5).

Теплопровідність арболіту залежить від середньої густини та виду заповнювача. Арболіт, отриманий на основі подрібненої деревини із середньою густиною $400\text{...}850\text{ кг/м}^3$, має коефіцієнт теплопровідності $0,08\text{...}0,17\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, а на основі подрібнених стебел бавовнику, рисової соломи, костриці льону та коноплі – $0,07\text{...}0,12\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$.

Таблиця 3.5

Фізико-технічні властивості арболіту

Показники	Заповнювач-дрібняк із відходів:		
	лісопи- ляння	лісозаго- тівлі	коноплі й льону
Середня густина, кг/м ³	400...800	500...750	500...700
Границя міцності при стиску, МПа	0,5...3,5	0,5...3,5	0,5...2,5
Границя міцності при згині, МПа	0,7...1,0	0,7...1,0	0,2... 0
Модуль пружності, МПа	200...400	200...400	150...300
Морозостійкість, не менше, циклів	25...50	25...50	15...25
Відпускна вологість, не більше, %	25	25	25
Водопоглинання, %	40...85	40...85	30...120
Усадка, %	0,4...0,5	0,4...0,5	0,4...0,5
Сорбційне зволоження (при відносній вологості 40...90%)	4,5...8	4,5...12	6...14
Коефіцієнт теплопровідності (при вологості 12...15%), Вт/(м·°С)	0,081...0,162	0,081...0,2	0,069...0,12
Коефіцієнт паропроникності, кг/(м·с·Па)	0,034...0,14	0,034...0,1	0,034...0,14
Коефіцієнт теплосасвоєння, Вт/(м·°С)	3,17...4,52	3,17...4,52	3,17...4,52
Вогнестійкість	Важкоспалимі (вогнестійкість – 0,75...1,5 години)		
Коефіцієнт звукопоглинання (при частотах звуку від 125...2000 Гц)	0,17...0,6	0,17...0,6	0,17...0,5

Для виготовлення конструкцій із арболіту застосовують наступні матеріали: в'язучі (портландцемент і його різновиди, високоміцний гіпс, гіпсоцементнопуцоланова в'язуча речовина), заповнювачі (відходи деревини або інших матеріалів рослинного походження), хімічні добавки (хлорид кальцію, рідке скло, оксид кальцію, сульфат алюмінію та інші), сталю

арматуру та матеріали для антикорозійної обробки арматури та закладних деталей.

Заповнювачі отримують зазвичай подрібненням таких порід деревини як: ялина, сосна, кедр, смерека. Дозволяється застосовувати березу, вільху, липу, тополь, осика та інші породи деревини, а також їхні суміші після відповідних лабораторних випробувань. Можливим є додавання пороутворюючих добавок, які використовують при виробництві ніздрюватих і поризованих легких бетонів та інші добавки після проведення необхідних досліджень.

Міцність арболіту насамперед визначається якістю деревного заповнювача (рис. 3.5). Крім того, на міцність впливають густина, витрата цементу, В/Ц, застосовувані добавки, однорідність структури.

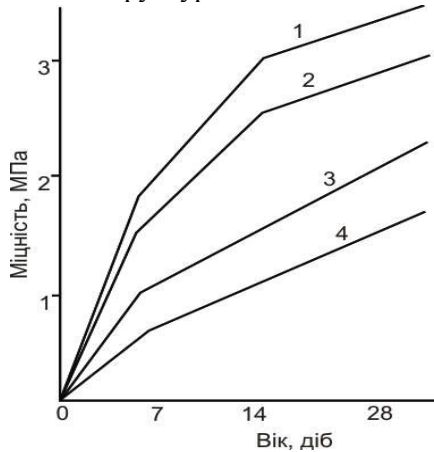


Рис. 3.5. Залежність міцності арболіту від породи деревини:
1 – ялина; 2 – сосна; 3 – береза; 4 – осика

Порівняно невисокі міцнісні характеристики арболіту пояснюються хімічною активністю заповнювача та його схильністю до значних вологісних деформацій. Хімічну активність заповнювача визначає кількість цукрів, які утримуються в екстрактивних речовинах.

Зменшити хімічну та фізичну активність деревних заповнювачів можна введенням хімічних та мінеральних добавок, що сприяють підвищенню міцнісних характеристик арболіту.

Границя міцності арболіту залежить від його вологості, особливо в діапазоні від 0 до 25%. Максимальну міцність цей матеріал здобуває при вологості 16...17%.

Арболіт має досить велике водопоглинання. Однак перевагою цього матеріалу є легка віддача поглинутої води, тобто швидке висихання. Морозостійкість арболітових виробів призначається залежно від режиму їхньої експлуатації та кліматичних умов району будівництва; у всіх випадках вона приймається не менше F25.

Міцність зчеплення арболіту зі сталлюю арматурою залежить від його міцності, виду поверхні стрижнів та захисної обмазки і складає 0,1...0,4 МПа, у той же час величина зчеплення фактурного шару із цементно-піщаного розчину складу 1:3 становить – 1,5...1,6 МПа. Деформація арболіту при короткочасному навантаженні приблизно у 8...10 разів більша ніж у бетону на основі мінеральних заповнювачів. Показник стискуваності арболіту становить $7,5 \cdot 10^{-3}$, коефіцієнт Пуасона – 0,15...0,2.

Сорбційне зволоження арболіту залежить від його середньої густини, виду заповнювача, хімічних добавок і при відносній вологості повітря – 40...90% становить 4,0...12%. За біостійкістю арболіт відноситься до 5 групи біостійких матеріалів. При середній густині більше 400 кг/м³ він відноситься до категорії важкоспалюваних. Довговічність огорожувальних конструкцій із арболіту становить не менше 20 років.

Зовнішня поверхня огорожувальних конструкцій із арболіту незалежно від вологісного режиму експлуатації помешкань повинна мати захисний опоряджувальний шар, а внутрішня поверхня передбачає влаштування фактурного шару цементно-піщаного розчину товщиною до 2 см. Арболіт має більш високі теплозахисні і звукоізоляційні показники порівняно із бетонами, отриманими на основі мінеральних пористих заповнювачів.

Склад арболіту визначають розрахунково-експериментальними методами. Витрата цементу, органічного заповнювача і води залежить від класу арболіту за міцністю на стиск. Для теплоізоляційного арболіту класів В0,35...В1 витрата цементу М400 складає 250...390 кг/м³, а конструкційно-теплоізоляційного класів В2 і В3,5 – 390...430 кг/м³. Мінімальна витрата цементу досягається при використанні дрібняку з відходів лісопиляння і деревообробки хвойних порід, а максимальна – з відходів лісозаготівель змішаних порід і костриці. Витрата хлориду кальцію і рідкого скла не перевищує 8...9 кг/м³, сульфату алюмінію – 15...20 кг/м³.

Згідно вимог технології виготовлення арболіту деревно-цементне відношення в складі суміші (при В/Ц=0,6...0,7) приймають зазвичай в межах 1,1...1,3. Орієнтовні витрати компонентів на 1 м³ арболіту наведені в табл.3.6.

Таблиця 3.6

Орієнтовні склади арболіту

Компонент	Витрати компонентів на 1 м ³ залежно від класу бетону, кг					
	В0,35	В0,75	В1	В2	В2,5	В3,5
Портландцемент М400	<u>250*</u>	<u>260</u>	<u>270</u>	<u>340</u>	<u>370</u>	<u>400</u>
	300	320	390	390	400	430
Дрібняк сухий	<u>140</u>	<u>170</u>	<u>180</u>	<u>230</u>	<u>250</u>	<u>280</u>
	190	200	210	250	270	310
Дрібняк із рисової соломи	300	340	370	400	-	-
Костриця з коноплі та льону	230	320	360	440	-	-
Хлорид кальцію**	6	7	7,5	8	8,5	9
Вода, л	<u>270</u>	<u>280</u>	<u>310</u>	<u>390</u>	<u>410</u>	<u>430</u>
	320	330	360	420	460	490

Примітки: * В чисельнику приведені витрати компонентів для деревини хвойних порід, в знаменнику – для деревини змішаних порід.

** Замість хлориду кальцію можна застосовувати інші види добавок.

Технологія виготовлення арболіту передбачає ті ж самі операції, що і при виготовленні виробів із легкого бетону на інших пористих заповнювачах. В той же час, використання заповнювачів із деревини, як специфічного матеріалу, вносить певні особливості в технологічний процес. Технологічна схема виготовлення виробів і конструкцій із арболіту (рис. 3.6) включає: подрібнення та підготовку заповнювача за гранулометричним складом, мінералізацію (обробку розчинами мінеральних солей), дозування компонентів бетонної суміші і її перемішування, укладання суміші в форму і ущільнення, теплову обробку та визрівання відформованих виробів, транспортування готових виробів на склад.

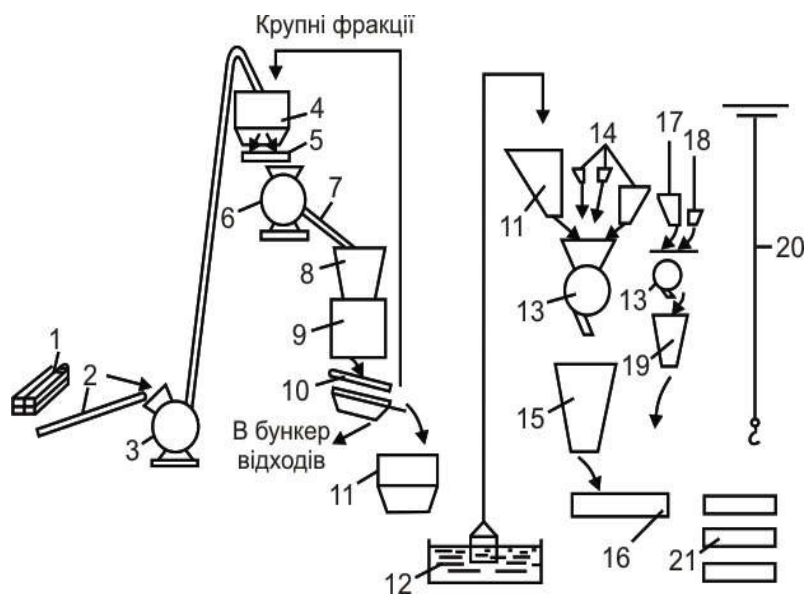


Рис. 3.6. Схема виробництва виробів з арболіту на деревних відходах:

- 1 – приймальний майданчик; 2 – конвеєр; 3 – рубильна машина;
- 4 – циклон; 5 – стрічковий конвеєр; 6 – молоткова дробарка;
- 7 – пневмоконвеєр; 8 – циклон; 9 – проміжний бункер;
- 10 – віброгрохот; 11 – бункер; 12 – ванна; 13 – розчинозмішувач;
- 14 – дозатори; 15 – арболітоукладач; 16 – формувальний пост;
- 17 – бункер для заповнювача; 18 – дозатор для води;
- 19 – розчиноукладач; 20 – кран; 21 – пост витримки

Отримують арболітову суміш практично на тому ж обладнанні, що і легкий бетон на пористих мінеральних заповнювачах. Великий вплив на якість суміші мають точність дозування та спосіб введення води й хімічних добавок. Нерівномірна вологість заповнювачів із деревини обумовлює необхідність її замочування у воді, інколи в розчині хімічних добавок протягом 7...10 хвилин перед подаванням у змішувач. При такій технології не завжди вдається точно дозувати воду, рівномірно розподілити її по об'єму суміші, а також повністю нейтралізувати дію екстрактивних речовин. Для усунення цього недоліку запропоновано сумісне введення води і розчинів хімічних добавок безпосередньо до змішувача шляхом дозування через перфоровані трубки – розпилювачі, що дозволяє більш точно дозувати і рівномірно розподіляти воду та добавки по усьому об'єму суміші.

Для арболітової суміші неефективно застосовувати загальноприйняті види ущільнення, в тому числі вібраційне формування, як для сумішей на мінеральних заповнювачах. Пресування призводить до розпресування і порушення цілісності структури бетону. Ці особливості обумовлені властивостями заповнювача, який швидко поглинає воду при перемішуванні і суміш становиться малорухомою, навіть, при значних витратах води. Тому під час виготовлення арболітової суміші необхідно призначати значення В/Ц в межах 1,1...1,3.

Останнім часом були запропоновані різноманітні технології формування арболітових сумішей, що передбачають ущільнення в горизонтальних формах ручними і механічними трамбовками, силовий вібропрокат, вібропресування, віброформування з привантажувачем, пошарове ущільнення, циклічне пресування тощо. Для покращення реологічних властивостей арболітової суміші можна добавляти технічну піну, що дозволяє формувати вироби на стандартних вібростолах.

Деревина – анізотропний матеріал, дрібняк повинен мати коефіцієнт форми (відношення найбільшого розміру до найменшого), рівним 5...10, і товщину 3...5 мм. Розміри дрібняка по довжині не повинні перевищувати 25 мм. Така форма

частинок приводить до наближення значень вологісних деформацій деревини уздовж і поперек волокон.

При відносній вологості середовища понад 60% арматуру розташовують у захисному шарі бетону. Рекомендується також захищати сталеву арматуру спеціальними покриттями по аналогії з ніздрюватим бетоном.

Завершальним етапом технологічного процесу є теплова обробка виробів до набору відпускної міцності. Пропарювання арболіту по звичайним для бетонів режимам приводить до втрати міцності, що пояснюється виникненням внутрішніх напружень за рахунок об'ємних деформацій заповнювача, які руйнують структуру цементного каменю, одночасно зростає виділення моносахаридів, що сприяє "отруєнню" цементного каменю. Кращі результати теплової обробки досягаються при м'яких режимах пропарювання, аналогічним для деревини при її сушінні: температурі 50...60° С та відносній вологості 70...80%. При такому режимі арболіт набуває розпалубочної міцності через 18...20 год. Вона не перевищує 25...40% марочної, а вологість залишається в межах 30...35%. Для подальшого набору міцності та зниження вологості вироби додатково витримують на закритому складі протягом 7 днів при температурі 16...18° С.

Арболітові вироби знайшли широке застосування у будівництві. Це стінові панелі, крупні і дрібні стінові блоки, плити перекриття, підсилені залізобетонними брусками або несучою основою (багатошарові), плити перегородок, тепло- і звукоізоляційні плити, об'ємно просторові конструкції.

Арболіт відноситься до ефективних стінових матеріалів. Завдяки крупнопористій структурі він має цінні властивості – здатність підтримувати осушувальний режим в помешканнях, на його поверхнях не конденсується волога і не підвищується вологовміст у стінах.

Номенклатура стінових панелей із арболіту включає вироби товщиною 200, 250, 300 і 350 мм, довжиною 1500, 1800, 3000, 4500, 6000 мм і висотою – 600, 900, 1200 мм. Панелі одношарові на кімнату випускають розмірами: 478×2520×300 мм; 480×2780×200 мм; 3900×2880×200 мм; 418×2580×200 мм.

Вони мають захисні шари із цементно-піщаного розчину марки 100 товщиною 20 мм.

Необхідно відмітити, що найбільше застосування у будівництві отримали дрібнорозмірні та крупні стінові блоки, а найменше – стінові панелі розміром на кімнату.

Крупні стінові блоки мають розміри: $2290 \times 1180 \times \alpha$ мм; $2290 \times 580 \times \alpha$ мм, де α – товщина зовнішніх блоків, яка становить 240 і 280 мм, а внутрішніх – 200 мм. Для стінових блоків застосовують арболіт класів В2 і В3,5, вони покриваються з обох сторін цементно-піщаним розчином марки 100 (для зовнішньої поверхні) і марки 50 (для внутрішньої поверхні) товщиною 10 мм.

Дрібнорозмірні стінові блоки випускають наступних розмірів: $600 \times 300 \times \alpha$ мм; $600 \times 150 \times \alpha$ мм; $300 \times 300 \times \alpha$ мм; $600 \times 100 \times \alpha$ мм; $600 \times 200 \times \alpha$ мм; $2290 \times 580 \times \alpha$ мм, де α – товщина, яка складає 200 і 250 мм. Середня густина арболіту становить – $600 \dots 700 \text{ кг/м}^3$, коефіцієнт теплопровідності – $0,15 \dots 0,18 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

При досягненні однакового значення термічного опору огороження, застосування арболіту порівняно з керамзитобетоном сприяє зниженню витрат портландцементу на $35 \dots 55 \text{ кг/м}^2$.

Найбільш ефективним арболіт виявляється в тих випадках, коли поряд з теплозахисними властивостями максимально використовуються також його міцнісні властивості, наприклад, в індустріальних безкаркасних стінових конструкціях, де він конкурентоспроможний із сучасними легкими й ніздрюватими бетонами.

Найважливішим фактором, що визначає високу техніко-економічну ефективність застосування арболіту, є значне зменшення капітальних вкладень для створення сировинної бази виробництва конструкцій порівняно з відповідними витратами для виробництва легких бетонів на мінеральному пористому заповнювачі.

Виробничий досвід показує, що при будівництві малоповерхових будинків конструкції та вироби з арболіту ефективно замінюють цеглу, керамзитобетон, ніздрюваті бетони, а за деякими експлуатаційними властивостями перевершують їх.

Порівняльні техніко-економічні показники 1 м² зовнішніх стін з арболіту та інших матеріалів наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Техніко-економічні показники стін з різних матеріалів

Показник	Одношарова панель із			Зовнішня стіна із керамічної цегли
	арболіту	керамзитобетону	ніздрюватого бетону	
Середня густина, кг/м ³	700	900	700	1800
Товщина, см	22	28	24	66
Маса 1м ² стіни, кг	154	270	200	1200
Відносні значення:				
розрахункової вартості, %	44	64	59	100
питомих капітальних вкладень	26	8	69	100
приведених витрат	40	67	61	100
Трудомісткість (виробництво та монтаж), людино/годин	2,7	4,0	3,6	8,6

Фіброліт (рис. 3.7) – виготовляють із суміші спеціально нарізаної деревної стружки (шерсті), в'язучої речовини, хімічних добавок і води. Його застосовують як теплоізоляційний, конструкційно-теплоізоляційний і звукопоглинальний матеріал в приміщеннях із відносною вологістю не більше 75%. Фіброліт відноситься до біостійких і важкоспалимих матеріалів.



Рис. 3.7. Фіброліт

Залежно від середньої густини його випускають трьох марок: 300, 400, 500.

Фіброліт відрізняється високим звукопоглинанням, обумовленим характером пор, а також добрими оброблюваністю, пробійністю, зчепленням зі штукатурним шаром і бетоном. Негативними властивостями фіброліту є значна повітропроникність, велике водопоглинання, низька водостійкість, схильність у вологому стані до ураження грибком. Фізико-технічні властивості фіброліту наведені в табл.3.8.

Таблиця 3.8
Фізико-технічні властивості фіброліту

Показники	Нормовані значення для плит марок:		
	Ф-300	Ф-400	Ф-500
Середня густина у висушеному стані, кг/м ³	250-350	351-450	451-500
Вологість, %, не більше	20	20	20
Границя міцності при згині, МПа, для плит товщиною, мм:			
30	-	1,1	1,3
50	0,6	0,9	1,2
75	0,4	0,7	1,1
100	0,35	0,6	1
Модуль пружності при згині, МПа, не менше	-	300	500
Коефіцієнт теплопровідності при температурі 20±2°С, Вт/(м·°С)	0,07	0,08	0,09
Водопоглинання, мас. % не більше	35	40	45
Коефіцієнт звукопоглинання при частотах 60...8000 Гц, не менше	-	0,08...0,65	0,08...0,65

Фіброліт виготовляють у вигляді плит довжиною – 2400, 3000 мм, шириною 600, 1200 мм і товщиною – 30, 50, 75, 100, 150 мм.

Для виготовлення фіброліту застосовують портландцемент марки не нижче 400, стружку із деревини хвойних порід, а також суміш стружки хвойних і листяних порід.

Технологія виробництва фіброліту включає наступні операції: готування деревної шерсті; обробку її мінералізатором; перемішування із портландцементом обробленої шерсті;

укладання в форму, пресування плит та термічну обробку. Пресування фіброліту ведуть пакетним способом: теплоізоляційного – при тиску 0,01...0,1 МПа, конструкційно-теплоізоляційного – при 0,15...0,4 МПа. Плити, твердіють у природних умовах або в спеціальних камерах при температурі 60...70° С і вологості 60...70%. Середні витрати портландцементу марки М400 на 1 м³ плит залежать від середньої густини і становлять 190...270 кг/м³. При виробництві 1 м³ фіброліту витрачається також 0,4 м³ деревини й 7 кг хлориду кальцію.

Для фіброліту, поряд із середньою густиною, вологістю й теплопровідністю, нормується границя міцності при згині, яка залежно від густини й середньої товщини плит становить 0,4...2 МПа.

Міцність фіброліту так само як і для інших матеріалів на основі відходів деревини залежить від її виду та хімічних добавок-мінералізаторів, що застосовуються (табл. 3.9).

Таблиця 3.9

Міцність фіброліту після 1 доби твердіння залежно від виду добавки

Хімічні добавки	Границя міцності при згині, МПа, фіброліту на основі					
	ялини		берези		осики	
	витри-маної	свіжо-зрубле-ної	витри-маної	свіжо-зрубле-ної	витри-маної	свіжо-зрубле-ної
Хлорид кальцію	0,58	0,14	0,28	0,1	0,04	0
Сірчанокислій алюміній	0,40	0,36	0,41	0,25	0,34	0,32
Рідке скло	0,51	0,32	0,43	0,23	0,48	0,28

При однаковому термічному опорі конструкцій витрата цементу при застосуванні фібролітових теплоізоляційних плит скорочується приблизно в 2,5 рази порівняно з конструкціями, де утеплювачем є плити з ніздрюватого бетону. Замість цементу для

фіброліту (так само, як і арболіту) можуть застосовуватися інші в'язучі речовини, в тому числі будівельний і високоміцний гіпс.

Фіброліт є достатньо довговічним матеріалом, якщо він конструктивно захищений від прямих кліматичних впливів. Звичайно захист фіброліту виконують нанесенням шару цементної штукатурки або бетонної суміші.

3.3. Тирсобетон і ксилоліт

Тирсобетони (рис. 3.8) – це матеріали на основі мінеральних в'язучих речовин і деревної тирси.



Рис. 3.8. Тирсобетонний блок

Тирсобетони застосовують у монолітному будівництві або для виготовлення дрібних стінових блоків для зовнішніх стін при зведенні малоповерхових будівель, тваринницьких і інших сільськогосподарських споруджень. При виготовленні тирсобетонних сумішей цемент спочатку змішують з піском, а потім з тирсою, обробленою в розчині мінералізатора, і водою. Масу готують у звичайних розчинозмішувачах. Для одержання 1 м^3 тирсобетону класів В1...В2 середньою густиною $1050...1250 \text{ кг/м}^3$ витрата портландцементу марки М400 складає приблизно 130 кг, гашеного вапна – 105, піску – 600, тирси – 200 кг.

Різновидом тирсобетонів є *деревобетони*, які окрім піску у своєму складі можуть містити щебінь або гравій фракції 5...10 мм.

Міцність деревобетону, який використовується як заповнювач у каркасних будинках, становить 0,6...0,8 МПа; у несучих і самонесучих конструкціях, в одноповерхових будинках достатня міцність 1,0...1,2 МПа. Деревобетон міцністю 1,5 МПа й вище може бути використаний при будівництві одноповерхових, а також двоповерхових житлових будинків. Товщина стін з деревобетону повинна бути не менше 25...30 см. В окремих випадках, коли потрібна підвищена міцність стін, їхня товщина може досягати 40 см.

Деревобетон має високі тепло- і звукоізоляційні властивості, добре обробляється різальними інструментами, піддається опорядженню фарбами, керамічною плиткою й штукатурним розчином.

На кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП були проведені дослідження, які показали можливість отримання бетонів з застосуванням відходів деревообробки способом вібропресування.

Для реалізації поставленої мети були виконані плановані експерименти з варіюванням співвідношення деревні відходи:цемент і вмісту мінералізатора та прискорювача твердіння – CaCl_2 . Умови планування експерименту наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
1	Співвідношення деревні відходи/цемент (Д/Ц)	x_1	1:1,5	1:2	1:2,5	0,5
2	Вміст CaCl_2 , %	x_2	0	1	2	1

В якості заповнювача для приготування бетону в дослідженнях використовувалась тирса та стружка що отримані при одержанні пиломатеріалів з хвойних порід. Вміст тирси (<5 мм) складав 80% від загальної маси заповнювача, стружки (5...25 мм) – 20% відповідно. Даний гранулометричний склад забезпечував утворення найбільш однорідної структури тирсобетону. В якості мінерального в'язучого використовувався малоклінкерний шлакопортландцемент (МШПЦ) з вмістом клінкеру 12%.

Ущільнення суміші здійснювалось шляхом вібрування з привантаженням в 0,06...0,09 МПа. Час формування всіх зразків складав 20 секунд. Для уникнення розпресовки, зниження впливу екстрактивних речовин та пружності деревини, тирсу перед замішуванням і формуванням добу витримували в розчині мінералізатора.

Після проведення досліджень та обробки експериментальних даних, було отримано експериментально-статистичні моделі водоцементного відношення, середньої густини, а також міцності бетону у віці сім та двадцять вісім діб. На основі отриманих експериментально-статистичних моделей побудовані графічні залежності, рис. 3.9...3.10.

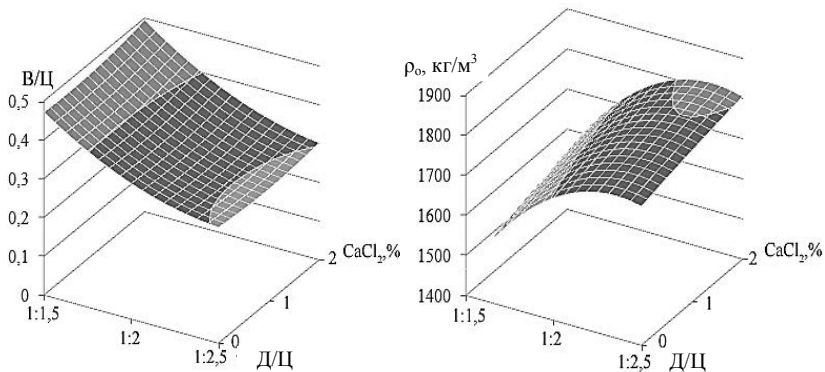


Рис. 3.9. Вплив технологічних факторів на необхідне В/Ц та середню густину бетону з застосуванням деревних відходів

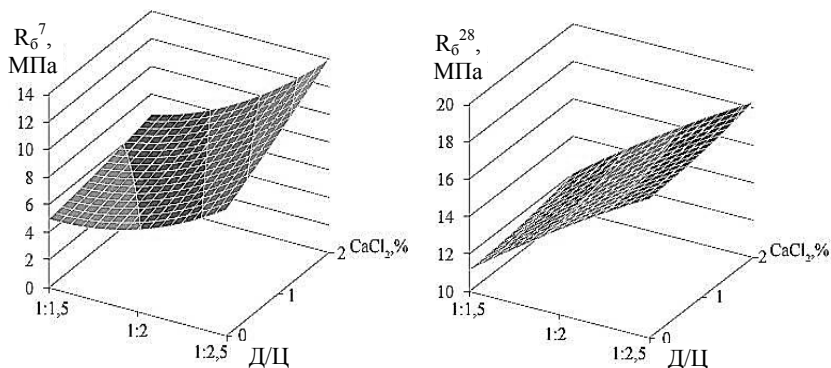


Рис. 3.10. Вплив технологічних факторів на міцність тирсобетону

Як свідчать отримані експериментальні дані, на основі МШПЦ можна виготовляти конструкційно-теплоізоляційний бетон з застосуванням деревних відходів з середньою густиною 1450...1800 кг/м³ та міцністю при стиску 11...18 МПа. Позитивним фактором є низький рівень лужного середовища МШПЦ, що позитивно впливає на сумісність цього в'язучого з деревним заповнювачем і не викликає суттєвого виділення екстрактивних речовин з деревини. Висока питома поверхня МШПЦ призводить до збільшення поверхні контактування розчину із заповнювачем, що сприяє збільшенню адгезії в'язучого до заповнювача та позитивно впливає на міцність бетону.

Зразки дослідженого бетону без добавки хлористого кальцію, характеризуються сповільненим набором міцності, особливо у ранні періоди твердіння. Встановлено, що збільшення вмісту CaCl₂ до 2% від маси в'язучого призводить до збільшення міцності зразків, у віці 7 діб, в середньому, на 50-55%, у віці 28 діб на 5-10%.

Ксилолітом називається штучний будівельний матеріал, отриманий у результаті твердіння суміші, що складається з магnezіального в'язучого і деревної тирси, яка замішується розчином хлориду або сульфату магнію. Цей матеріал в основному застосовується для влаштування монолітних або

збірних покриттів підлог. Перевагами ксилолітових підлог є їхній невисокий коефіцієнт теплосасвоєння, гігієнічність, достатня твердість і міцність, низька стираність, можливість надання різноманітного забарвлення.

Ксилоліт неспалюваний та малотеплопровідний матеріал, не боїться ударів і витримує значні навантаження, має високий показник на стирання.

Завдяки високій міцності і незначному стиранню ксилолітові підлоги з успіхом можуть застосовуватися в промисловому, житловому та культурно-побутовому будівництві. Особливо ефективне застосування ксилолітових підлог у вибухонебезпечних приміщеннях, де необхідно мати підлоги, що не іскряться.

За величиною опору стиранню ксилоліт не поступається міцним гірським породам.

Застосування як замішувачів магнезійних в'язучих розчинів хлористих або сульфатних солей робить ксилоліт з деревним заповнювачем вогнестійким матеріалом. У цьому відношенні магнезійні в'язучі мають значну перевагу перед іншими мінеральними в'язучими для виробництва матеріалів, де як органічний заповнювач використовується деревна тирса.

Для виробництва ксилоліту використовується, головним чином, тирса лісопиляння як найбільш однорідна за структурою та крупністю, що не містить домішок кори та тріски. Тирса, що направляється на виробництво ксилоліту, повинна бути просіяна на віброгрохотах через сито з отворами 5 мм.

Як добавки, які поліпшують властивості ксилоліту, застосовуються азбест (підвищує опір покриття ударним навантаженням), трепел (знижує теплопровідність), подрібнений кварцовий пісок (підвищує міцність і опір поверхні до стирання) і тальк (підвищує водостійкість).

Мінеральні пігменти для ксилоліту повинні бути однорідними за складом, без сторонніх включень, стійкими до дії світла та лугів.

Рекомендована ксилолітова суміш складається з каустичного магнезиту та тирси у співвідношенні за об'ємом: 1:1,5...1:1,4. Витрата каустичного магнезиту на 100 м² покриття

товщиною 10 мм – 410...620 кг, а кристалічного хлориду магнею – 260...400 кг.

Основні фізико-механічні показники ксилолітових плиток наведені в табл. 3.11.

Таблиця 3.11

Властивості ксилолітових плиток

Показник	Ксилолітові плитки	
	пресовані	трамбовані
Середня густина, кг/м ³ , не більше	1500	1800
Водопоглинання, %	8...12	16...20
Стираність, г/см ²	0,1...0,2	0,2...0,3
Границя міцності на згин, МПа	15...20	7,5...10

Для одержання ксилолітової суміші поряд з каустичним магнезитом з вмістом оксиду магнею не менше 75% можна застосовувати каустичний доломіт з вмістом MgO не менше 25%. Вміст в'язучого відповідно зростає (замість 1 кг каустичного магнезиту витрачається приблизно 1,7 кг каустичного доломіту): магнезіальні в'язучі на відміну від портландцементу менше зазнають негативну дію гідролізованих речовин деревного заповнювача.

Поряд з виробами для підлог організоване виробництво ксилолітових підвіконних дощок.

Розроблена та освоєна промислова технологія *конструкційного бруса* (рис. 3.11) на основі магнезіального в'язучого, деревних відходів і бішофіта – технічного хлориду магнею.



Рис. 3.11. Конструкційний брус

Технологія цього матеріалу зводиться до наступного. Кускові деревні відходи подрібнюються в рубильних машинах, їх сортують з відділенням кондиційної фракції (сито з розмірами діаметром 6...10 мм). Кондиційна фракція подається в сушильний барабан, якщо її вологість більше 12%. Потім деревні відходи через дозатор подаються в змішувач. В змішувач подається також бішофіт, після чого компоненти перемішують. Далі у суміш додають каустичний магнезит і знову перемішують. Співвідношення компонентів у пресмасі: 51,2% – деревина, 14,6% – бішофіт, 34,2% – каустичний магнезит. Брус одержують способом екструзії. Отриманий у процесі пресування брус з поперечним перерізом 150×250 мм розкрояється на заготовки визначеної довжини, які направляються на склад для витримки і зберігання.

Проведені випробування конструкційного бруса показали, що він біостійкий, важкоспалимий і має наступні показники:

Густина, кг/м ³	900...1000
Вологість, %	6...12
Границя міцності перпендикулярно напрямку пресування, МПа, не менше:	
при згині	1,1
при стиску	8
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С, не більше	0,3

Ксилобетон — це різновид легкого бетону, для якого як заповнювач використовують тирсу, а як в'язучу речовину — портландцемент, вапно або гіпс.

Для прискорення твердіння ксилобетону, зменшення його водопоглинання й збільшення водостійкості тирсу піддають мінералізації. Ксилобетонну суміш готують у змішувачах, а потім ущільнюють у формах вібропресуванням або трамбуванням.

Склади ксилобетонів підбирають залежно від їх призначення і наявності матеріалів. Для бетонів, наприклад класу В2 (марки М25) орієнтовні витрати: портландцементу - 200 кг/м³; гашеного вапна - 100 кг/м³ і тирси 200 кг/м³. Ксилобетони залежно від об'ємної концентрації тирси виготовляють середньою густиною 950...1250 кг/м³, з коефіцієнтом теплопровідності в межах 0,244...0,430 Вт/(м·°С). Їх застосовують для монолітних набивних стін і дрібних стінових блоків.

Ксилоізол є різновидом ксилобетону, який включає окрім портландцементу, вапняне тісто й 5%-й розчин кухонної солі. *Терміз* і *термізол* містять окрім вищенаведених компонентів, діатоміт, трепел або золу ТЕС.

Короліт — матеріал, який виготовляється на основі мінеральних в'язучих речовин і кори. При застосуванні кори у виробництві короліта її попередньо підсушують, подрібнюють і просіюють для видалення пилу. Як в'язучі речовини застосовують будівельний гіпс або швидкотверднучі цементы.

Приготування суміші й формування короліта здійснюють на устаткуванні, яке використовується для виготовлення арболіта.

Склади сумішей, які рекомендуються для одержання 1 м³ гіпсового короліта певної густини наведені в табл. 3.12.

Границя міцності при стиску гіпсового короліта зазвичай становить менше 1,7 МПа, теплопровідність лежить в межах 0,14...0,16 Вт/(м·°С).

Таблиця 3.12

Склади гіпсового короліту

Компоненти	Витрата вихідних компонентів, кг/м ³ для короліту густиною, кг/м ³		
	до 500	до 600	до 700
Подрібнена кора	150	170	190
Будівельний гіпс	160	200	245
Сповільнювач тужавлення	0,2	0,2	0,3
Антисептик	7	9	10
Вода	180	220	250

Примітка: антисептиком є 1...1,5%-й розчин оксидофенолята натрію, а сповільнювачем тужавлення гіпсу – бура або столярний клей.

Вартість 1 м³ короліту практично вдвічі нижча за вартість фібrolіту й арболіту. Застосовують короліт як утеплювач при влаштуванні стін і підлог.

3.4. Матеріали на основі гідролізного лігніну і целюлозно-паперового виробництва

Підприємства будівельних матеріалів, розташовані поблизу гідролізних заводів, можуть утилізувати *лігнін* — один з найбільших відходів лісохімії.

Гідролізний лігнін одержують при переробці деревини хвойних і листяних порід способом гідролізу розведеної сірчаної кислоти. Вихід лігніну залежно від виду деревини складає 17...32%.

Гідролізний лігнін представляє собою природну високомолекулярну речовину з розгалуженими макромолекулами, що утворилися при полімеризації спиртів ароматичного ряду. Він має молекулярну масу близько 11000, вологість до 70%, нерозчинний у воді й органічних розчинниках. При нагріванні до температури 400...600° С у

парогазовому середовищі лігнін розпадається з виділенням 40...50% вугілля (напівкоксу), 13...20% смоли, 15...30% надсмольної води, невеликої кількості рідких (ацетону, метилового спирту) і газоподібних продуктів (CO, CO₂ етилену).

Лігнін може бути використаний як пороутворююча добавка у виробництві теплоізоляційних і легких конструкційних керамічних виробів. Також він може застосований замість тирси у виробництві аглопориту. При введенні лігніну має місце покращення гранулометричного складу шихти (вона більш інтенсивно і рівномірно спікається). Добавка лігніну, збільшуючи газопроникність шихти, тим самим знижує розрідження у вакуум-камерах стрічкової агломераційної машини на 200...400 Па. Введення в шихту лігніну збільшує пористість готового продукту за рахунок утворення дрібних замкнутих пор з тонкими перегородками, що дозволяє знизити середню густину аглопоритового щебеню на 150...180 кг/м³, зменшити витрату вугілля на 20...25% і одночасно підвищити коефіцієнт конструктивної якості аглопориту (відношення міцності до квадрату середньої густини).

Доведено можливість застосування лігніну як наповнювача для ксилолітових плит і інших виробів.

Значний інтерес представляє досвід отримання зв'язуючих на основі технічних лігносульфонатів (ЛСТ) і лігнінових відходів для виробництва теплоізоляційних матеріалів. Для виготовлення теплоізоляційних матеріалів зі спученого перліту й інших заповнювачів потрібна велика кількість дефіцитних зв'язуючих. Було запропоновано використовувати лігнін, переведений у водорозчинний стан у процесі сульфітного варіння целюлози, у вигляді водного розчину лігносульфонових кислот і їхніх солей з домішкою золи і редуруючих речовин.

На основі лігнінових в'язучих речовин і перліту освоєно виробництво теплоізоляційного матеріалу – *лігноперліту*.

За фізико-механічними і технічними властивостями лігноперліт не поступається ефективним теплоізоляційним матеріалам цього класу. Середня густина лігноперлітових плит і

шкаралуп 130...250 кг/см³; границя міцності при стиску 0,2...1 МПа, при згині 0,1...0,8; водопоглинання 4...10% за об'ємом; коефіцієнт розм'якшення 0,8...0,85; морозостійкість не менше 25 циклів; теплопровідність 0,04...0,08 Вт/(м·°С). Залежно від вмісту зв'язуючого лігноперліт відноситься до груп неспалимих і важкоспалимих матеріалів. Лігноперліт при вмісті зв'язуючого не більше 7% відноситься до неспалимих матеріалів, а не більше 20% – до важкоспалимих. Вміст зв'язуючого у формувальній масі 5...20%.

Плити виготовляють довжиною 1, шириною 0,5, товщиною 0,04...0,06 м. Їх використовують як теплоізоляційний шар по профільованому металевому настилу без влаштування стяжки під рулонну покрівлю, а також у 3-шарових залізобетонних стінових панелях. Встановлено ефективність застосування лігноперліту як утеплювача в керамзитобетонних панелях. Цей матеріал може бути використаний і в якості теплової ізоляції устаткування при температурі до 200° С.

Лігноперлітові плити виготовляють за напівсухою технологією, що включає: перемішування зв'язуючого з перлітовим піском; формування виробів із сировинної суміші при тиску 0,2...0,5 МПа і їх теплову обробку при 220° С. На відміну від традиційних технологій виготовлення перлітових теплоізоляційних виробів, що передбачають сушіння до 24 год, добра змочуваність лігніновим зв'язуючим поверхні перлітового піску дозволяє знизити вологість сировинної суміші і скоротити тривалість теплової обробки до 1,5...2 год.

До відходів целюлозно-паперового виробництва після первинного очищення стічних вод відноситься скоп.

Мінеральна частина скопу складає понад 50% і містить до 90% каоліну. Органічні включення представлені в основному целюлозними волокнами.

Скоп є ефективною добавкою при виробництві аглопоритового гравію на основі зол ТЕС (табл.3.13). Він, маючи низьку густину, високі сорбційні властивості і пластичність, поліпшує умови комкування зольної шихти і сприяє збільшенню міцності як вологих, так і сухих сирцевих гранул.

Випробування цього заповнювача в бетоні показали, що на його основі можуть бути отримані легкі бетони класів В12,5...В20 із середньою густиною від 1350 до 1800 кг/м³ при витраті цементу відповідно від 215 до 435 кг на 1 м³ бетону.

Таблиця 3.13

Фізико-механічні властивості зольного аглопориту
з добавкою скопу

Властивості аглопоритового гравію	Показники властивостей (фракція 10...20 мм)	
	без добавки скопу	з добавкою скопу
Густина, г/см ³	2,62	2,4
Середня густина, кг/м ³	1620	1160
Насипна густина, кг/м ³	750...800	485...550
Пористість зерен, %	38,2	56
Міцність при стискуванні в циліндрі, МПа	2,72	1,7
Міжзернова пористість, %	55	48,7
Водопоглинання, %		
за 1 год.	24,6	24,1
за 48 год.	28,2	28,2
Втрати маси, % при прожарюванні:	0,18	0,17
при силікатному розпаді	0,27	0
при залізистому розпаді	0,25	0

Скоп може бути використаний як заповнювач конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону (*скопобетон*). Скопобетонна суміш виготовляється в змішувачах примусової дії шляхом перемішування портландцементу і вологого скопу без додавання води. Ущільнення суміші здійснюється трамбуванням чи пресуванням при тиску 0,08...0,12 МПа. Режим твердіння – природне або штучне сушіння. На основі скопобетону можна виготовляти стінові блоки з класом за

міцністю не менше В1,2, середньої густиною 600...700 кг/м³, теплопровідністю 0,15 Вт/(м·°С) і морозостійкістю до F35 і більше. Витрата портландцементу для виготовлення скопобетонних блоків складає 220...230 кг/м³ і може бути доведена до 180...200 кг/м³ за рахунок введення добавки золи-виносу. Експериментальні житлові будинки зі скопобетону були зведені в Київській області.

Скоп можна використовувати у виробництві теплоізоляційних волокнистих плит із застосуванням як органічних, так і неорганічних в'язучих речовин. Розроблено склади для виготовлення теплоізоляційних матеріалів, що включають скоп 60...90%, спучений перліт 8...20%, фтористий натрій 0,5...2,5%, і зв'язуюче – продукт спільної нейтралізації ортофосфорної кислоти, сечовини, формаліну 1...12%. Показано можливість застосування в якості зв'язуючого глини, фторангідритового в'язучого. Теплоізоляційні плити на основі скопу мають середню густину 300...400 кг/м³, міцність при згині 0,17...0,24 МПа і міцність при стиску 3,5...5 МПа, водопоглинання 20...60% по масі і теплопровідність 0,063...0,087 Вт/(м·°С).

4. КРУПНОПОРИСТІ І НІЗДРЮВАТІ БЕТОНИ

4.1. Крупнопористі бетони

Крупнопористі бетони належать до легких бетонів, головною особливістю яких є підвищений об'єм міжзернових порожнин, що досягається відсутністю у складі бетонів дрібного заповнювача та обмеженим вмістом цементного тіста.

Ідея отримання крупнопористого бетону, структура якого характеризується значним об'ємом міжзернових порожнин, була вперше висловлена в 1912 р. М. А. Житкевичем. Для отримання крупнопористого бетону застосовують як легкі пористі заповнювачі, так і звичайні важкі гравій або щебінь. Поряд з іншими видами легких бетонів крупнопористий бетон може бути використаний як матеріал для монолітних та збірних стінових конструкцій, а також для дренажних систем та фільтрів. При використанні важкого заповнювача товщина стін з крупнопористого бетону приймається такою ж як цегляних, пористих наповнювачів – зменшується в 1,5...2 рази.

Середня густина крупнопористого бетону може змінюватися від 400 до 2000 кг/м³. Її можна знайти за формулою:

$$\rho_6 = \alpha \text{Ц} + V_3 \rho_3^H, \quad (4.1)$$

де α – коефіцієнт, що враховує вміст води (для сухого бетону $\alpha \approx 1,15$, свіжовиготовленого – $\alpha = 1 + V/\text{Ц}$);

V_3 – об'ємна витрата заповнювача, м³/м³;

ρ_3^H – насипна густина заповнювача, кг/м³;

Ц – витрата цементу, кг/м³.

Міцність крупнопористого бетону залежить як від кількості, так і міцності цементного каменя, що міститься в ньому. Остання визначається в основному активністю цементу та водоцементним відношенням.

Оптимальний вміст цементного тіста у крупнопористому бетоні знаходиться з умови:

$$V_{\text{ц.т}} = \delta S, \quad (4.2)$$

де δ – товщина плівки з цементного тіста, що обволікає та склеює зерна заповнювача;

S – сумарна поверхня зерен заповнювача.

Величина необхідної товщини плівки цементного тіста за експериментальними даними С.М.Іцковича змінюється залежно від відношення В/Ц тіста до його нормальної густоти.

Залежно від витрати цементу міцність крупнопористого бетону змінюється лінійно. Характер впливу на міцність водоцементного відношення для цього виду легкого бетону такий же, як для звичайного важкого бетону. Зі збільшенням відношення цемент:заповнювач екстремальні значення В/Ц збільшуються (рис.4.1). На міцності крупнопористого бетону суттєво позначається також міцність заповнювача.

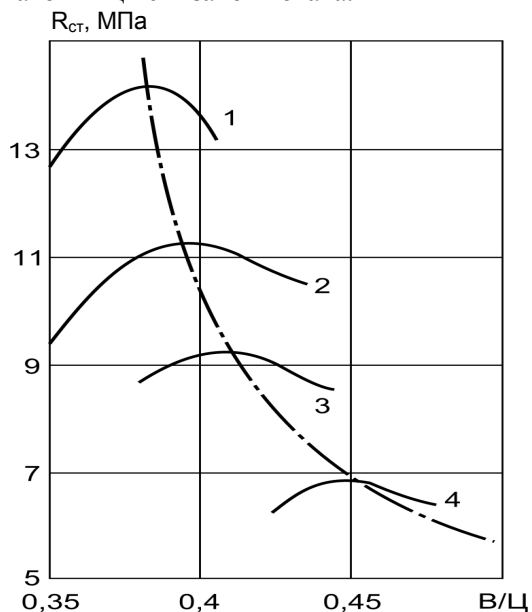


Рис. 4.1. Залежність міцності крупнопористого бетону від водоцементного відношення:

1 – склад бетону (цемент:гравій за об'ємом) 1:6; 2 – 1:7; 3 – 1:8; 4 – 1:10

На формування структури та властивостей крупнопористого бетону впливають крупність та зерновий склад заповнювача. Об'єм міжзернових порожнин залежить також від витрати цементу.

При використанні щільних заповнювачів руйнування крупнопористих бетонів полягає у розриві контактів і визначається відношенням до площі руйнування добутку кількості зруйнованих контактів на міцність контакту. Міцність крупнопористого бетону С.М.Іцкович запропонував виражати формулою:

$$R_{\bar{\sigma}} = A(d/D)^2(\rho_{ц.к}/B)^2, \quad (4.3)$$

де A – емпіричний коефіцієнт, що враховує якість вихідних матеріалів;

d – середній діаметр контактів;

D – середній діаметр зерен заповнювача.

Величина структурного параметра $(d/D)^2$ для бетону на гравію коливається від 0,1 до 0,2, збільшуючись із витратою цементу, об'ємом цементного тіста і відповідно товщиною прошарку цементного тіста (рис.4.2). Чим менше величина структурного параметра $(d/D)^2$, тим вище значення відносної міцності заповнювача. За інших рівних умов вона має підвищуватись зі зменшенням витрати цементу.

Міцність крупнопористих бетонів пов'язують також зі ступенем заповнення міжзернових порожнин крупного заповнювача:

$$R_{\bar{\sigma}} = R_{\bar{\sigma}_{ц.к}} \left(1 - \frac{\rho_{\bar{\sigma}_{ц.к}} - \rho_{\bar{\sigma}}}{\rho_{ц.к}} \right)^n, \quad (4.4)$$

де $\rho_{\bar{\sigma}}$ і $\rho_{\bar{\sigma}_{ц.к}}$ – відповідно густина крупнопористого бетону та густина бетону щільної структури;

$\rho_{ц.к}$ – густина цементного каменю у бетоні;

$R_{\bar{\sigma}_{ц.к}}$ – границя міцності бетону щільної структури;

n – показник ступеня, який залежить від виду заповнювача і може набувати значення в межах 4...5.

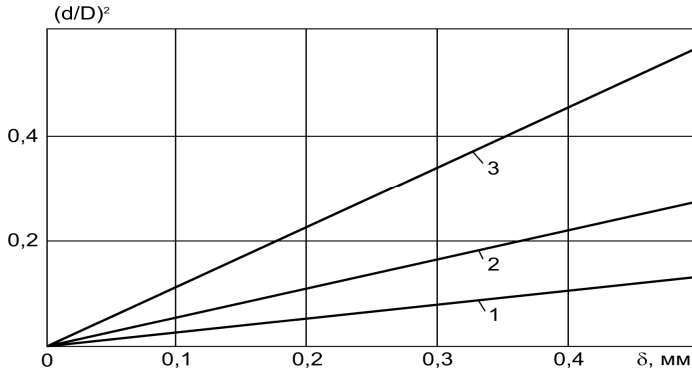


Рис. 4.2. Залежність структурного параметра $(d/D)^2$ від товщини обволікаючого шару цементного тіста при діаметрі зерен, мм:
1 – 30; 2 – 15; 3 – 7,5

При використанні гравію при заданій витраті цементу, як правило, зростає міцність та однорідність за властивостями крупнопористого бетону. З іншого боку, застосування щебеню, враховуючи його велику порожнистість, дозволяє отримати більш легкий бетон.

За даними С.М. Іцковича, міцність заповнювача має перевищувати необхідну міцність крупнопористого бетону при витраті цементу близько 200 кг/м^3 не менше ніж у 6 разів, а при витраті цементу близько 100 кг/м^3 – у 12 разів. Зерна щебеню повинні бути приблизно на 15% міцнішими за зерна гравію в рівномічному бетоні. Міцність пористих заповнювачів, як правило, менша за міцність цементного каменю. У разі їх застосування руйнування контакту між зернами заповнювача зводиться до руйнування контактної зони заповнювача.

Про вплив активності цементу на міцність крупнопористого бетону є суперечливі дані. За деякими даними, він є практично невідчутним, а визначальне значення має лише об'єм цементного тіста. У зв'язку з цим для бетону цього виду дуже позитивно позначається вплив дисперсних наповнювачів, що вводяться в цемент або бетонну суміш.

При застосуванні щільних заповнювачів міцність крупнопористих бетонів зростає аналогічно міцності звичайного важкого бетону. При використанні пористих заповнювачів при перевищенні міцності цементного каменю, міцності наповнювача істотного зростання міцності бетону не спостерігається.

Міцність крупнопористого бетону при стиску відповідає класам В3,5...В7,5, при більш високій ніж у відповідних щільних бетонів міцності при розтягу, теплопровідність його в залежності від густини знаходиться в межах 0,26...0,99 Вт/м·°С.

Для бетону цього виду характерна незначна усадка, враховуючи відносно невисокий вміст цементного каменю.

Регулюючи крупність та зерновий склад заповнювача, можна змінювати коефіцієнт фільтрації в межах 0,2...0,25 см/с. Морозостійкість крупнопористих бетонів при використанні різних заповнювачів становить 50...100 циклів.

Орієнтовну витрату цементу при підборі складу крупнопористого бетону призначають залежно від його міцності, марки цементу та виду заповнювача (табл.4.1, 4.2).

Таблиця 4.1

Орієнтовні витрати портландцементу для крупнопористого бетону на щільних заповнювачах

Міцність бетону на стиск у віці 28 діб, МПа	Витрата портландцементу, кг/м ³ , марки					
	300		400		500	
	на гравію	на щебені	на гравію	на щебені	на гравію	на щебені
1,5	50	60	40	50	-	-
2,5	85	100	65	75	50	60
3,5	120	140	90	105	70	85
5,0	170	200	125	145	100	115
7,5	-	-	190	220	150	175
10	-	-	-	-	200	230

Таблиця 4.2

Орієнтовні витрати портландцементу для крупнопористого керамзитобетону

Міцність бетону на стиск у віці 28 діб, МПа	Витрата портландцементу, кг/м ³ , при міцності керамзиту, МПа					
	0,5	1	2	3	4	5
0,5	150	75	40	-	-	-
1,0	300	150	75	50	-	-
1,5	-	225	115	75	60	-
2,5	-	-	190	125	95	75
3,5	-	-	270	175	135	105
5,0	-	-	-	250	190	150

Витрату крупного заповнювача K_p приймають залежно від його пористості $P_{кр}$:

при $P_{кр} < 40\%$ $K_p = 1,05 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $P_{кр} = 40\%$ $K_p = 1,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$,
 $P_{кр} = 50\%$ $K_p = 1,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $P_{кр} = 60\%$ $K_p = 1,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Витрати води, л/м³:

$$B = (НГ \cdot Ц + K_p \cdot W_{кр}) / 100, \quad (4.5)$$

де $НГ$ – нормальна густина цементного тіста, %;

$W_{кр}$ – водопоглинання за масою крупного заповнювача за 30 хвилин, %.

Густина сухого бетону:

$$\rho_0 = 1,15Ц + K_p. \quad (4.6)$$

Приклад 4.1. Розрахувати склад крупнопористого бетону з міцністю на стиск у 28 діб 7,5 МПа і густиною $\leq 1800 \text{ кг/м}^3$.

Матеріали: портландцемент М400 з нормальною густиною 27%, природний гравій з насипною густиною 1450 кг/м³, густиною зерен 2030 кг/м³ та водопоглинанням 2,5%.

За табл. 4.1 орієнтовна витрата цементу 190 кг/м³.

Пустотність гравію:

$$P_{гр} = \frac{2,03 - 1,45}{2,03} 100 = 28,6\%.$$

Витрату крупного заповнювача приймаємо: $K_p=1,05\text{м}^3/\text{м}^3$
або $1,05 \times 1450 = 1522,5 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Витрата води за формулою (4.5):

$$B = (27 \cdot 190 + 1522 \cdot 2,5) / 100 = 89,35 \text{ л.}$$

Густина сухого бетону (4.6):

$$1,15 \times 190 + 1522,5 = 1741 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

4.2. Ніздрюваті бетони

Ніздрюватий бетон (газобетон) вперше був запропонований в 1889 р. чеським дослідником Гоффманом, який застосував для спучування розчинів вуглекислий газ. У 1914 р. Аулсворт і Дайер (США) отримали патент на використання порошоків алюмінію і цинку для утворення пухирців водню в цементному тісті, заклавши принципові основи сучасної технології газобетону. У 1923 р. датський інженер Байер винайшов пінобетон. В даний час інтенсивно розвивається виробництво як газо-, так і пінобетонів автоклавного і неавтоклавного твердіння.

Ніздрюваті бетони виготовляють із в'язучого, кремнеземистого компонента, пороутворювача та води. В'язучими для виробництва ніздрюватих бетонів служать як клінкерні, так і безклінкерні (шлаколувні та ін.) цементи, вапно, гіпс.

При використанні вапняно-кремнеземистих в'язучих ніздрюваті бетони називають *газо-* або *піносілікатами*.

Ніздрюваті бетони відносяться до найбільш ефективних матеріалів для огорожуючих конструкцій. При густині $500 \dots 700 \text{ кг}/\text{м}^3$ вони дозволяють досягати при оптимальній структурі міцність $3 \dots 5 \text{ МПа}$. Основними факторами підвищення міцності ніздрюватих бетонів при їх незмінній густині є більш висока тонкість помелу компонентів та підбір їх гранулометрії, ретельне змішування, вибір оптимальних складів сумішей та режиму тверднення.

Кремнеземистим компонентом служить, як правило, мелений кварцовий пісок або зола ТЕС. Застосовують також доменні та інші металургійні шлаки, трепел, діатоміт, опоку та ін. Мелений пісок повинен містити щонайменше 90% SiO_2 . Порівняно з кварцовим піском зола-виносу має більш високу активність, вимагає значно менших витрат на додаткове подрібнення та дозволяє отримати бетон із меншою середньою густиною. Зола повинна містити не менше 50% склоподібних і опалених частинок і не більше 5% частинок вугілля, що не згоріли.

Ніздрюваті бетони в залежності від призначення так само як і легкі бетони на пористих заповнювачах поділяють на теплоізоляційні ($(\rho_0 < 500 \text{ кг/м}^3)$), конструкційно-теплоізоляційні ($500 \dots 900 \text{ кг/м}^3$) і конструкційні ($1000 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$).

Пориста структура ніздрюватих бетонів може бути отримана в результаті газоутворення при проходженні хімічних реакцій (*газобетони, газосилікати*); піноутворення – змішування водної суспензії в'язучого з попередньо отриманою піною (*пінобетони, піносилікати*); аерування – спінювання маси, що містить піноутворювач, при перемішуванні. Застосовують також різні комбіновані способи поризації бетонів.

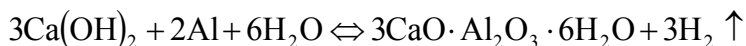
За умовами твердіння ніздрюваті бетони поділяють на *автоклавні* та *безавтоклавні*. Перші набирають необхідну міцність в автоклавах в умовах підвищеного тиску та температури водяної пари, другі – в умовах нормального тиску за підвищеної температури або нормальних умов твердіння.

Середній розмір пор у ніздрюватих бетонів коливається від 0,6...0,8 до 2...2,2 мм. Застосовуючи деякі технологічні способи обробки пористих мас, наприклад вібрування, можна регулювати величину пор. У теплоізоляційних ніздрюватих бетонів загальна об'ємна пористість становить 75...90%, у конструкційно-теплоізоляційних вона знаходиться в межах 50...60%.

Вид в'язучого вибирають з урахуванням умов твердіння та структуроутворення ніздрюватих бетонів. При твердінні в нормальних умовах можливе використання алітових низько- та середньоалюмінатних цементів, шлаколужних в'язучих. Для

конструкційно-теплоізоляційних бетонів рекомендуються цементи з питомою поверхнею 250...300 м²/кг, для теплоізоляційних 300...400 м²/кг. Небажано застосування цементів із добавками трепелу, глієжів, трасів, опоки. У виробництві ніздрюватих бетонів, що твердіють при автоклавній обробці, широко застосовують вапняно-шлакові і вапняно-зольні в'язучі, гідравлічна активність яких особливо проявляється з підвищенням температури та тиску водяної пари. Теплова обробка дає можливість використовувати як сировину інертні або малоактивні при нормальному твердінні кислі, низькоглиноземисті як гранульовані, так і відвальні шлаки і золи.

Найбільш поширеним *газоутворюючим компонентом* є алюмінієва пудра. Введення пудри забезпечує початок газовиділення в лужному середовищі через 1...2 хв. Поряд із пудрою, що вводиться в суміш у вигляді водної суспензії, застосовують алюмінієву пасту. Газоутворення відбувається за реакцією:



В результаті хімічної реакції з 1 г алюмінію виділяється за нормальних умов 1,254 л. водню, при 50° С обсяг водню становить 1,48 л. Відомі також інші пороутворювачі, що не отримали широкого застосування: феросиліцій (FeSi₂), пергідроль (H₂O₂), карбід кальцію (CaC₂), цинкова пудра (Zn).

Спучування ніздрюватобетонної маси відбувається в результаті виділення газу на поверхні рівномірно розподілених мікрочастинок газоутворювача в масі, що має достатню пластичну в'язкість для запобігання проривам.

Тужавлення маси має відбуватися бажано відразу після спучування, інакше тиск газу на стінки пор викликає її розтріскування. При недостатній пластичній міцності маси на момент припинення спучування відбувається її усадка.

Як *піноутворювачі* служать різні ПАР (СДО, "Піностром" та ін.), які при інтенсивному перемішуванні з водою утворюють стійку піну.

Основними фізичними властивостями технічної піни, що характеризують її якість, є кратність та стійкість. *Кратність*

піни (K_n) визначається за формулою (4.7) і має бути не менше 6...10 для легких поризованих бетонів, 8...20 – конструкційно-теплоізоляційних та 15...40 – теплоізоляційних пінобетонів:

$$K_n = \frac{V_{\text{пін}}}{V_{\text{п.у}}} = \frac{\rho_{\text{п.у}}}{\rho_{\text{пін}}}, \quad (4.7)$$

де $V_{\text{пін}}$, $V_{\text{п.у}}$, $\rho_{\text{пін}}$ та $\rho_{\text{п.у}}$ – відповідно об'єм та густина піни та піноутворювача.

Стійкість піни характеризується коефіцієнтом стійкості піни в цементному тісті (С), який розраховується за формулою:

$$C = \frac{V_{\text{ц.т}}^{\text{пор}}}{V_{\text{ц.т}} + V_{\text{пін}}}, \quad (4.8)$$

де $V_{\text{ц.т}}^{\text{пор}}$ – об'єм поризованого цементного тіста, мл;

$V_{\text{ц.т}}$ – об'єм цементного тіста, мл,

$V_{\text{пін}}$ – об'єм піни, мл.

Технічну піну, що отримують, можна вважати задовільною, якщо $C=0,8...0,85$, високої якості – при $C \geq 0,95$.

Для отримання стійкої піни поряд з добавками-піноутворювачами в ряді випадків потрібні ефективні стабілізатори. Ними можуть бути високомолекулярні сполуки, мила та інші речовини, що дають міцні плівки. Для піноутворювача на основі клеєканіфольного мила як стабілізатор використовують столярний або мездровий клей, на основі смоли деревної омиленої (СДО) – гідроксид кальцію.

Чим вище коефіцієнт стійкості піни, тим менший її об'єм (і відповідно об'єм піноутворювача), необхідний для отримання пінобетону необхідної густини. Кратність і стійкість піни перебувають у певному взаємозв'язку. При отриманні піни досить високої кратності важливо зберегти водночас і потрібне значення її стійкості.

Найбільш поширеною є технологія отримання газо- та пінобетону, що включає помел і змішування сировинних компонентів, витримку та тепловологісну обробку виробів (рис. 4.3). При різальній технології формування виробів

відформований ніздрюватобетонний масив, що має деяку мінімальну міцність, розрізається на плити або блоки відповідних розмірів, що надходять на тепловологісну обробку. Вібраційна технологія використовується при виробництві газобетону або газосилікату. Вона дозволяє зменшити водотвердне відношення сумішей та інтенсифікувати процес спучування за рахунок тиксотропії та прискорення газовиділення. Позитивний ефект досягається при застосуванні вібрування суміші спочатку у процесі приготування суміші у вібромішувачах, а потім після заливання у формах на вібромайданчиках.

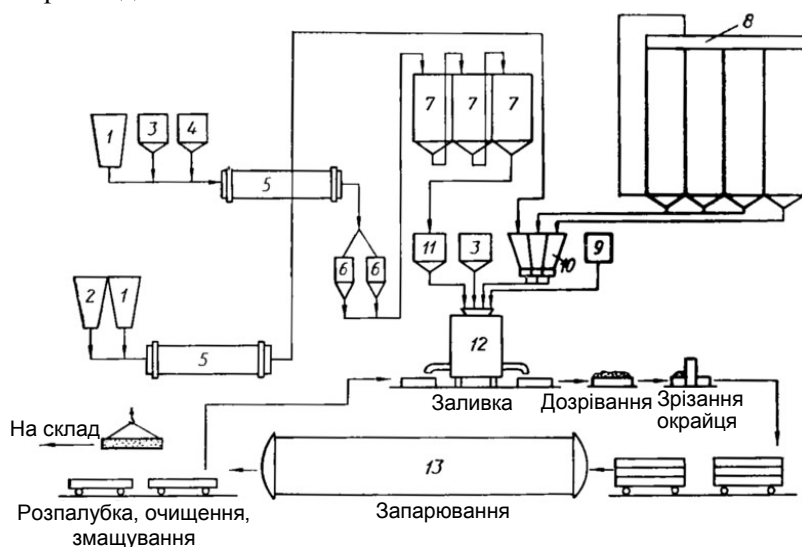


Рис. 4.3. Технологічна схема виробництва виробів з газобетону: 1 – бункер з піском; 2 – бункер з вапном; 3 – дозатор води; 4 – дозатор ПАР; 5 – млин; 6 – насоси; 7 – шламбасейн; 8 – склад цементу та гіпсу; 9 – дозатор алюмінієвої пудри; 10 – бункери з дозаторами вапна, цементу та гіпсу; 11 – дозатор шламу; 12 – газобетонозмішувач; 13 – автоклав

Традиційна технологія приготування пінобетону включає приготування піни, розчинової суміші та пінобетонної маси.

Реалізація такої технології здійснюється в пінобетонозмішувачі, що складається з двох або трьох барабанів (рис.4.4, а). Піну при цьому готують інтенсивним збиванням водного розчину піноутворювача.

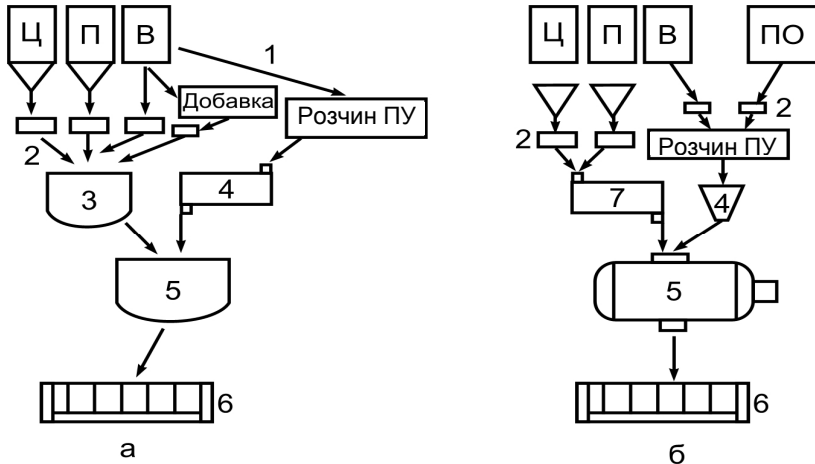


Рис. 4.4. Технологічні схеми виробництва пінобетонних виробів:
 а – традиційний метод; б – метод сухої мінералізації;
 1 – бункери сировинних матеріалів (цементу, піску, води);
 2 – дозатори; 3 – змішувач для приготування розчинової суміші;
 4 – піногенератор; 5 – змішувач для приготування пінобетонної суміші; 6 – форма; 7 – змішувач сухих компонентів;
 ПУ – піноутворювач

Поризація бетонної суміші попередньо приготованою піною може здійснюватися також методом сухої мінералізації піни (рис.4.4, б), при якому низьократна піна мінералізується сухими компонентами у міру їх поступового додавання до піномаси при одночасному перемішуванні у змішувачі. При цьому методі, враховуючи невисоку кратність піни (4...6), її можна приготувати як у окремому піногенераторі, так і у високошвидкісному змішувачі. Швидка адсорбція сухими компонентами призводить до стабілізації пінобетонної суміші. Цей метод дозволяє знизити водотверде ставлення, зміцнити

міжпорові перегородки та отримати пінобетон із вищим коефіцієнтом конструктивної якості.

Приготування пінобетонної суміші без попереднього приготування піни здійснюють методом *аерування* (рис.4.5), заснованим на втягуванні повітря масою, що містить піноутворювач, при швидкісному перемішуванні в змішувачі. Цей метод дозволяє відмовитись від застосування спеціального піногенератора. Істотний вплив на поризацію має початкова рухомість суміші, оптимальна область якої знаходиться у вузькому діапазоні. При цьому важливе значення має вид піноутворювача, швидкість аерування та конструкція змішувача.

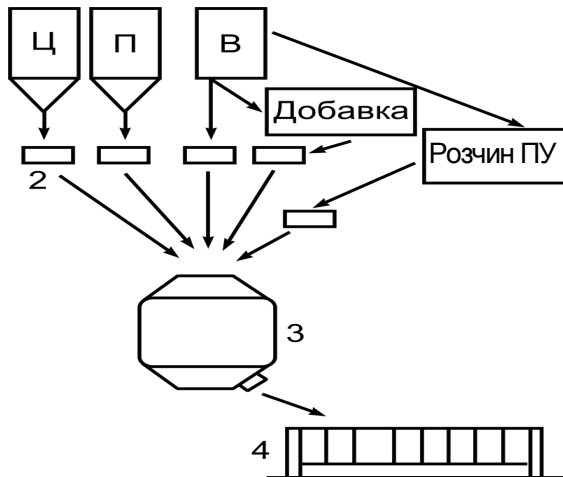


Рис. 4.5. Технологічна схема виготовлення пінобетонних виробів з використанням методу аерування бетонної суміші:

- 1 – витратні бункери сировинних матеріалів (цементу, піску, води);
- 2 – дозатори; 3 – швидкісний змішувач; 4 – форма для формування пінобетонних виробів; ПУ – піноутворювач

У технології ніздрюватих як і інших видів бетону цілеспрямовано покращувати властивості продукції дозволяє застосування ефективних добавок-пластифікаторів, прискорювачів твердіння, гідрофобізаторів, волокнистих добавок.

Найбільш високі технічні властивості ніздрюватих бетонів при раціональному використанні в'язучих матеріалів, у тому числі на основі шлаків, зол та інших промислових відходів, досягаються при тепловолігній обробці в автоклавах. Автоклавна технологія в даний час є найбільш характерною для газобетонів. Вироби зазвичай запарюють при тиску 0,8...1,2 МПа при загальній тривалості 10...17 год. Поряд із автоклавною обробкою для виробів на основі цементу або доменних шлаків застосовують пропарювання або електропрогрів. За безавтоклавною технологією виготовляють переважно дрібноштучні блоки з пінобетону при підвищеній витраті портландцементу.

У табл. 4.3 наведено порівняльні техніко-економічні та фізико-технічні показники традиційних будівельних матеріалів та ніздрюватих бетонів.

Таблиця 4.3

Порівняльні показники ніздрюватих бетонів та інших матеріалів

Показники	Одиниця виміру	Цегла		Блоки		
		керамічна	силікатна	керамзитобетони	автоклавної газобетон	безавтоклавної пінобетон
Середня густина	кг/м ³	1550-1700	1700-1950	900-1200	300-1200	300-1200
Маса 1 м ² стіни	кг	1200-1800	1450-2000	500-900	90-900	90-900
Теплопровідність	Вт/(м ⁰ С)	0,6...0,95	0,85-1,15	0,75-0,95	0,07-0,38	0,07-0,38
Морозостійкість	Цикли	25	25	25	35	35
Питома витрата палива	кг. умовн. палива/ тис. шт ум. цегли	246	60-80	35	65	20-30
Питома витрата електроенергії	КВт.- год./ тис. шт. ум. цегли	80-82	36-38	30-32	35	1,5-4
Границя міцності при стиску	МПа	5-30	5-30	15.-50	0,5-20	0,5-10

За показниками середньої густини ніздрюваті бетони поділяють на марки від D200 до D1100

Густина бетонів залежить від щільності матеріалу міжпорових стінок та об'єму пор (порожнин), утворених в результаті поризації та водов'язучого відношення.

Залежно від гарантованої міцності на стиск розрізняють класи ніздрюватих бетонів: B0,35...B15, що відповідає маркам від M5 до M200.

Нормовані за ДСТУ БВ.2.7-45:2010 фізико-механічні і фізико-технічні характеристики ніздрюватих бетонів наведені в табл. 4.4. та 4.5.

Таблиця 4.4

Фізико-механічні показники ніздрюватих бетонів за умовами тверднення

Види бетонів	Марка за середньою густиною	Автоклавний		Неавтоклавний	
		клас за міцністю на стиск	марка за морозостійкістю	клас за міцністю на стиск	марка за морозостійкістю
Теплоізоляційний	D200 D250 D300 D350	B 0,35 B 0,5 B 0,75 B 1	Не нормується	B 0,35 B 0,5 B 0,75	Не нормується
Конструкційно-теплоізоляційний	D400* D500	B 1 B 1,5 B 2 B 2,5	F 15 F 25 F 35	B 1 B 1,5 B 2	F 15 F 25 F 35 F 50
	D600 D700	B 2 B 2,5 B 3,5 B 5	F 15 F 25 F 35 F 50 F 75	B 1,5 B 2 B 2,5	F 75
	D800 D900	B 2,5 B 3,5 B 5 B 7,5 C8/10	F 25 F 35 F 50 F 75	B 2 B 2,5 B 3,5 B 5	
Конструкційний	D1000 D1100	B 7,5 C8/10 C10/12,5 C12/15	F 25 F 35 F 50 F 75	B 5 B 7,5 C8/10 C10/12,5	F 15 F 25 F 35 F 50

Таблиця 4.5

Фізико-технічні показники бетонів

Марка за середньою густиною	Теплопровідність у сухому стані, Вт/(м °С), не більше	Коефіцієнт паропроникності, мг/(м год Па), не менше	Сорбційна вологість, %, не більше, при відносній вологості повітря, %	
			75	97
D200	0,055	0,28	6	10
D250	0,065			
D300	0,080	0,26	8	12
D350	0,090	0,24	8	12
D400	0,100	0,23	8	12
D500	0,120	0,20	8	12
D600	0,140	0,17	8	12
D700	1,180	0,15	8	12
D800	0,210	0,14	10	15
D900	0,240	0,12	10	15
D1000	0,290	0,11	10	15
D1100	0,340	0,10	10	15

Границя міцності при стиску ніздрювато-бетонних зразків залежить від напрямку стискаючого навантаження відносно напрямку заливки ніздрювато-бетонною сумішшю. При випробуванні навантаженням, спрямованим перпендикулярно, міцність виявляється на 20...30% вище міцності зразків паралельно напрямку заливання. Міцність ніздрюватих бетонів (R_b) знаходиться в тісній кореляції з його густиною (ρ_b). На практиці для прогнозування міцності цих матеріалів використовують різні емпіричні залежності, наприклад:

$$R_b = A\rho_b^2, \quad (4.9)$$

де A – конструктивний коефіцієнт, величина якого може змінюватися у значних межах. Для бетонів автоклавного твердіння $A \approx 10$ безавтоклавного $A \approx 7,5 \dots 8,5$. Підвищення точності прогнозу міцності досягається при врахуванні міцності ($R_{м.п}$) та густини ($\rho_{м.п}$) міжпорового матеріалу бетону.

Залежність між міцністю ніздрюватого бетону та міцністю і густиною міжпорового матеріалу виражається формулою:

$$R_{\sigma} = R_{\text{м.п}} \left(\frac{\rho_{\sigma}}{\rho_{\text{м.п}}} \right)^3. \quad (4.10)$$

Проектна марка ніздрюватого бетону характеризує його міцність при стиску при випробуванні зразків-кубів з ребром 15 см при їх вологості $10 \pm 2\%$. Міцнісні показники ніздрюватих бетонів суттєво залежать від вологості. Орієнтовно за вологості бетону 8% коефіцієнт зменшення міцності на стиск складає 0,84, 10% – 0,8, 15% – 0,75 та 20% – 0,7.

Міцність на розтяг при згині ніздрюватих бетонів залежить від методики випробування та в середньому складає 20% величини міцності при стиску.

Величина граничних поздовжніх відносних деформацій при стиску ніздрюватих бетонів коливається від 0,9 до 3 мм/м і відповідає навантаженням, близьким до руйнівних. Гранична розтяжність бетонів 0,1...0,3 мм/м.

Модуль пружності ніздрюватих бетонів визначається значеннями їх міцності та середньої густини. Для автоклавних бетонів на портландцементі модуль деформації при стиску зростає приблизно від 1,2 до $10(\times 10^3)$ МПа зі збільшенням міцності від 1,5 до 15 МПа, для безавтоклавних – від 1 до $8(\times 10^3)$ МПа.

Ніздрюватий бетон, як і інші види бетонів, є пружно-пластичним матеріалом. При тривалій дії навантаження для нього характерні деформації повзучості. При напруженнях менше 30% від граничних деформації повзучості мають затухаючий в часі характер і через 2...3 роки зростання їх практично припиняється, але при завантаженні їх навантаженнями більше 60% інтенсивно розвивається процес тріщиноутворення, що з часом призводить до руйнування ніздрюватобетонних елементів.

Деформації усадки автоклавних ніздрюватих бетонів, виготовлених на основі цементу та піску досягають 0,5...0,7 мм/м і більше, а для нецементних та безавтоклавних бетонів 2 мм/м та більше (рис.4.6); деформації набухання залежать від

умов зберігання та становлять 0,4...1,6 мм/м. Істотно зменшити усадкові деформації можна при введенні до складу ніздрюватих бетонів деякої кількості крупних пористих заповнювачів. Наприклад, заміна 20...25% об'єму кремнеземистого компонента крупним пористим заповнювачем зменшує усадкові деформації ніздрюватих бетонів на 50...70%.

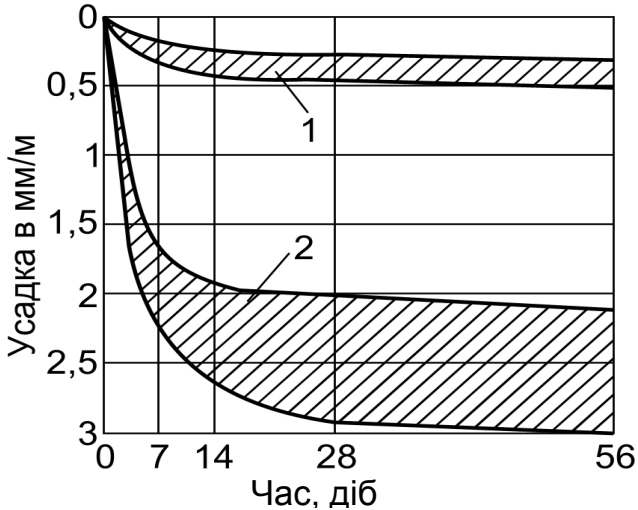


Рис. 4.6. Зміна деформацій усадки ніздрюватого бетону в часі:
1 – автоклавний бетон; 2 – безавтоклавний бетон

Ніздрюваті бетони оптимальних складів мають порівняно високу *морозостійкість* та витримують зазвичай 100...150 циклів поперемінного заморожування та відтавання. Однак морозостійкість знижується із збільшенням відкритої пористості бетонів.

Для ніздрюватих бетонів характерні порівняно високі значення *сорбційної вологості* (рис.4.7), *паро-* та *повітропроникності*. Вони в 5...10 разів більші, ніж для важкого бетону, що обумовлює необхідність застосування захисних покриттів в огорожувальних конструкціях для захисту ніздрюватих бетонів від зволоження.

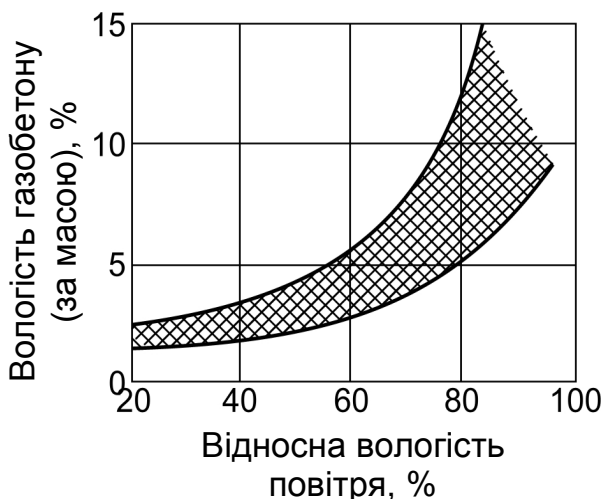


Рис. 4.7. Рівноважна залишкова вологість газобетону при звичайній температурі повітря

Ніздрюваті бетони після теплової обробки не здатні пасивувати сталь. Це у поєднанні з високою проникністю змушує приймати спеціальні заходи щодо захисту арматури, зокрема, використовувати цементно-козеїнові, цементно-латексні, бітумні та полімерні захисні покриття.

Значне сорбційне зволоження обмежує застосування виробів з ніздрюватого бетону в будинках з підвищеною вологістю.

При проектуванні огорожуючих конструкцій з ніздрюватих бетонів необхідно враховувати також їх поро- та повітропроникність, температурно-вологісні деформації, що мають місце при попереминому зволоженні та висиханні, нагріванні та охолодженні.

Теплопровідність ніздрюватих бетонів визначається їх середньої густиною та вологістю (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Теплопровідність ніздрюватих бетонів (Вт/м·°С)

Вологість, %	Середня густина бетону в сухому стані, кг/м ³								
	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200
0	0,9	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,21	0,23	0,34
5	0,13	0,14	0,16	0,19	0,20	0,23	0,25	0,28	0,39
10	0,17	0,19	0,21	0,24	0,25	0,27	0,30	0,33	0,44
15	0,20	0,23	0,25	0,29	0,31	0,32	0,34	0,37	0,49
20	0,24	0,27	0,29	0,33	0,35	0,37	0,39	0,42	0,54

Властивості ніздрюватих бетонів покращуються з оптимізацією їх пористої структури за рахунок різних технологічних прийомів, застосування високоміцних ефективних в'язучих, дисперсного армування волокнистими добавками, використання швидкісних вібро- та гідродинамічних змішувачів.

Розрахунок складу ніздрюватого бетону базується на двох рівняннях, що характеризують матеріальний баланс:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{H_{к}}{\rho_{н}} + \frac{B}{\rho_{в}} + V_{пор} = 1000 \quad (4.11)$$

$$\rho_{б} = 1,15Ц + H_{к}, \quad (4.12)$$

де $Ц$, $H_{к}$, B – відповідно витрата цементу, кремнеземистого наповнювача та води;

$\rho_{ц}$, $\rho_{н}$, $\rho_{в}$ – густина відповідних компонентів;

$\rho_{б}$ – густина бетону;

$V_{пор}$ – об'єм пор за рахунок введення в суміш пороутворювача.

Орієнтовні значення співвідношень (C) маси кремнеземистого наповнювача до маси в'язучого наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Співвідношення між кремнеземистим наповнювачем і в'язучим

В'язуче	Значення С	
	для автоклавного бетону	для безавтоклавного бетону на золі-виносу
Цементне та цементно-вапняне	0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0	0,75; 1; 1,25
Вапняне	3; 3,5; 4; 4,5; 5,5	-
Вапняно-білітове	1; 1,25; 1,5; 2,0	-
Вапняно-шлакове	0,6; 0,8; 1,0	0,6; 0,8; 1,0
Високоосновне зольне	0,75; 1; 1,25	-
Шлаколужне	0,1; 0,15; 0,2	-

Відношення $C_{вцв}$ для вапняно-цементного в'язучого знаходять за формулою:

$$C_{вцв} = C_u n + C_i (1 - n), \quad (4.13)$$

де C_u і C_i – відношення маси кремнеземистого наповнювача відповідно до маси цементу та вапна (в розрахунку на 100% СаО+МgО);

n – частка цементу в змішаному в'язучому за масою ($n=0,35\dots0,7$).

З рівняння (4.12) отримаємо:

$$1,15Ц + C_u = \rho_{\delta}. \quad (4.14)$$

Тоді:

$$Ц = \frac{\rho_{\delta}}{1,15 + C_u}. \quad (4.15)$$

Вираз для розрахунку витрати води можна представити рівнянням:

$$B = \frac{B}{T} (Ц + H_{\kappa}), \quad (4.16)$$

де V/T – водотвердне відношення, що орієнтовно приймається за табл. 4.8 і точніше визначається експериментально при досягненні необхідної текучості бетонної суміші (табл. 4.9).

Таблиця 4.8

Орієнтовні значення V/T

Середня густина ніздрюватого бетону	V/T
300	0,45
500	0,4
700	0,35

Таблиця 4.9

Текучість ніздрюватої суміші

Задана густина бетону, кг/м^3	Діаметр розпливу суміші (за Сутгардом), см		
	на цементному, вапняно-цементному, шлаколузному в'язучому	на вапняному, вапняно-шлаковому в'язучому	на високо-основному зольному в'язучому
Литєва технологія			
300	38	30	-
400	34	25	25
500	30	23	23
600	26	21	21
700	22	19	20
800	18	17	18
Вібраційна технологія			
500	15	-	-
600	13	-	-
700	11	-	-
800	9	-	-

Рівняння (4.11) з урахуванням формули (4.15) можна привести, приймаючи $\rho=1$ кг/л, до виду:

$$C \left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_n} + \frac{(1+C)B}{T} \right) + V_{\text{пор}} = 1000 \quad (4.17)$$

і знайти об'єм пор в л:

$$V_{nop} = 1000 - Ц \left(\frac{I}{\rho_{ц}} + \frac{C}{\rho_{н.к}} + (I + C)B/T \right). \quad (4.18)$$

Необхідна кількість пороутворювача Д:

– для газобетону, кг/м³:

$$Д = \frac{V_{nop}}{K_{в.г} \alpha}; \quad (4.19)$$

– для пінобетону, л/м³:

$$Д = \frac{V_{nop}}{K_{в.п} \alpha}, \quad (4.20)$$

де α – коефіцієнт, що враховує повноту використання газоутворювача – алюмінієвої пудри або водного розчину піноутворювача ($\alpha=0,85$);

$K_{в.г}$ і $K_{в.п}$ – вихід пор при введенні відповідно газо- або піноутворювача. ($K_{в.г} \approx 1390$ л/кг; $K_{в.п} \approx 20$ л/кг).

Приклад 4.2. Розрахувати склад ніздроватого бетону неавтоклавного твердіння з середньою густиною 500 кг/м³ і введенням як кремнеземистого наповнювача меленого піску з $\rho_n = 2,65$ кг/м³. Визначити витрату газоутворювача.

1. Приймаємо співвідношення між кремнеземистим компонентом і в'язучим $C=1$. За формулою (4.17) витрата цементу :

$$Ц = 500 / (1,15 + 1) = 232,5 \text{ кг/м}^3.$$

2. Витрата кремнеземистого компонента:

$$H_k = CЦ = 1 \cdot 232,5 = 232,5 \text{ кг/л}.$$

3. Водотвердне відношення $B/T=0,4$ (табл. 4.8).

4. Витрата води за формулою (4.16):

$$B = 0,4 \cdot 232,5(1 + 1) = 186 \text{ л/м}^3.$$

5. Потрібний об'єм пор знайдемо виходячи з рівняння (4.18):

$$V_{nop} = 1000 - 232,5 \left(\frac{1}{3,1} + \frac{1}{2,65} + 0,4(1 + 1) \right) = 347,5 \text{ л/м}^3.$$

6. Необхідна кількість пороутворювача для газобетону (4.19), кг/м³:

$$D = \frac{347,5}{1390 \cdot 0,85} = 0,294.$$

Розрахунковий склад газобетону, кг/м³: Ц=232,5; Н_к=235,5; В=186; Д=0,294.

4.3. Пінобетон на малоклінкерному шлакопортландцементі

Встановлено можливості одержання неавтоклавного пінобетону з використанням малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ), з вмістом клінкеру менше 20%.

В якості основного сировинного матеріалу для проведення експериментальних досліджень було використано активований МШПЦ вміст клінкеру в якому складав 12%. Активність в'язучого з питомою поверхнею 450 м²/кг складала 43 МПа. В якості пластифікуючих добавок було використано добавку суперпластифікатора нафталіно-формальдегідного типу СП-1, а також суперпластифікатор поліакрилатного типу Дунапон SP3. Для отримання стійкої піни було використано піноутворювач ПБ-2000. В якості мінерального наповнювача (Н) використовувався мелений кварцовий пісок з питомою поверхнею 410 м²/кг.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований тривірневий трифакторний план В₃. Умови планування експерименту наведені в табл. 4.10.

Після проведення, обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі середньої густини та міцності на стиск стандартних бетонних кубів, які пройшли тепловологісну обробку та зразків після 28 діб нормального твердіння, у вигляді поліноміальних рівнянь регресії (табл. 4.11). На основі отриманих експериментально-статистичних моделей побудовані графічні залежності рис. 4.7...4.9.

Таблиця 4.10

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Натуральний вид	Кодовий	-1	0	+1	
1	Витрата МШПЦ (Ц), кг/м ³	x ₁	600	700	800	100
2	Співвідношення Н/Ц	x ₂	0	0,25	0,5	0,25
3	Витрата піноутворювача (П), кг/м ³	x ₃	1	1,5	2	0,5

Примітка. Витрата клінкеру коливається в межах від 72 до 96 кг/м³.

Таблиця 4.11

Експериментально-статистичні моделі водопотреби та міцності пінобетонів на малоклінкерному шлакопортландцементі

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Водопотреба пінобетону л/м ³	$B = 264,84 + 17,5x_1 - 0,07x_2 - 1,33x_1^2 - 2,33x_2^2 + 1,17x_3^2 \quad (4.21)$
Середня густина, г/см ³	$\rho = 0,71 + 0,1155x_1 + 0,033x_2 - 0,152x_3 + 0,072x_1^2 + 0,076x_2^2 + 0,076x_3^2 + 0,014x_1x_3 - 0,025x_1x_2 + 0,026x_2x_3 \quad (4.22)$
Міцність при стиску після пропарювання, МПа	$R_c^{TBO} = 0,27 + 1,423x_1 - 1,051x_2 - 0,172x_3 + 1,197x_1^2 + 0,407x_2^2 + 1,172x_3^2 - 0,194x_1x_3 + 0,609x_1x_2 - 0,376x_2x_3 \quad (4.23)$
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$R_c^{28} = 1,19 + 0,014x_1 + 0,014x_2 - 0,113x_3 - 3,506x_1^2 + 0,523x_1x_3 + 0,0154x_1x_2 - 0,047x_2x_3 \quad (4.24)$

Аналіз графічних залежностей зображених на рис. 4.8 свідчить, що найбільш суттєвими факторами, які впливають на середню густину пінобетону є витрата в'язучого та піноутворювача. З графіків видно, що збільшення кількості в'язучого призводить до різкого збільшення середньої густини, що пов'язано із збільшенням кількості твердої фази. Проте знівелювати даний вплив можна збільшенням кількості піноутворювача, що тягне за собою збільшення об'єму піни та відповідне збільшення пористості затверділого бетону. До деякого зниження середньої густини пінобетону призводить збільшення кількості мінерального наповнювача (меленого піску) до $H/C=0,25$, що пов'язано із збільшенням кількості води необхідної для отримання бетонної суміші заданої рухомості, і відповідно, до збільшення пористості затверділого цементного каменю і зменшення його середньої густини.

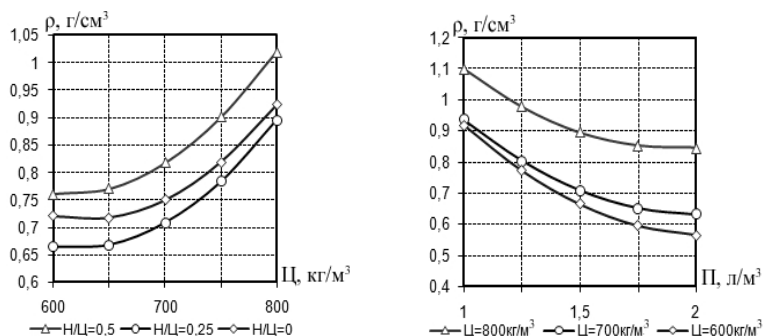


Рис.4.8. Вплив витрати цементу та пороутворювачів на середню густину пінобетону, виготовленого на МШПЦ

Вплив технологічних факторів на міцність пінобетону після проходження тепловологісної обробки (ТВО) аналогічний їх впливу на міцність у віці 28 діб при нормальному твердненні (рис. 4.9, 4.10). Проте міцність зразків після ТВО майже в кожній точці є вищою ніж міцність після 28 діб нормального твердіння, що обумовлено утворенням при підвищеній температурі додаткової кількості гідросилікатів кальцію і

формуванням щільної дрібнопористої структури цементного каменю.

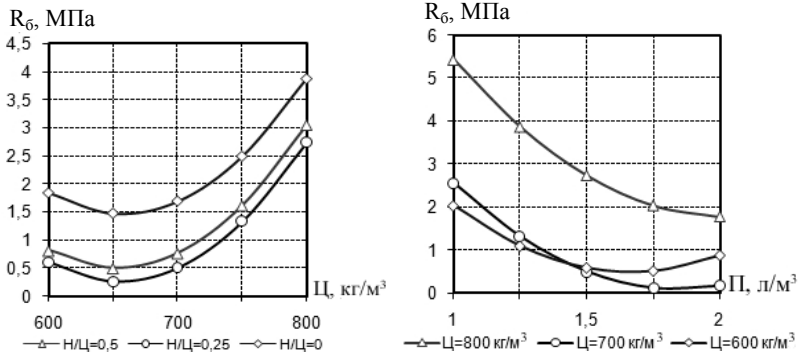


Рис. 4.9. Вплив витрати цементу та пороутворювачів на міцність пінобетону у віці 28 днів виготовленого на МШПЦ, при твердінні в нормальних умовах

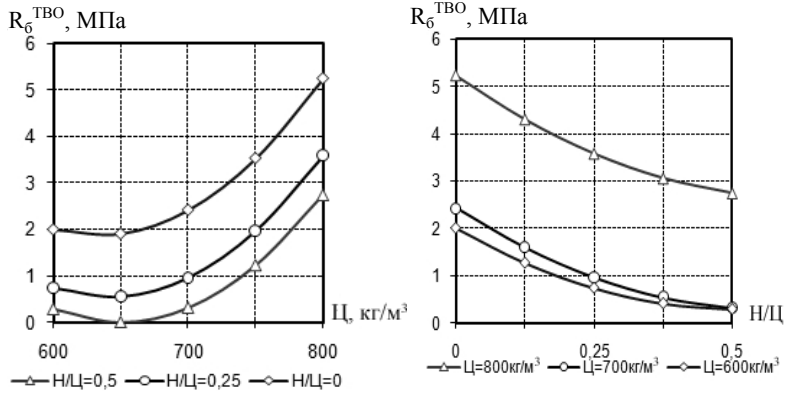


Рис. 4.10. Вплив витрати цементу та пороутворювачів на міцність пінобетону, виготовленого на МШПЦ, після тепловологісної обробки

Другий етап досліджень було присвячено визначенню впливу виду суперпластифікатора на властивості пінобетону виготовленого на МШПЦ. Для цього було проведено ряд досліджень, при застосуванні суперпластифікаторів нафталін-

формальдегідного і поліакрилатного типів, якими також було встановлено оптимальні параметри отримання пінобетону високої якості. Результати досліджень наведені в табл. 4.11.

Таблиця 4.11
Експериментальні результати досліджень пінобетонів
на основі МШПЦ

№ точки	МШПЦ, кг/м ³	Суперпластифікатор	Піноутворювач ПБ-2000, кг/м ³	V _п , л/м ³	V _{зам} , л/м ³	V _{заг} , л/м ³	ρ _п , кг/м ³	R _{б, ТВО} , МПа	ККЯ
1	800	СП-1(0,5%)	2,5	100	150	250	623	1,6	2,57
2	800	СП-1(0,5%)	2,25	100	150	250	598	1,2	2,01
3	800	СП-1(0,5%)	2	100	150	250	697	1,8	2,58
4	800	СП-1(0,5%)	1,8	70	155	225	869	3	3,45
5	800	СП-1(0,5%)	1,6	70	155	225	867	3,4	3,92
6	800	СП-1(0,5%)	1,4	70	155	225	816	4,2	5,15
7	800	СП-1(0,5%)	1	70	155	255	889	4,1	4,61
8	800	Dynamon(0.5%)	1.8	70	155	255	852	3,5	4,11
9	800	Dynamon(0.5%)	1.6	70	155	255	924	3,0	3,25
10	800	Dynamon(0.5%)	1.4	70	155	255	844	2,75	3,26
11	800	Dynamon(0.5%)	1.2	70	155	255	923	3,8	4,12
12	800	Dynamon(0.5%)	1	70	155	255	955	4,9	5,13

Примітка. V_п – витрата води на приготування піни; V_{зам} – витрата води на приготування суміші; V_{заг} – загальна витрата води; ρ_п – середня густина зразків, які пройшли тепловологісну обробку; R_{б, ТВО} – міцність пінобетону після тепловологісної обробки; ККЯ – коефіцієнт конструктивної якості.

Аналізуючи отримані дані, можна відзначити, що використання малоклінкерного ШПЦ для приготування пінобетону є доцільним, що обґрунтовується достатньо високими значеннями міцності і якісною пористою структурою.

Використання суперпластифікатора акрилатного типу Дупамон порівняно з нафталін-формальдегідним СП-1 дозволяє значно зменшити водопотребу сировинної суміші для виготовлення неавтоклавного пінобетону, за рахунок чого досягається зростання міцності пінобетону при стиску. Спільне використання суперпластифікатора Дупамон та МШПЦ покращує структурні характеристики сировинної суміші та

затверділого пінобетону, підвищує однорідність розмірів пор, забезпечує виражену їх геометричну упорядкованість, що призводить до зростання міцності пінобетону.

Стабільність порової структури досягається за рахунок спільної дії меленого гранульованого доменного шлаку та вуглеводневого піноутворювача ПБ 2000, внаслідок чого зменшується синерезис піни і таким чином уповільнюються деструктивні процеси у її структурі. Крім того, мелений гранульований доменний шлак сприяє утриманню вологи у сировинній суміші під час її твердіння, що сприяє збільшенню кінцевої міцності пінобетону.

Використовуючи як критерій показник коефіцієнту конструктивної якості (відношення міцності зразків до їх середньої густини) (табл. 4.11) можна встановити на основі отриманих математичних моделей оптимальні технологічні параметри для отримання пінобетону з заданими значеннями міцності та густини.

4.4. Пінобетон на основі гіпсових в'язучих

Одним із шляхів підвищення екологічності та швидкості виконання робіт при виготовленні ефективних ніздрюватих бетонів та виробів на їх основі є використання гіпсових в'язучих матеріалів. Передумовами для цього є доступність гіпсової сировини, простота виробництва гіпсових виробів та високі показники їх якості. Матеріали на основі гіпсу володіють високими тепло- та звукоізоляційними властивостями, підвищеною вогнестійкістю. Крім цього важливими особливостями матеріалів на основі гіпсового в'язучого є короткі строки тужавлення та швидкий набір міцності. Ці властивості сприяють використанню таких матеріалів при виготовленні внутрішніх елементів будівель (стінові блоки, перегороджуючі плити, звукопоглинаючі матеріали та ін.).

Технологічний процес виготовлення піногіпсу супроводжується наступними основними технологічними стадіями: попередня підготовка вихідних компонентів, приготування піногіпсової суміші; формування виробів; тверднення та їх теплова

обробка. Визначальною стадією при виготовленні піногіпсу є стадія отримання піногіпсової суміші. Приготування піногіпсової суміші може бути виконано декількома способами.

Першим способом отримання піногіпсової суміші є класична технологія. Згідно з цим способом спеціально приготовлену технологічну піну змішують з гіпсовим тістом і при інтенсивному їх перемішуванні отримують піногіпсову суміш.

Другим способом отримання піногіпсової суміші є технологія сухої мінералізації піни гіпсовим в'язучим. Приготування суміші за цим методом відбувається шляхом поступового змішування сухих компонентів з піною, що попередньо була приготовлена. При цьому відбувається “бронювання” кожної повітряної бульбашки частинками твердої фази в'язучого і відсмоктування ним води з піни. Так утворюється високостійка піногіпсова суміш з малою кількістю вільної води. Структурні характеристики, середня густина, міцність та інші функціональні властивості піноматеріалів, отриманих методом сухої мінералізації піни, в першу чергу залежать від кратності піни і водовмісту поризованої композиції. Дана технологія забезпечує отримання піногіпсових виробів широкої номенклатури та різної густини. Унікальність технології також полягає в тому, що структура матеріалу формується ще на стадії отримання піни, показники якої легко регулюються за рахунок зміни концентрації піноутворюючої ПАР, кратності піни, умов мінералізації та ін. Так зміна швидкості піноутворення та мінералізації дає можливість отримати структуру піногіпсу з замкнутими порами, що є важливим для теплоізоляційних матеріалів.

Третій спосіб полягає у використанні баротехнології. Ця технологія є перспективною при виробництві піногіпсової суміші. Вона полягає в насиченні суміші компонентів у герметичному змішувачі стислим повітрям і спінюванні її в результаті перепаду тиску (різниця між тиском у змішувачі та атмосферним) при вивантаженні суміші у форми. Спінення суміші, внаслідок перепаду тиску, дає можливість зменшити витрату піноутворюючої ПАР, що покращує умови гідратації

гіпсового в'язучого і призводить до підвищення міцності гіпсового каменю.

У всіх розглянутих способах приготування піногіпсової суміші є відмінності, які полягають у технологічній можливості використання добавок. Так, при традиційному, роздільному способі найбільш ефективно використання добавок, які вводяться на стадії приготування розчинової суміші. Це дає можливість попередньо і цілеспрямовано змінювати її технологічні властивості до початку змішування з піною. За методом сухої мінералізації можливість введення добавок у розчинову суміш та практичний вплив їх на технологічні властивості отриманого матеріалу – мінімальні. За цим методом добавка вводиться безпосередньо в розчин ПАР, що знижує ефект їх технологічної дії. Тому необхідно дотримуватись принципу сумісності добавки та ПАР, виключаючи можливість зниження піноутворюючої здатності розчину, та в подальшому їх впливу на умови тверднення в'язучого. Це також відноситься до методу приготування піногіпсової суміші за баротехнологією.

Після формування піногіпсові вироби підлягають сушінню при постійній температурі.

Технологія приготування піногіпсу дозволяє цілеспрямовано регулювати в широкому діапазоні середню густину отриманого матеріалу, що дає можливість отримувати як теплоізоляційний, теплоізоляційно-конструктивний, так і конструктивний піногіпс. В технології виготовлення піногіпсу в цілому можуть бути виконані додаткові заходи, направлені на оптимізацію складу компонентів суміші, умов її приготування та тверднення з метою отримання виробів із високими експлуатаційними властивостями та підвищити термічний опір конструкцій до заданого нормативними документами рівня.

Синтетичні піноутворювачі використовуються при виробництві піногіпсу густиною від 400 кг/м^3 . Вони є більш дешевими, зручними при роботі та легко спінюються. Отримана піна на їх основі має велику кратність. Однак ці піноутворювачі негативно впливають на процес тужавлення та тверднення поризованих сумішей і на міцність отриманих матеріалів.

Білкові піноутворювачі дають можливість одержувати піну з високою стійкістю, яка сприяє отриманню матеріалу з дрібнопористою структурою, що є важливим для теплоізоляційних матеріалів. Однак вони мають ряд недоліків: малий термін придатності, високу вартість, підвищені вимоги до піногенераторів, меншу піноутворюючу здатність, наявність неприємного запаху та ін.

Використання того чи іншого піноутворювача залежить від прийнятої технології. При виробництві теплоізоляційних виробів застосовують зазвичай синтетичні піноутворюючі ПАР, а при конструктивно-теплоізоляційних – білкові.

Показники якості піногіпсу визначаються основними властивостями його складових компонентів: піни, піногіпсової суміші та гіпсового каменю.

Піногіпсова суміш представляє собою гетерогенну систему, дисперсною фазою якої є повітряні бульбашки, а дисперсійним середовищем – гіпсове тісто. Гіпсове тісто, в свою чергу, також можна розглядати як гетерогенну систему, дисперсною фазою в якій є гіпсове в'язуче, а дисперсійним середовищем – вода замішування з розчиною в ній ПАР. При взаємодії гіпсового в'язучого з водним розчином ПАР, утворюється гіпсове тісто, густина якого значно більша, ніж густина водного розчину ПАР. Збільшення густини дисперсійного середовища піногіпсової суміші по відношенню до дисперсійного середовища піни призводить до підвищення тиску газу в бульбашках і, відповідно, до зменшення їх об'єму та збільшення кількості. На рис. 4.11 приведена схема піногіпсової суміші.

Піногіпсова суміш характеризується об'ємом, кратністю та густиною, які можуть бути визначені на основі рівнянь, отриманих для піни, шляхом врахування зміни маси піноутворюючого розчину відносно маси піногіпсової суміші, $m_p/m_{n.z.c.}$, внаслідок наявності в ньому твердої фази (гіпсове в'язуче, гіпсоцементнопуцоланове в'язуче та ін.).

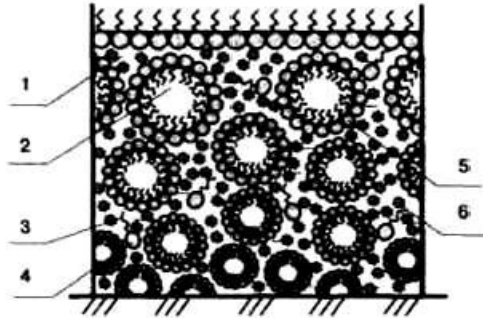


Рис. 4.11. Схема піногіпсової суміші:

- 1 – розчин ПАР; 2 – повітряне включення (бульбашка); 3 – гідрофобна частина молекули ПАР; 4 – гідрофільна частина молекули ПАР;
5 – «килим» з одного шару молекул ПАР; 6 – гіпсове в'язуче

Кратністю піногіпсової суміші є відношення її об'єму ($V_{nz.c}$) до об'єму суміші гіпсового в'язучого з розчином ПАР ($V_{p(nz.c)}$):

$$\beta_{nz.c} = \frac{V_{nz.c}}{V_{p(nz.c)}}. \quad (4.25)$$

Густина піногіпсової суміші виразиться рівнянням:

$$\rho_{nz.c} = \frac{m_{nz.c}}{V_{nz.c}}. \quad (4.26)$$

Враховуючи рівняння (4.25), рівняння (4.26) прийме вид:

$$\rho_{nz.c} = \frac{m_{nz.c}}{\beta_{nz.c} V_{p(nz.c)}}. \quad (4.27)$$

На основі теоретичного аналізу отримані розрахункові рівняння по визначенню об'єму, кратності та густини піногіпсової суміші, які враховують зміну маси та величини поверхневого натягу піноутворюючого розчину, внаслідок наявності в ньому твердої фази (в'язучого).

Основними факторами, які впливають на показники якості піно гіпсової суміші є водогіпсове відношення B/G та відношення маси ПАР на суху речовину до маси гіпсового в'язучого Q/G . B/G впливає на текучість піногіпсової суміші, а

Q/Γ – на розмір та кількість бульбашок в залежності від якісних показників піни.

Графічні залежності кратності (відношення об'єму піногіпсової суміші до об'єму суміші гіпсового в'язучого з розчином ПАР) $\beta_{п.г}$ і густини піногіпсової суміші $\rho_{п.г.с}$ від В/Г і Q/Γ приведені на рис. 4.12, 4.13, а також міцності піногіпсу на рис. 4.14.

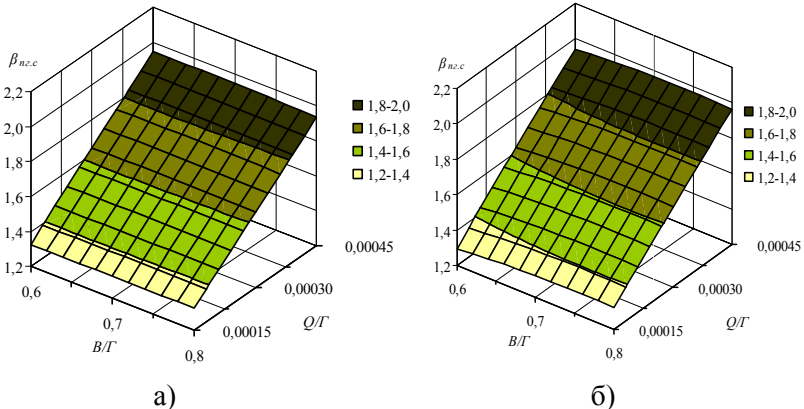


Рис. 4.12. Графіки залежностей $\beta_{п.г.с}$ від В/Г та Q/Γ

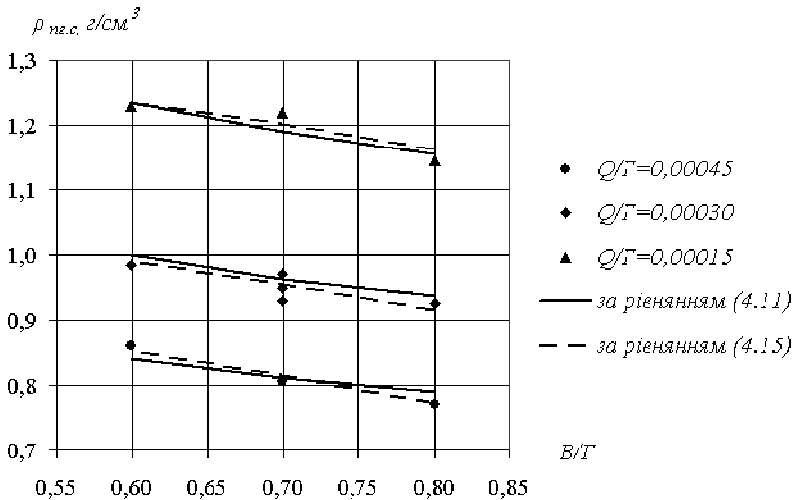


Рис. 4.13. Графіки залежностей $\rho_{п.г.с}$ від В/Г при різних Q/Γ

Покращення міцності піногіпсу на стиск досягається підвищенням міцності штучного гіпсового каменю (дисперсійного середовища піногіпсу) за рахунок оптимізації складу його складових компонентів, підвищення марки гіпсового в'язучого та його покращення шляхом використання ГЦПВ.

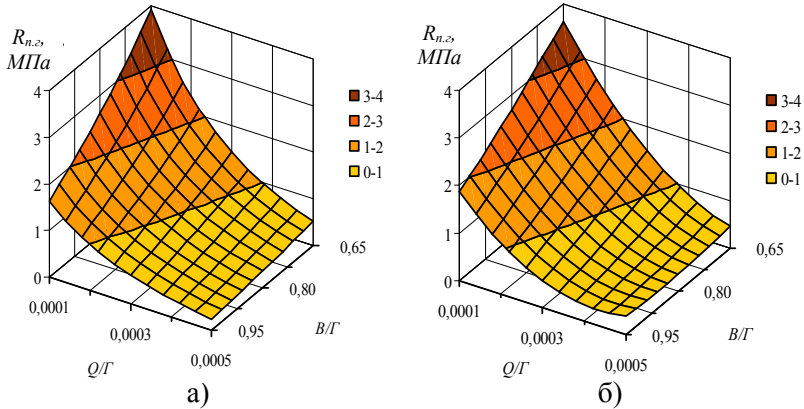


Рис. 4.14. Графіки залежності міцності піногіпсу від $V/Г$ та $Q/Г$

Покращення міцності піногіпсу на стиск досягається також регулюванням мікроструктури гіпсового каменю та макроструктури піногіпсу за рахунок використання оптимальних значень $V/Г$ та $Q/Г$, забезпеченням однорідності розмірів пор (достатня тривалість диспергування піноутворюючого розчину), збільшенням закритої пористості за рахунок зменшення діаметру пор (додатковий помел гіпсового в'язучого).

Покращення міцності піногіпсу на розтяг при згині та зменшення величини деформацій досягається також застосуванням полімерної фібри.

5. КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ

Визначальними властивостями легких бетонів є їх середня густина, пористість і водопоглинання, міцність на стиск, розтяг та згин, модуль пружності, усадка, морозостійкість, паропроникність, теплопровідність. У відповідності з умовами застосування при необхідності визначаються і інші властивості. У табл. 5.1 і 5.2 наведені основні шляхи використання легких бетонів на неорганічних пористих заповнювачах і ніздрюватих бетонів.

Таблиця 5.1

Шляхи використання легких бетонів
на різних видах пористих заповнювачів

Вид бетону	Призначення легких бетонів			
	Блоки і панелі стін, монолітний конструкційно-теплоізоляційний бетон	Блоки, камені, цегла	Плити перекриття і покриття, конструкційний монолітний бетон	Плити монолітні, шари теплоізоляційні
Керамзитобетон	+	+	+	-
Керамзитоперлітобетон	+	+	-	-
Керамзитозолобетон	+	+	-	-
Шлакопемзобетон	+	+	+	-
Шлакопемзоперлітобетон	+	+	+	-
Шлакопемзозолобетон	+	+	+	-
Перлітобетон	+	+	-	+
Бетон на шлаковому гравію	+	+	-	+
Шлакобетон	+	+	+	-
Шлакозолобетон	+	+	+	-
Золобетон	+	+	-	-
Бетон на пористих вапняках	+	+	-	-
Опокобетон	+	+	-	-
Туфобетон	+	+	-	-

Таблиця 5.2

Область застосування ніздрюватих бетонів

Види виробів і матеріалів	
Вироби з ніздрюватих бетонів	Вироби дрібні теплоізоляційні
	Вироби дрібні звукопоглинальні
	Блоки дрібні стінові
	Перегородки міжкімнатні
	Блоки великорозмірні неармовані
	Блоки великорозмірні армовані
	Панелі стінові
	Плити покриття
	Плити перекриття
	Перемички брускові, лоткові
	Заповнювач для легких бетонів
	Засипка теплоізоляційна
Монолітний ніздрюватий бетон	Теплоізоляційні шари суміщених покрівель
	Підготовка під теплу підлогу
	Одношарові огорожувальні конструкції будинків
	Багатошарові огорожувальні конструкції будинків

Середня густина. Середню густину бетонів на пористих заповнювачах і ніздрюватих бетонів під час виробничого контролю визначають випробуванням зразків правильної геометричної форми, призначених для визначення міцності бетону. Номінальні розміри зразків правильної геометричної форми, методи їх виготовлення повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Об'єм зразків правильної форми обчислюють за їх геометричними розмірами.

Для визначення середньої густини бетону у сухому стані зразки висушують до постійної маси в електрошафі при температурі (105 ± 10) °С. Висушування вважається закінченим, якщо різниця між двома послідовними зважуваннями у процесі висушування не перевищує 1 г.

Середню густину бетону ρ_w зразка з вологістю в момент випробування W_m визначають із похибкою до 1 кг/м³ за формулою

$$\rho_w = \frac{m}{V}, \quad (5.1)$$

де m – маса зразка, кг;
 V – об’єм зразка, м³.

Для серії зразків середню густину бетону визначають як середнє арифметичне значення результатів випробування всіх зразків серії.

Допустимі значення середньої густини бетонів для кожної марки D наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Марки бетонів D та допустимі граничні значення середньої густини бетонів

Марка за середньою густиною	Середня густина, кг/м ³
D200	Від 180 до 220 вклуч.
D250	Понад 220 » 270 »
D300	» 270 » 320 »
D350	» 320 » 370 »
D400	» 370 » 420 »
D500	» 420 » 530 »
D600	» 530 » 630 »
D700	» 630 » 740 »
D800	» 740 » 840 »
D900	» 840 » 950 »
D1000	» 950 » 1050 »
D1100	» 1050 » 1150 »

При визначенні середньої густини бетону у легкобетонних виробках зразки відбирають з верхньої, середньої та нижньої частин виробу, відстань від граней виробу до зразка повинна бути не менше 20 мм.

Середню густину бетону у виробках та конструкціях можна вимірювати радіоізотопним методом, який ґрунтується на залежності між густиною бетону і характеристиками ослаблення

або розсіювання гама-випромінювання. Радіоізотопні прилади дозволяють визначати середню густину бетону в діапазоні 600...2500 кг/м³.

Вологість. Вологість бетону за ДСТУ Б В.2.7-170:2008 визначають на пробах, отриманих подрібненням зразків після випробування на міцність чи отриманих із готових виробів або конструкцій.

Найбільша крупність подрібнених шматків повинна бути:

- для бетонів на пористих заповнювачах – не більше максимального розміру зерен заповнювачів;
- для дрібнозернистих бетонів (включаючи ніздрюваті та силікатні) – не більше 5 мм.

Із подрібненого матеріалу шляхом квартування відбирають усереднену пробу масою не менше:

1000 г – для бетонів на пористих заповнювачах;

100 г – для ніздрюватих, силікатних і дрібнозернистих бетонів.

При виробничому контролі вологості бетону в бетонних і залізобетонних виробках допускається проводити випробування проб бетону меншої маси.

Підготовлені проби або зразки зважують, після чого їх кладуть в сушильну шафу й висушують до постійної маси. Перед повторним зважуванням проби (зразки) охолоджують в ексікаторі з безводним хлористим кальцієм або у сушильній шафі до кімнатної температури.

Вологість проби (зразка) бетону за масою W_m у відсотках визначають із похибкою до 0,1 % за формулою:

$$W_m = \frac{m_e - m_c}{m_c} \cdot 100, \quad (5.2)$$

де m_e – маса проби (зразка) бетону до сушіння, г;

m_c – маса проби (зразка) бетону після сушіння, г.

При контролі вологості бетонних виробів застосовують *дієлькометричний метод* вимірювання вологості, який ґрунтується на кореляційній залежності діелектричної проникності матеріалу від вмісту в ньому води при позитивних температурах. З цією метою застосовують електронний вологомір ВСКМ-12 та ін.

Для експресного автоматизованого вимірювання вологості бетонних сумішей і бетонів застосовують *нейтронний метод*, який базується на ефекті уповільнення швидких нейтронів у процесі їх взаємодії з ядрами атомів водню у воді, яка міститься в матеріалі. Число повільних нейтронів, що реєструється вологомірами, характеризує об'ємну вологість контрольного матеріалу, масову вологість знаходять по відношенню значення об'ємної вологості до його середньої густини.

Водопоглинання. Водопоглинання бетону оцінюється кількістю води, яка поглинається зразками при їх безпосередньому контакті з водою в результаті капілярного всмоктування, осмотичної міграції і гідростатичного тиску. Водопоглинання бетону характеризується у % по відношенню до маси зразків або їх об'єму.

Для проведення випробувань застосовують зразки, аналогічні зразкам, що використовують при визначенні густини бетону. Зразки в стані природної вологості або висушені до постійної маси розміщують у посудині, яка наповнена водою, з таким розрахунком, щоб рівень води в ній був вище верхнього рівня зразків приблизно на 50 мм. Через кожні 24 год. знаходження у воді зразки попередньо обтирають і зважують. Випробування проводять доти, поки результати двох послідовних зважувань будуть відрізнятися не більше ніж на 0,1 %.

Для прискореного визначення водопоглинання зразки піддають кип'ятінню у посудині з водою, об'єм якої повинен не менше ніж удвічі перевищувати об'єм розміщених у ній зразків. Після кожних 4 год. кип'ятіння зразки охолоджують у воді до температури $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$, витирають вологою віджатою тканиною і зважують. Випробування також як і при методі, що розглянутий вище, проводять доти, поки результати двох послідовних зважувань будуть відрізнятися не більше ніж на 0,1 %.

Обчислюють водопоглинання (W') за формулами:

$$\text{за масою:} \quad W'_m = \frac{m_g - m_c}{m_c} \cdot 100; \quad (5.3)$$

за об'ємом:

$$W'_o = \frac{W'_m \rho_o}{\rho_e}, \quad (5.4)$$

де m_e – маса зразка після насичення водою, г;

m_c – маса сухого зразка, г.

ρ_o – середня густина сухого бетону, г/см³;

ρ_e – густина води ($\rho_e = 1$ г/см³).

Пористість. Порами бетону можна вважати всі елементи його структури, що не заняті твердими фазами вихідних компонентів і новоутворень.

Існують різні класифікації пор – залежно від їх походження, форми і взаємного розташування. Методи визначення пористості можна підрозділити на дві групи: методи, що дозволяють диференціювати пори за радіусами залежно від їх об'єму і методи, що дозволяють визначити загальний об'єм пор того чи іншого виду.

Для бетону згідно ДСТУ Б В.2.7-170:2008 визначають загальний об'єм пор, об'єм відкритих капілярних і некапілярних пор, об'єм умовно замкнутих пор, а також показники мікропористості, середнього розміру і однорідності розміру пор.

Загальний об'єм пор бетону пропонується визначати за формулою в % із похибкою до 0,1%:

$$P_z = \left[\frac{\rho_{\delta,i} - \rho_o}{\rho_{\delta}} \right] \cdot 100, \quad (5.5)$$

де $\rho_{\delta,i}$ – істинна густина подрібненого в порошок бетону, кг/м³;

ρ_o – середня густина сухого бетону в серії зразків, кг/м³.

Для визначення *дійсної густини* пробу бетону подрібнюють і розтирають до порошкоподібного стану, висушують до постійної маси і охолоджують до кімнатної температури в ексікаторі над концентрованою сірчаною кислотою або над безводним хлоридом кальцію. Дійсну густину визначають пікнометричним методом або більш прискорено за допомогою колби Ле Шательє (ДСТУ Б В.2.7-71).

Об'єм відкритих капілярних пор бетону в серії зразків Π_6 знаходять, визначивши об'ємне водопоглинання в серії зразків (W'_o) за формулою:

$$\Pi_6 = W'_o, \quad (5.6)$$

Об'єм відкритих некапілярних пор бетону в окремих зразках (об'єм міжзернових порожнин, $\Pi_{мз}$ у %) визначають за формулою:

$$\Pi_{мз} = \frac{V - V_1}{V} \cdot 100, \quad (5.7)$$

де V – об'єм зразка;

V_1 – об'єм зразка, визначений у об'ємомірі (рис. 5.1) без попереднього висушування і парафінування після насичування водою протягом 24 год. і витримання 10 хв. на решітці.

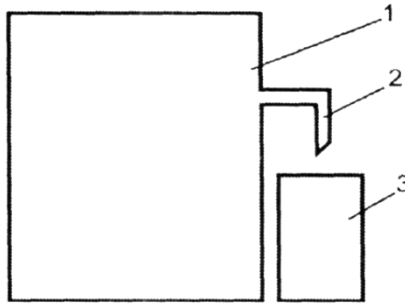


Рис. 5.1. Схема об'ємоміра:

1 – посудина; 2 – трубка; 3 – посудина для збору води

Об'єм умовно-замкнених пор бетону в серії зразків Π_3 у відсотках визначають за формулою:

$$\Pi_3 = \Pi_3 - \Pi_6 - \Pi_{мз}, \quad (5.8)$$

де Π_3 – загальний об'єм пор бетону;

Π_6 – об'єм відкритих капілярних пор бетону;

$\Pi_{мз}$ – об'єм відкритих некапілярних пор бетону, %.

Показник мікропористості бетону серії зразків $\Pi_{мк}$ визначають за формулою:

$$P_{MK} = \frac{W_C}{P_g + P_{M3}}, \quad (5.9)$$

де W_C – сорбційна вологість бетону в серії зразків у % за об'ємом при відносній вологості повітря від 95 % до 100 %;

P_g – об'єм відкритих капілярних пор бетону, %;

P_{M3} – об'єм відкритих некапілярних пор бетону, %.

Показники середнього розміру пор (λ) і однорідності розмірів пор (α) визначають за кінетикою водопоглинання бетону, яка характеризується збільшенням його маси в часі.

Криві водопоглинання виражаються рівнянням

$$W_t = W_m \left[1 - e^{-(\bar{\lambda}t)\alpha} \right], \quad (5.10)$$

де W_t – водопоглинання зразка за час t у відсотках за масою;

W_m – водопоглинання зразка, у відсотках за масою;

e – основа натурального логарифму, яка дорівнює 2,718;

$\bar{\lambda}$ – показник середнього розміру відкритих капілярних пор, який дорівнює границі відношення прискорення процесу водопоглинання до його швидкості, він визначається за номограмами, наведеними на рис. 5.2-5.4;

α – показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор, визначається за номограмами, наведеними на рис. 5.2-5.4.

Кінетика водопоглинання визначається шляхом безперервного або дискретного зважування попередньо висушених зразків у процесі їх насичення водою. При безперервному гідростатичному зважуванні будують криву збільшення маси в часі в координатах: водопоглинання (у відсотках за масою) – час (у годинах). Крім того, наприкінці випробування виконують гідростатичне й звичайне зважування насиченого водою зразка для визначення його об'єму. За результатами випробувань на кривій водопоглинання знаходять точки, у яких водопоглинання становить $W_{t1}=0,632 W_m$ і $W_{t2}=0,5 W_m$ та відповідний цим точкам час t_1 і t_2 . За значеннями t_1 і t_2 за допомогою номограми (рис. 5.2) знаходять параметри порової структури $\bar{\lambda}$ і α . Приклад користування номограмою показаний на рис. 5.2.

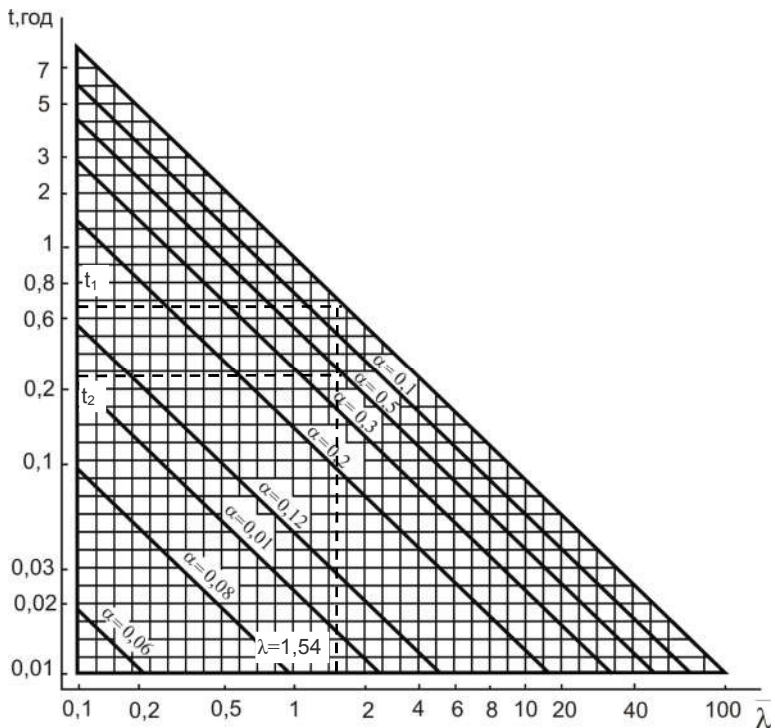


Рис. 5.2. Номограма для визначення параметрів порової структури бетону за кінетикою водопоглинання (безпервний метод)

Приклад 5.1. Визначити середню густину бетону на зразках неправильної форми в сухому стані і при вологості W . Застосовується гідростатичне зважування.

Вихідні дані та експериментальні результати зведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Вихідні дані та експериментальні результати

Показники	Значення для зразків, г			
	1	2	3	Середнє арифметичне
Маса зразка з вологістю $W_m (m)$	580	570	550	567
Маса висушеного зразка (m_c)	550	540	520	537
Маса насиченого водою зразка ($m_{нас}$)	615	605	590	603
Маса насиченого водою зразка при гідростатичному зважуванні ($m'_{нас}$)	293	305	280	293
Маса парафінованого зразка (m_n)	562	555	535	551

За формулою розраховуємо об'єми зразків:

$$V_1 = \frac{615 - 293}{1} - \frac{562 - 550}{0,93} = 309 \text{ см}^3;$$

$$V_2 = \frac{605 - 305}{1} - \frac{555 - 540}{0,93} = 284 \text{ см}^3;$$

$$V_3 = \frac{590 - 280}{1} - \frac{535 - 520}{0,93} = 294 \text{ см}^3;$$

$$V_{cp} = \frac{603 - 293}{1} - \frac{551 - 537}{0,93} = 295 \text{ см}^3.$$

Середню густину зразків в кг/м^3 із вологістю $W_m (\rho_w)$ і в сухому стані (ρ_c) обчислюємо за формулою 2.17:

$$\rho_{w1} = \frac{580}{309} = 1,87 \text{ г/см}^3 (1870 \text{ кг/м}^3);$$

$$\rho_{w2} = \frac{570}{284} = 2,01 \text{ г/см}^3 (2010 \text{ кг/м}^3);$$

$$\rho_{w3} = \frac{550}{294} = 1,87 \text{ г/см}^3 \text{ (1870 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{w,sp} = \frac{567}{295} = 1,92 \text{ г/см}^3 \text{ (1920 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c_1} = \frac{550}{309} = 1,78 \text{ г/см}^3 \text{ (1780 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c_2} = \frac{540}{284} = 1,90 \text{ г/см}^3 \text{ (1900 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c_3} = \frac{520}{294} = 1,77 \text{ г/см}^3 \text{ (1770 кг/м}^3\text{)};$$

$$\rho_{c..sp} = \frac{537}{295} = 1,82 \text{ г/см}^3 \text{ (1820 кг/м}^3\text{)}.$$

При дискретному методі зважування здійснюють через 0,25 год. і 1,0 год. після занурення висушеного зразка у воду, а потім – через кожні 24 год. до постійної маси. Постійною вважають масу зразка, за якої результати двох послідовних зважувань відрізняються не більше ніж на 0,1%. Наприкінці випробувань виконують гідростатичне зважування зразка. За результатами випробувань розраховують відносне водопоглинання за масою в моменти часу $t=0,25$ і $t=1$ год. За цими величинами за допомогою номограм визначають допоміжний параметр $\bar{\lambda}$, і параметр α , за якими розраховують або одержують за номограмами (рис. 5.3, 5.4) параметр $\bar{\lambda}$.

Параметри пористості $\bar{\lambda}$ та α серії зразків бетону визначають як середнє арифметичне значення результатів випробувань всіх зразків серії.

Базовими зразками при визначенні параметрів пористості за кінетикою водопоглинання є куб з ребром 7 см або циліндр діаметром і висотою 7 см.

Допускається визначати кінетику водопоглинання на зразках-кубах, зразках-циліндрах із висотою рівною їх діаметру, а також на зразках неправильної форми, близької до куба, кулі або циліндра. При цьому необхідно експериментальне

визначати перехідні коефіцієнти до базових зразків для параметрів $\bar{\lambda}$ і α .

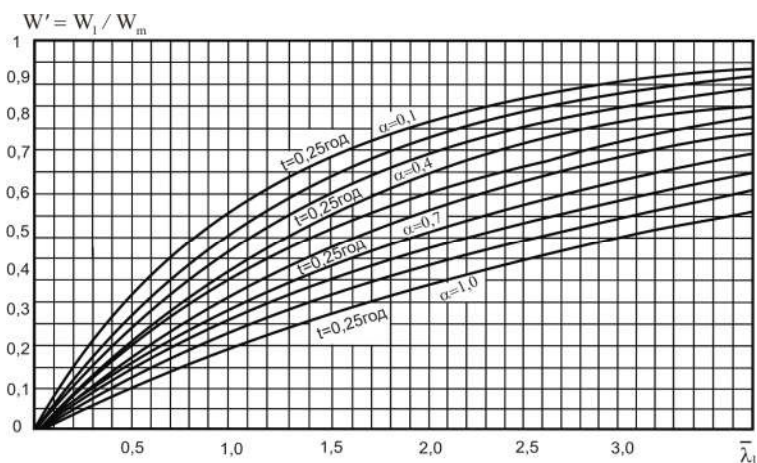


Рис. 5.3. Номограма для визначення параметрів порової структури бетону за кінетикою водопоглинання (дискретний метод)

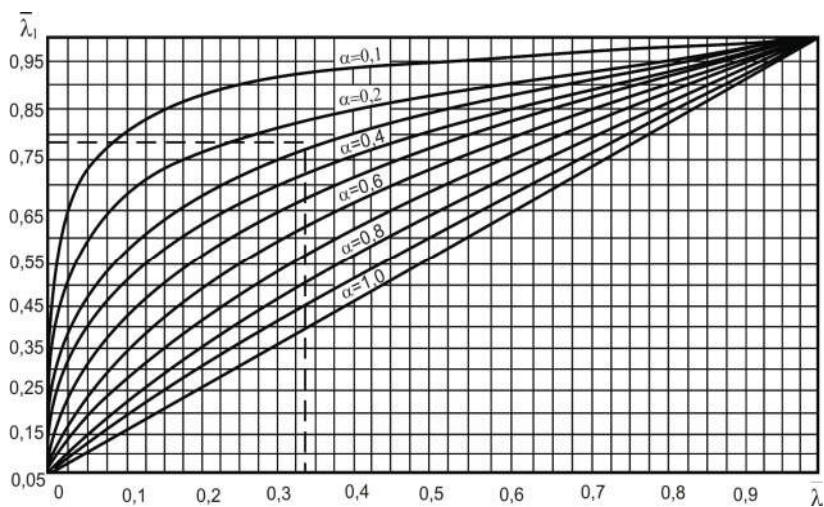


Рис. 5.4. Номограма для визначення $\bar{\lambda} = \alpha \sqrt{\lambda_1}$ якщо $\bar{\lambda}_1 \leq 1$

Приклад 5.2. Визначити вологість і водопоглинання проб легкого бетону отриманих подрібненням зразків після випробування на міцність, якщо їх маса становить: до сушіння: $m_{w_1}=230$ г; $m_{w_2}=240$ г; після сушіння: $m_{c_1}=205$ г; $m_{c_2}=205$ г; після насичення водою: $m_{n_1}=250$ г; $m_{n_2}=270$ г;

Вологість та водопоглинання бетону за масою обчислюємо за формулою (5.2).

Вологість бетону:

$$W_{m_1} = \frac{230 - 205}{205} \cdot 100 = 12,2\%;$$

$$W_{m_2} = \frac{240 - 205}{205} \cdot 100 = 17,1\%;$$

$$W_{\text{ср}} = \frac{12,2 + 17,1}{2} = 14,6\%.$$

Водопоглинання бетону за масою:

$$W'_{m_1} = \frac{250 - 205}{205} \cdot 100 = 22\%;$$

$$W'_{m_2} = \frac{270 - 205}{205} \cdot 100 = 31,2\%;$$

$$W'_{\text{ср}} = \frac{22 + 31,2}{2} = 26,6\%.$$

Визначення водопоглинання за об'ємом W'_o здійснюється (при відомій густині бетону ρ_o) за формулою 5.4.

Усадка. При гідратації цементу, зменшенні вологості цементного каменю і його карбонізації має місце деформація усадки. Відносне зменшення лінійних розмірів ненавантаженого зразка в часі називають *лінійною відносною деформацією усадки* (ϵ_{cs}). Відносне зменшення лінійних розмірів ненавантаженого зразка, викликане випаровуванням з нього води при нагріванні називають *лінійною відносною температурною деформацією усадки* ($\epsilon_{cs}(t)$).

Деформації усадки бетону визначають за ДСТУ БВ.2.7-216:2009 на трьох зразках-призмах, співвідношення для яких розмірів перерізу і висоти становить 4. За базовий зразок

приймають призму з розмірами $150 \times 150 \times 600$ мм. Після розпалублення і до початку випробувань зразки зберігають в однакових, як правило, нормальних температурно-вологісних умовах.

Для визначення деформацій усадки застосовують пристрої, схеми яких показані на рис. 5.5 і рис. 5.6.

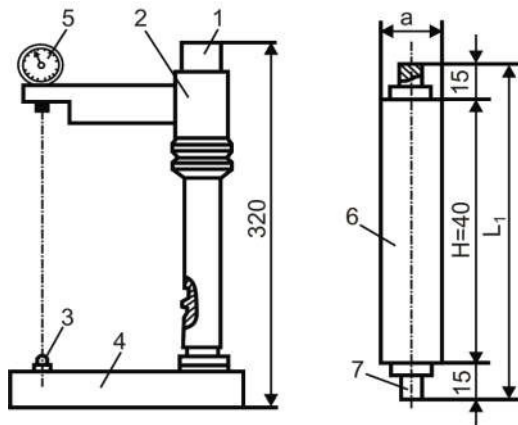


Рис. 5.5. Схема пристрою для визначення деформацій усадки зразків з розмірами поперечного перерізу 40×40 мм:
 1 – стаяк; 2 – кронштейн; 3 – конусоподібний виступ; 4 – нижня опора;
 5 – індикатор; 6 – зразок; 7 – репер; а – розмір сторони поперечного перерізу зразка; Н – висота зразка; L_1 – база вимірів

При підготовці зразків до випробувань визначають їх лінійні розміри і на торцеві поверхні приклеюють репери (рис.5.5) (для зразків $40 \times 40 \times 160$ мм) або металеві пластини (рис. 5.6). На бічних поверхнях зразків розмічають базу виміру поздовжніх деформацій, установлюють закріплюючі пристосування і вимірювальні прилади. Випробування проводяться в приміщенні або в кліматичній камері, в яких постійно підтримується температура $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ і відносна вологість повітря $(60 \pm 5)\%$. Вимірювання деформацій усадки починають не пізніше ніж за 4 год після розпалублення зразків, а зразків з ніздрюватого бетону – після насичення водою. Відлік показників усадки зазвичай виконують через добу, потім на 3, 7, 14 добу і далі один раз за 2 тижні до кінця випробувань.

Одночасно з вимірюванням деформацій усадки рекомендується визначати втрати вологи шляхом періодичного зважування зразків. Випробування припиняють, якщо три послідовних вимірювання показують збільшення деформацій, що не перевищує похибку вимірювального приладу.

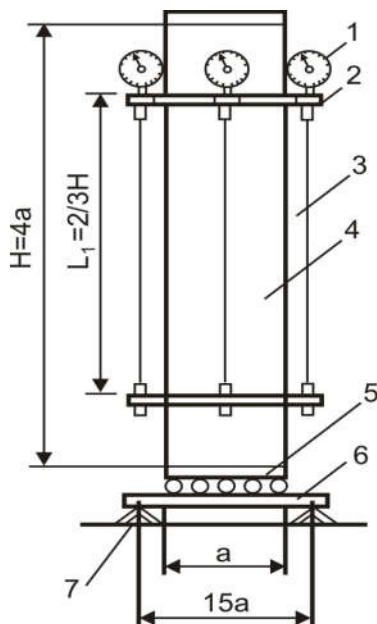


Рис. 5.6. Схема пристрою для визначення деформацій усадки зразків з розмірами поперечного перерізу більше 40х40 мм:

1 – індикатор годинникового типу; 2 – рамка для кріплення індикаторів; 3 – рухома штанга; 4 – зразок; 5 – металеві пластинки по торцях зразка; 6 – плоска зварена сітка; 7 – опора

За результатами випробувань обчислюють середні значення абсолютних деформацій для кожного зразка як середнє арифметичне значення (стосовно початкового відліку) показань приладів по чотирьох гранях.

За середніми абсолютними значеннями деформацій обчислюють відносні величини деформацій усадки кожного зразка за формулою

$$\varepsilon_{cs}(t) = \frac{\Delta l(t)}{l}, \quad (5.11)$$

де l – база вимірювання деформацій, мм.

За результатами визначення відносних величин деформацій усадки окремих зразків визначають середні значення відносних деформацій усадки для серії зразків:

$$\bar{\varepsilon}_{cs}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{cs}(t)}{n}, \quad (5.12)$$

де n – число зразків у серії.

В координатах "відносні деформації усадки – тривалість випробувань, діб" будують діаграму усадки. З цією метою обчислюють значення приростів усадки ($\Delta t / \varepsilon_{cs}$, де Δt – тривалість проведення випробувань із моменту його початку), які відкладають по осі ординат. По отриманих точках графічно або аналітично будують пряму регресії, котангенс кута якої приймають за граничне значення деформацій усадки $\varepsilon_{cs}(\infty)$.

Отримані числові параметри деформацій використовують при необхідності для обчислення відносних деформацій усадки, що перевищують загальну тривалість випробувань. Для цього використовують формулу:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cs}(\infty) \frac{\Delta t}{a_s + \Delta t}, \quad (5.13)$$

де a_s – довжина відрізка, що відтинається лінією регресії на продовженні осі абсцис.

При проведенні випробувань на зразках, відмінних від базових, граничні значення деформацій усадки слід множити на коефіцієнт K . При розмірі ребра поперечного перерізу зразка 7 см $K=0,90$; 10 см – $K=0,95$; 20 см – $K=1,05$.

Повзучість. Повзучість бетону – це його здатність деформуватися в часі при тривалій дії постійного навантаження. Згідно ДСТУ БВ.2.7-216:2009 визначається *лінійна відносна*

деформація повзучості ε_{cc} – відносне зменшення лінійних розмірів навантаженого зразка в часі, викликане дією постійного зовнішнього навантаження.

Для визначення деформацій повзучості застосовують такі ж зразки як при визначенні усадки з врахуванням найбільшої крупності заповнювачів. Зразки виготовляють окремими серіями (3 зразка) і зберігають в нормальних температурно-вологісних умовах.

Випробування повзучості бетону виконують на пневмогідравлічних, пружинно-гідравлічних або пружинних пристроях (рис. 5.7).

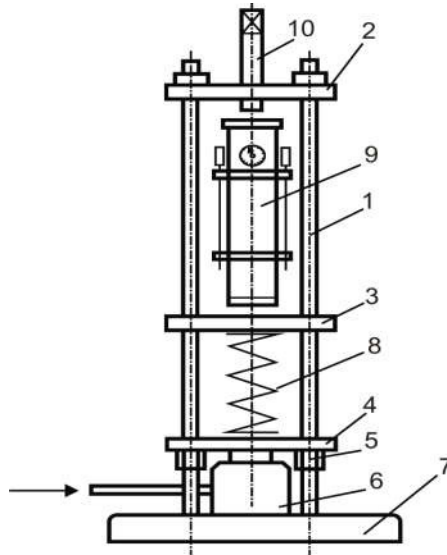


Рис. 5.7. Схема пружинного пристрою для визначення деформацій повзучості:

- 1 – стояки; 2 – верхня траверса; 3 – середня траверса; 4 – нижня траверса; 5 – гайки; 6 – гідравлічний домкрат; 7 – постамент;
- 8 – спіральна пружина; 9 – бетонний зразок; 10 – гвинт

Тривалість випробувань при визначенні деформацій повзучості повинна бути не менше 100 діб.

Відносні деформації повзучості кожного зразка обчислюють за формулою:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_n - \varepsilon_{np} + \varepsilon(t) - \varepsilon_{cs}, \quad (5.14)$$

де ε_n і ε_{np} – середні значення повних і пружних деформацій, визначених при ступінчатому завантаженні;

$\varepsilon(t)$ – середнє значення відносної деформації навантаженого зразка;

ε_{cs} – середнє значення відносної деформації усадки.

За середніми значеннями ε_{cc} , обчисленими за формулою (5.14) будують діаграму в координатах "відносні деформації повзучості – тривалість випробовування, діб" і визначають граничні значення цих деформацій, а також при необхідності відносні деформації повзучості бетону для строків, що перевищують загальну тривалість випробовувань.

Міцність бетону. Мірою міцності є *границя міцності* – максимальне напруження при якому має місце руйнування матеріалу.

Міцність бетону визначають вимірюванням зусиль, що приводять до руйнування спеціально виготовлених, а також вибурених або випиляних із конструкцій зразків при їх навантаженні зі сталою швидкістю. Поряд з прямими методами визначення міцності на зразках бетону застосовують різні методи непрямого визначення його міцності безпосередньо у виробках або конструкціях без їх руйнування.

Величина показника міцності зразків залежить від характеру прикладених зусиль. Найважливішим міцнісним показником бетону є його міцність на стиск. З іншими міцнісними показниками: міцністю при розтягу, зрізі, сколюванні та ін. вона пов'язана кореляційними залежностями.

Класи бетону за міцністю. Статистичний контроль міцності. При проектуванні бетонних і залізобетонних конструкцій залежно від їх призначення встановлюють *класи бетону за міцністю*, тобто їх нормативні показники міцності, задані з певною, як правило 95%, забезпечуваністю. Клас бетону (С) залежить від середньої міцності (R_{cm} , МПа), $C = R_{cm}(1 - tV_{cm})$, де V_{cm} – коефіцієнт варіації міцності бетону; t – коефіцієнт, який характеризує прийняту при проектуванні забезпеченість класу бетону (при зазвичай прийнятій забезпеченості 0,95 $t=1,64$).

Співвідношення між класами легких бетонів і їх марками наведені в табл.5.5.

Таблиця 5.5

Співвідношення між класами і марками легкого бетону по міцності на стиск

Клас бетону по міцності	Найближча марка бетону по міцності	Клас бетону по міцності	Найближча марка бетону по міцності
B 0,35	M 5	C 8/10	M 150
B 0,75	M 10	C 10/12,5	M 150
B 1	M 15	C 12/15	M 200
B 1,5	M 25	C 16/20	M 250
B 2	M 25	C 20/25	M 350
B 2,5	M 35	C 25/30	M 400
B 3,5	M 50	C 28/35	M 450
B 5	M 75	C 32/40	M 550
B 7,5	M 100		

Контрольні зразки для визначення міцності бетону мають встановлену форму і номінальні розміри залежно від методу і виду випробувань (табл. 5.6), максимального розміру крупного заповнювача. За базовий при всіх видах випробувань приймають зразок з розмірами робочого перерізу 150×150 мм.

При найбільшому розмірі фракції заповнювача в пробі бетонної суміші 20 мм найменший розмір зразка (ребро куба, бік поперечного перерізу призми, або вісімки, діаметр і висота циліндра) становить 100 мм; 40 – 150 мм; 80 – 300 мм. Для випробувань конструкційно-теплоізоляційного і теплоізоляційного бетонів із проектною міцністю 7,5 МПа і менше незалежно від найбільшої крупності заповнювача застосовують зразки з найменшим розміром 150 мм.

Мінімальний розмір зразків, що відбираються із конструкцій повинен перевищувати максимальний розмір крупного заповнювача не менше ніж у 2 рази при випробуванні на стиск, і у 3 рази – на розтяг.

Зразки виготовляють і випробують серіями. Кількість зразків у серії – n (крім ніздрюватого бетону), що виготовляють

із бетонної суміші, приймають залежно від середнього внутрісерійного коефіцієнта варіації міцності бетону V_{cm} , який визначається не рідше одного разу на рік на підприємстві.

При $V_{cm} \leq 5$ $n \geq 2$; $V_{cm} = 5 \dots 8$ $n \geq 3$; $V_{cm} > 8$, $n \geq 6$. Для ніздрюватого бетону кількість зразків у серії дорівнює трьом. Середній внутрісерійний коефіцієнт варіації міцності бетону V_{cm} , % обчислюють за результатами випробувань 30 серій зразків бетону одного класу.

Таблиця 5.6

Форма і номінальні розміри зразків для визначення міцності бетону

Показник міцності	Форма зразка	Розміри зразка	
		Параметр розміру	Розмір, мм
Міцність на стиск і на розтяг при розколюванні	Куб	Довжина ребра	100;150;200;300
		Діаметр d	100;150;200;300
	Циліндр	Висота h	2d
Міцність на осьовий розтяг	Призма	Переріз a×a	100×100; 150×150; 200×200
		Висота h	4 a
	Циліндр	Діаметр d	100;150;200;300
		Висота h	2d
Міцність на розтяг при згині та розколюванні	Призма	Переріз a×a	100×100; 150×150; 200×200
		Висота h	4 a

Примітки. 1. Допускається застосовувати зразки й інших розмірів і форми: куби з ребром завдовжки 70 мм; призми розміром (70×70×280) мм; циліндри висотою, що дорівнює відповідному діаметру при визначенні міцності на розтяг при розколюванні, і висотою, що дорівнює від двох до чотирьох діаметрів при визначенні міцності на осьовий розтяг. 2. При визначенні міцності на осьовий розтяг допускається застосування зразків вісімок, на стиск половинок зразків-призм, отриманих після випробувань на розтяг при згині.

Контрольні зразки бетону збірних конструкцій тверднуть в однакових із конструкціями умовах до визначення відпускної або передавальної міцності. Подальше тверднення зразків для визначення міцності бетону в проектному віці, відбувається в нормальних умовах. Зразки бетону для монолітних конструкцій на підприємстві, що виготовляє бетонні суміші, повинні тверднути в нормальних умовах, а на будівельному майданчику – в умовах, однакових із умовами тверднення конструкцій.

Лабораторні зразки, призначені для тверднення в нормальних умовах після виготовлення до розпалублення зберігають у формах, прикритих вологою тканиною або іншим матеріалом, що виключає можливість випаровування з них вологи, у приміщенні з температурою повітря (20 ± 5) °С. При визначенні міцності бетону на стиск зразки розпалублюють не раніше ніж через 24 год. для бетонів з проектною міцністю 10 МПа і вище і не раніше ніж від 48 до 72 год. для бетонів з міцністю 7,5 МПа і нижче, а також для бетонів із добавками, що уповільнюють їх тверднення у ранньому віці. При визначенні міцності бетону на розтяг зразки розпалублюють не раніше ніж через 96 год після їх виготовлення. Після розпалублення зразки поміщають у камеру, що забезпечує нормальні умови тверднення, тобто температуру (20 ± 3) °С і відносну вологість повітря $(95 \pm 5)\%$. У камері нормального тверднення зразки не повинні безпосередньо зрошуватись водою. Допускається зберігання зразків під шаром вологих піску, тирси або інших гігроскопічних матеріалів, що систематично звожуються.

Зразки, які призначені для тверднення в умовах теплової обробки, тверднуть у формах в теплових агрегатах разом з конструкціями, або окремо, згідно з прийнятим на виробництві режимом. Після завершення теплової обробки зразки розпалублюють та випробовують або зберігають у нормальних умовах.

Міцність бетону, МПа, розраховується із точністю до 0,1 МПа при випробуваннях на стиск і до 0,01 МПа при випробуваннях на розтяг для кожного зразка за формулами:

- на стиск
$$R_{cm} = (\alpha \cdot F \cdot k_w) / A; \quad (5.15)$$

- на осьовий розтяг $R_{c,tk} = (\beta \cdot F \cdot k_w) / A$; (5.16)

- на розтяг при розколюванні $R_{c,m} = (\gamma \cdot 2F \cdot k_w) / (\pi \cdot A)$; (5.17)

- на розтяг при згині $R_{c,tl} = (\delta \cdot F \cdot l \cdot k_w) / (a \cdot b^2)$, (5.18)

де F – руйнівне навантаження, Н;

A – площа робочого перерізу зразка, мм²;

a – ширина поперечного перерізу призми, мм (см);

b – висота поперечного перерізу призми, мм;

l – відстань між опорами при випробуваннях зразків-призм на розтяг при згині, мм;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – масштабні коефіцієнти для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базового розміру та форми;

k_w – поправочний коефіцієнт для ніздрюватого бетону, який враховує вологість зразків на момент випробування.

Значення масштабних коефіцієнтів визначають експериментально.

Для ніздрюватого бетону з середньою густиною менше 400 кг/м³ масштабний коефіцієнт α слід приймати рівним 1,0 незалежно від розмірів і форми зразків.

Значення коефіцієнта k_w для ніздрюватого бетону приймають залежно від його вологості W_0 , %: при $W_0=0\%$ – $k_w=0,8$; $W_0=10\%$ – $k_w=1,0$; $W_0=20\%$ – $k_w=1,10$; $W_0 \geq 25\%$ – $k_w=1,15$. При проміжних значеннях вологості бетону значення коефіцієнта k_w визначають лінійною інтерполяцією. Для інших видів бетону значення коефіцієнта k_w дорівнює одиниці.

Для прискореного визначення міцності бетону при твердненні в нормальних умовах застосовують експериментально встановлену градувальну залежність між нею і міцністю зразків, що тверднули при тепловій обробці. Теплову обробку зразків проводять за режимами, приведеними в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Режими теплової обробки зразків бетону для прискороного визначення міцності

Етапи тверднення	Температура, °С	Режим I		Режим II	
		Номінальна тривалість, год	Граничні відхилення, хв	Номінальна тривалість, год	Граничні відхилення, хв
Попередня витримка на повітрі	20±5	2	±15	1	±5
Прогрів у воді	70±2	16	±15	4,5	±5
Охолодження на повітрі до розпалублення	20±5	0,5	±5	0,5	±5
Охолодження на повітрі після розпалублення	20±5	10 19,5	±10	1	±10
Загальна тривалість тверднення	-		±25	7	±15

Градувальну залежність приймають лінійною, типу:

$$R_{cm} = \epsilon_0 + \epsilon_1 R'_{cm}, \quad (5.19)$$

де R'_{cm} – міцність бетону при прискороному твердненні;

ϵ_0 і ϵ_1 – коефіцієнти.

Перехідний коефіцієнт K обчислюють за формулою:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{R_{cm}}{R'_{cm}}, \quad (5.20)$$

де N – число серій зразків при прискороному твердненні і в проектному віці.

При використанні перехідного коефіцієнту міцність бетону в проектному віці знаходять за формулою:

$$R_{cm} = KR'_{cm}. \quad (5.21)$$

Приклад 5.3. На бетонозмішувальному заводі випускають бетон класу C 16/20. Розрахувати коефіцієнт K для переходу

від міцності бетону при прискореному твердненні до міцності при нормальному твердненні.

Для розрахунку коефіцієнту K випробовували 13 паралельних серій контрольних зразків. Середні результати випробувань контрольних зразків по кожній серії приведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Середні результати випробувань контрольних зразків по кожній серії

Номер серії	Міцність бетону, МПа		Відношення R_c/R'_c
	при прискореному твердненні (R'_c)	при нормальному твердненні у віці 28 діб (R_c)	
1	14,8	23,4	1,58
2	14,2	22,6	1,59
3	15,1	25,1	1,66
4	13,6	23,2	1,70
5	15,5	22,6	1,46
6	17,1	29,7	1,74
7	17,7	27,8	1,57
8	17,0	27,9	1,64
9	18,6	27,4	1,47
10	16,4	27,7	1,69
11	19,0	29,1	1,53
12	16,5	25,9	1,60
13	18,1	26,1	1,44

Визначаємо: $\bar{R}_{cm} = 26,0$ МПа.

Підставляючи дані табл. 5.7 у формулу (5.20), отримуємо:

$$K = \frac{1}{13} \left(\frac{23,4}{14,8} + \frac{22,6}{14,2} + \dots + \frac{26,1}{18,1} \right) = 1,59.$$

Неруйнівні методи визначення міцності бетону.

Міцність бетону при застосуванні неруйнівних методів визначають за попередньо встановленими градууювальними залежностями між міцністю зразків на стиск та непрямими характеристиками міцності. Розрізняють механічні та фізичні неруйнівні методи (рис. 5.8). *Механічні методи* базуються на

кореляційних зв'язках між міцністю та іншими механічними характеристиками бетону (твердістю, пружністю, здатністю до пластичних деформацій та ін.), а також зусиллями, що викликають його місцеві руйнування. При *фізичних методах* застосовуються кореляційні зв'язки міцності бетону зі швидкістю розповсюдження в ньому ультразвукових хвиль та деякими іншими фізичними характеристиками (частотою коливань, інтенсивністю гама- опромінювання при проходженні крізь бетон та ін.). Із фізичних методів на практиці застосовується ультразвуковий метод.



Рис. 5.8. Класифікація методів неруйнівного контролю міцності бетону

Градуювальна залежність між міцністю бетону і непрямою характеристикою міцності може мати вигляд графіка, таблиці або формули. При застосуванні методів пружного відскоку, ударного імпульсу, пластичної деформації і відриву градуювальні залежності встановлюють безпосередньо для кожного виду бетону при зміні виду цементу і його витрати більш ніж $\pm 20\%$, крупного заповнювача більше ніж на $\pm 10\%$.

Для методів відриву, відриву зі сколюванням і сколювання ребра допускається встановлювати єдину градувальну залежність, яка корегується при зміні виду та розміру фракції крупного заповнювача, технології ущільнення, умов тверднення, застосуванні добавок.

Градувальну залежність встановлюють на основі результатів випробувань зразків-кубів спочатку неруйнівним методом, а потім за ДСТУ Б В. 2.7 –214: 2009.

При встановленні градувальних залежностей рівняння “непряма характеристика – міцність” приймають лінійним за видом:

$$R'_{cm} = a_0 + a_1 \cdot H \quad (5.22)$$

де R'_{cm} – міцність бетону, МПа;

H – непряма характеристика.

Коефіцієнти a_0 і a_1 розраховуються за формулами:

$$a_0 = R_{cm} - a_1 \cdot \bar{H}; \quad (5.23)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H}) \cdot (R_{cm_i} - \bar{R}_{cm})}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}, \quad (5.24)$$

де: R_{cm_i} – міцність бетону на стиск в окремій серії;

\bar{R}_{cm} – середнє значення міцності при випробуванні всіх серій зразків;

H_i – значення непрямої характеристики міцності для окремої серії;

\bar{H} – середнє значення непрямої характеристики міцності.

Середні значення міцності \bar{R}_{cm} , що визначені шляхом випробування всіх серій зразків і непрямих характеристик \bar{H} , які необхідні для визначення цих коефіцієнтів, розраховують за формулами:

$$\bar{R}_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{cm_i}}{N}, \quad (5.25)$$

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}, \quad (5.26)$$

де N – число серій (або окремих зразків), які використані для побудови градууювальної залежності.

Після побудови градууювальної залежності за формулою (5.22) виконують її коригування шляхом відбракування одиночних результатів випробувань, що не задовольняють умові ($R_{cm_i}^H$):

$$\frac{|R_{cm_i} - R_{cm_i}^H|}{S} \leq 2, \quad (5.27)$$

де S – залишкове середнє квадратичне відхилення, що визначається за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{cm_i} - R'_{cm_i})^2}{N - 2}}, \quad (5.28)$$

де R'_{cm_i} – міцність бетону в i -й серії зразків, що визначена за градууювальною залежністю за формулою:

$$R'_{cm_i} = a_0 + a_1 \cdot H_1. \quad (5.29)$$

Після відбракування градууювальну залежність встановлюють знову за формулами (5.22...5.24) за залишковими результатами випробування.

Градууювальна залежність повинна мати середнє квадратичне відхилення S , що не перевищує 12% при використанні серії зразків або 15% при використанні окремих зразків від середнього значення міцності R_{cm} . Якщо

$\frac{S}{R_{cm}} \times 100\% \geq 12\%(\text{або } 15\%),$ то проведення контролю та

оцінка міцності за отриманою залежністю не допускається.

Приклад. 5.4. Розрахувати градуювальну залежність між швидкістю ультразвуку та міцністю. Міцність бетону класу С20/25 контролювали у конструкції методом наскрізного прозвучування. Для встановлення градуювальної залежності між швидкістю ультразвуку та міцністю було випробувано протягом 5 днів 20 серій зразків-кубів розміром 100×100×100 мм у віці від 4 до 8 год. після теплової обробки.

Результати випробувань наведені в табл. 5.8.

Середнє значення міцності (R_{cm}), МПа, та швидкості ультразвуку (\bar{v}), м/с складає:

$$R_{cm} = \frac{20,6 + 26,0 + \dots + 33,3}{20} = 27,79 ;$$

$$\bar{v} = \frac{4029 + 4371 + \dots + 4436}{20} = 4239,4 .$$

Рівняння залежності між міцністю бетону і швидкістю ультразвуку приймаємо лінійним:

$$R'_{cm} = a_0 + a_1 v . \quad (5.29, a)$$

Визначаємо коефіцієнти a_0 і a_1 за формулами (5.23 та 5.24):

$$a_1 = \frac{(27,79 - 20,6)(4239,4 - 4029) + (27,79 - 26,0)(4239,4 - 4371) + \dots}{(4239,4 - 4029)^2 + (4239,4 - 4371)^2 + \dots + (4239,4 - 4436)^2} =$$

$$= 0,0301 ;$$

$$a_0 = 27,79 - 0,0301 \cdot 4239,4 = -99,92 ;$$

Таким чином градуювальна залежність має вигляд $R'_{cm} = 0,0301v - 99,92$ (5.29,а).

Значення міцності, розраховані за градуювальною залежністю, приведені в табл. 5.9.

Таблиця 5.9

Результати випробувань бетону для встановлення
градуовальної залежності при ультразвуковому контролі
міцності бетону

Номер серії	Швидкість ультра- звуку, v , м/с	Міцність бетону, МПа			$\frac{R_{cm_i} - R'_{cm_i}}{S}$	
		за результатами на стиск, R_{cm_i}	за градуовальною залежністю		до від- бра- кову- вання	після відбра- кову- вання
			до від- бра- кову- вання	після відбра- кову- вання		
1	4029	20,6	21,35	21,26	0,27	0,27
2	4371	26,0	31,65	-	2,02	-
3	4080	22,0	22,89	22,92	0,32	0,37
4	4097	26,3	23,40	23,47	-1,04	-1,14
5	4116	21,1	23,97	23,09	1,03	1,21
6	4137	23,4	24,60	24,77	0,43	0,55
7	4136	26,0	24,57	24,74	-0,51	-0,51
8	4187	26,4	26,11	26,40	-0,10	0
9	4195	29,2	26,35	26,66	-1,02	-1,03
10	4248	25,5	27,94	28,38	0,87	1,16
11	4232	28,5	27,46	27,86	-0,37	-0,26
12	4285	25,0	29,06	29,58	1,45	1,85
13	4267	31,6	28,52	29,00	-1,10	-1,05
14	4037	21,7	21,59	21,52	-0,04	-0,07
15	4316	34,3	30,00	30,59	-1,54	-1,50
16	4352	30,5	31,08	31,76	0,21	0,51
17	4398	36,9	32,46	33,26	-1,59	-1,47
18	4393	34,5	32,31	33,09	-0,78	-0,57
19	4475	33,0	34,78	35,76	0,64	1,11
20	4436	33,3	33,60	34,49	0,11	0,48

Залишкове середнє квадратичне відхилення, яке визначене за формулою (5.28) складає:

$$S = \sqrt{\frac{(20,6 - 21,35)^2 + (26,0 - 31,65)^2 + \dots + (33,3 - 33,6)^2}{18}} = 2,8 \text{ МПа}.$$

Порівнюючи значення фактичної міцності R_{cm_i} в серіях зразків із міцністю R'_{cm_i} , яка визначена за градууювальною залежністю встановлюють, що умова не виконується для серії 2, яка підлягає відбракуванню.

За 19 серіями зразків, які залишилися, розраховують нові значення R'_{cm_i} , \bar{v} і коефіцієнти скоректованої залежності a_0 і a_1 :

$$R'_{ci} = \frac{20,6 + 22,0 + \dots + 33,3}{19} = 27,88 \text{ МПа};$$

$$\bar{v} = \frac{4029 + 4080 + \dots + 4436}{19} = 4232,4 \text{ м/с};$$

$$a_1 = \frac{(27,88 - 20,6)(4232 - 4029) + (27,88 - 22,0)(4232,4 - 4080) + \dots + (4232,4 - 4080)^2 + \dots + (4232,4 - 4436)^2}{(4232,4 - 4029)^2 + \dots} = 0,0325;$$

$$a_0 = 27,88 - 0,0325 \times 4232,4 = -109,68.$$

Визначивши значення R'_{cm_i} розраховують середнє квадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{(20,6 - 21,26)^2 + (22,0 - 22,92)^2 + \dots + (33,3 - 34,49)^2}{17}} = 2,48 \text{ МПа}$$

Для скоригованої градууювальної залежності $\frac{|R_{cm_i} - R'_{cm_i}|}{S} \leq 2\%$ за

усіма серіями зразків. Таким чином, подальше коригування проводити не потрібно і кінцева градууювальна залежність, яку шукають, має вид:

$$R'_{cm_i} = 0,0325v - 109,68. \quad (5.29,б)$$

Графіки градувальних залежностей до і після коригування приведені на рис. 5.9.

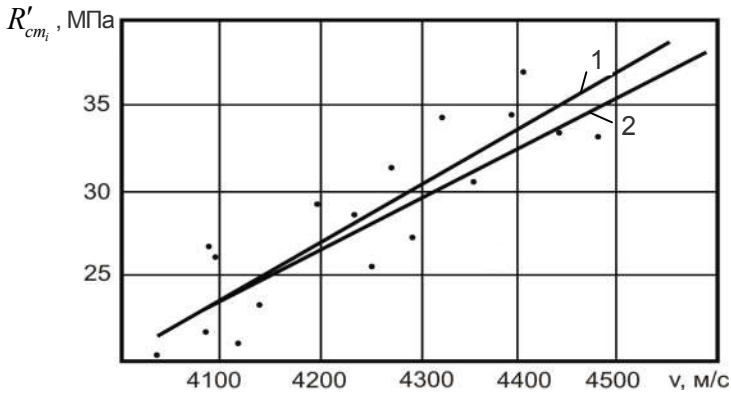


Рис. 5.9. Графіки градувальних залежностей|
1 – градувальна залежність до відбракування;
2 – скорегована градувальна залежність

Модуль пружності. Пружні властивості бетону характеризуються *модулем пружності* – відношенням нормального напруження (σ) до відповідної відносної деформації (ϵ).

Для бетону характерні пружно-пластичні властивості, тому модуль пружності визначають при рівні навантаження, який відповідає ділянці діаграми σ - ϵ , що наближається до лінійної (рис 5.10). Відповідно до ДСТУ Б В.2.7-217:2009 модуль пружності бетону знаходять при рівні навантаження 30% від руйнівного.

Для визначення модуля пружності бетону застосовують зразки призми квадратного перерізу або циліндри з відношенням висоти і ширини (діаметру) рівним 4. За базовий приймають зразок призми розмірами 150×150×600 мм. Можливе також застосування зразків завширшки (діаметром) 70, 100, 200 і 300 мм з врахуванням найбільшої крупності заповнювача.

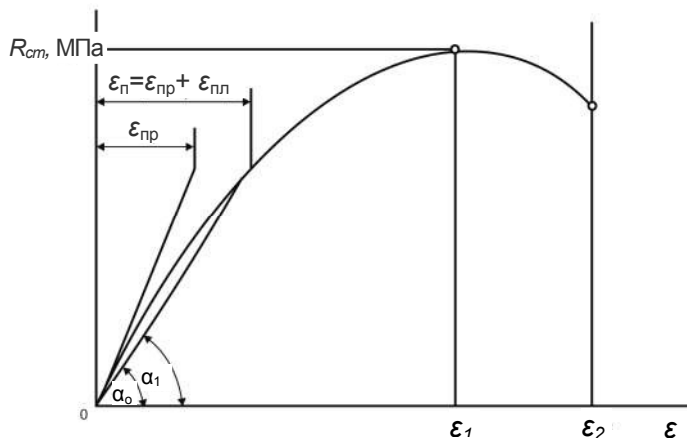


Рис. 5.10. Залежність "напруження-деформація" при стиску бетону:
 $\epsilon_{пр}$ – пружна деформація; $\epsilon_{пл}$ – пластична деформація;
 ϵ_n – повна деформація

Для випробування виготовляють серію з трьох зразків. Зразки до випробування витримують у нормальних температурно-вологісних умовах. Для вимірювання деформацій на бокових поверхнях зразків встановлюють *тензометри* або *тензорезистори*, що дозволяють визначати відносні деформації з точністю не нижче $1 \cdot 10^{-5}$ (рис. 5.11).

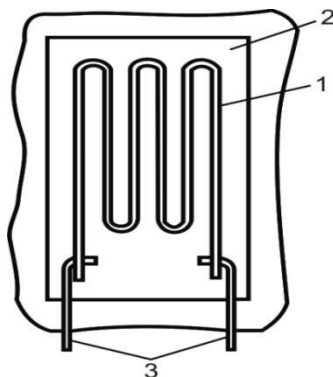


Рис. 5.11. Схема тензорезистора:
1 – тензорешітка; 2 – паперова основа; 3 – провідники для приєднання датчика до вимірювального електромоста

Розрізняють механічні і електричні тензометри. З механічних тензометрів найбільш відомі тензометри ричажного типу. Дія електричних тензометрів базується на застосуванні датчиків, в яких деформації викликають зміну електричних характеристик: опору, індуктивності та ін. Найбільш універсальним тензодатчиком є тензодатчик опору або тензорезистор (рис. 5.11). Він представляє собою декілька петель тонкого (константанового, ніхромового або ін.) дроту, до якого приклеюються смужки основи – паперу, плівки або фольги.

Схема навантаження зразка приведена на рис. 5.12.

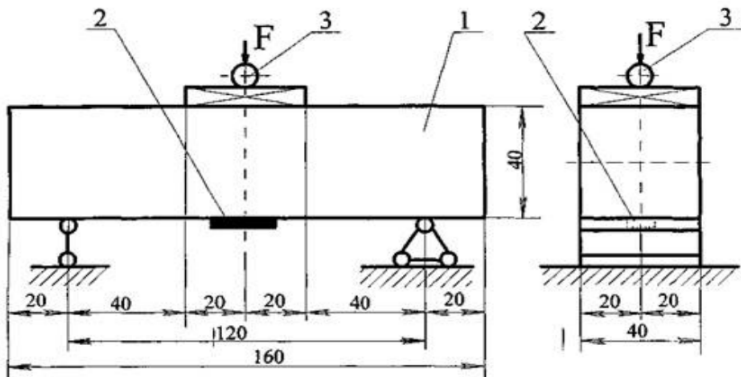


Рис. 5.12. Схема навантаження зразка при визначенні модуля пружності:

1 – зразок бетону; 2 – тензорезистор; 3 – електричний силовимірювач

Модуль пружності E_b розраховують для кожного зразка згідно з отриманою діаграмою «навантаження-деформація» таким чином: до кривої $F-\varepsilon_{bt}$ проводять дотичну в її початковій точці при $F=0$ (рис. 5.13). Дотична відсікає на лінії, що відповідає значенню руйнуючого навантаження F_u відрізок, довжина якого дорівнює пружній складовій граничної відносної деформації розтягу e_{ubr} .

Модуль пружності бетону тісно скорельований із його міцністю. При проектуванні конструкцій для прогнозування модуля пружності бетону при завантаженні його у віці t найбільше застосування мають залежності типу:

$$E_{\sigma} = \frac{E_m R_{\sigma,\tau}}{S + R_{\sigma,\tau}}, \quad (5.29)$$

де $R_{\sigma,\tau}$ – кубикова міцність бетону на стиск при певній тривалості твердіння (τ);

E_m і S – емпіричні константи. У будівельних нормах рекомендуються значення $E_m=52000$; $S=23$.

Європейським комітетом з бетону і нормами деяких країн рекомендується залежність:

$$E_{\sigma} = C(R_{\sigma,\tau})^{\gamma}, \quad (5.30)$$

де $C=1900$; $\gamma=0,5$.

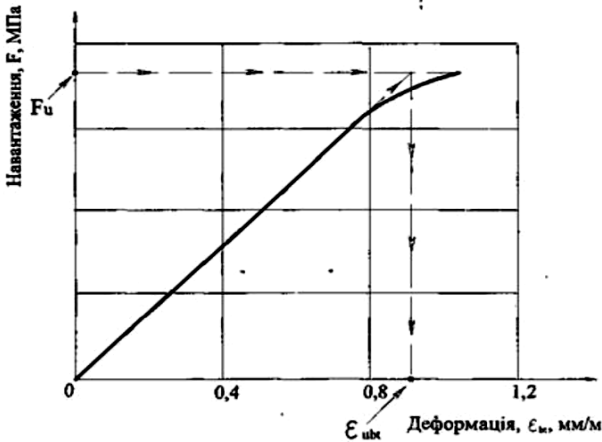


Рис. 5.13. Графік «навантаження-деформація» бетону розглянутої поверхні зразка: F_u – руїнівне навантаження; $\epsilon_{убк}$ – гранично відносна деформація розтягу

Пружні властивості бетону можуть характеризуватися як статичним так і *динамічним модулем пружності* (E_d), що враховує напруження, котрі виникають при коливаннях зразка.

Динамічний модуль пружності найбільш часто визначають резонансним методом на основі вимірювань частоти власних коливань бетонного зразка призматичної або циліндричної форми. Дослідна установка складається з

генератора звукових частот, збудника й приймача механічних коливань. E_{δ} , можна визначити, знаючи частоту власних поздовжніх коливань f_n зразка довжиною l і густиною ρ :

$$E_{\delta} = 0,4l^2 f_n^2 \rho. \quad (5.31)$$

Динамічний модуль пружності може бути визначений також за швидкістю поширення ультразвукового імпульсу (v):

$$E_{\delta} = \frac{\rho v^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}, \quad (5.32)$$

де ρ – густина бетону;

μ – коефіцієнт Пуассона – коефіцієнт поперечної деформації, який розраховують для зразка при рівні навантаження 30% від руйнівного як відношення поперечної до пружної поздовжньої деформації.

З достатньою для практичних цілей точністю можна прийняти:

$$E_{\delta} = KE_{\delta}, \quad (5.33)$$

де $K=0,805\dots 0,837$

Величина E_{δ} пов'язана з міцністю бетону при стиску (R_{cm}) залежністю:

$$E_{\delta} = \frac{4 \cdot 10^3 R_{cm}}{1 + 0,07 R_{cm}}. \quad (5.36)$$

Взаємозв'язок між статистичним і динамічним модулями пружності, а також залежність між E_{δ} і міцністю бетону приведений на рис. 5.14 та 5.15.

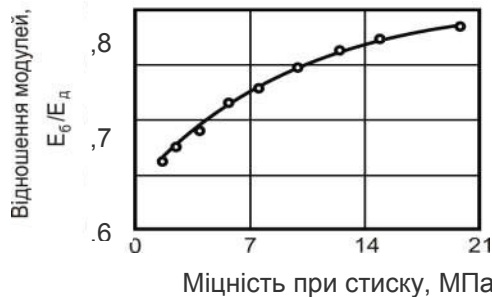


Рис. 5.14. Відношення статичного модуля пружності до динамічного для бетонів різної міцності

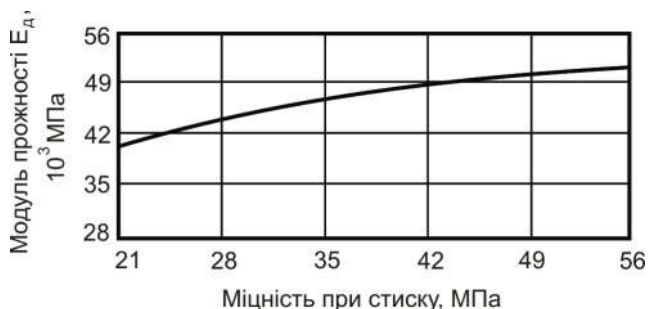


Рис. 5.15. Залежність між динамічним модулем пружності і міцністю бетону при стиску

Морозостійкість. Морозостійкість бетону – це його здатність зберігати міцність та інші фізико-механічні властивості при багатократному заморожуванні та відтаванні у насиченому водою стані. Вона оцінюється *марками за морозостійкістю* (F) – встановленими нормами мінімальним числом циклів заморожування та відтавання зразків, що випробувані за базовими методами, при якому зберігаються у визначених межах початкові фізико-механічні властивості бетону.

Для легких бетонів маркою бетону за морозостійкістю приймають визначену кількість циклів поперемінного заморожування та відтавання водо насичених зразків, при якій міцність бетону на стиск знижується не більше, ніж на 5%, а втрата маси зразків не перевищує 5%. (Для легких бетонів з маркою по морозостійкості не більше F50 і ніздрюватих бетонів допускається зниження міцності на стиск не більше 15%.)

Випробування проводять на зразках-кубах розміром 100мм×100мм×100мм або циліндрах діаметром і заввишки 100 мм при досягненні бетоном проектного значення міцності на стиск. Зразки насичують водою і заморожують при мінус $(18\pm 2)^\circ\text{C}$ протягом $2\pm 0,5$ год. (для ніздрюватих бетонів тривалість одного циклу заморожування і відтавання становить не менше 4 год.).

До прискорених методів визначення морозостійкості застосовують випробування зразків, насичених 5%-ним розчином NaCl при температурах до $(-50...55)^{\circ}\text{C}$. Виконують також визначення морозостійкості бетону вимірюючи за допомогою дилатометрів при температурі $(-18\pm 2)^{\circ}\text{C}$ відносне збільшення різниці об'ємних деформацій бетонного і стандартних зразків (рис. 5.16):

$$\Theta_i = \frac{n_i c}{V_0}, \quad (5.34)$$

де n_i – максимальна різниця деформацій бетонного і стандартного зразків;

c – константа дилатометра;

V_0 – початковий об'єм бетонних зразків, см^3 .

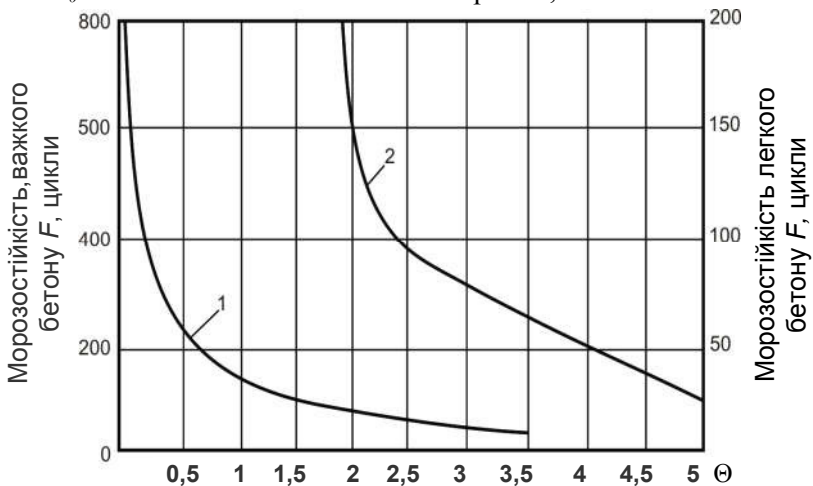


Рис. 5.16. Графік залежності морозостійкості бетону від Θ – максимального відносного збільшення різниці об'ємних деформацій бетонного і стандартного зразків при заморожуванні:

1 – важкого бетону; 2 – легкого бетону

Застосовують також структурно-механічний метод визначення морозостійкості бетону, який базується на її кореляційному зв'язку з капілярною пористістю бетону.

До неруйнівних методів визначення морозостійкості бетону можна віднести *ультразвуковий метод*. За цим методом морозостійкість контролюють за результатами вимірювання часу розповсюдження ультразвуку в зразках у процесі їх поперемінного заморожування та відтавання. З цією метою застосовують спеціальні стенди і прилади, що призначені для вимірювання часу розповсюдження ультразвуку в бетоні.

Марку бетону за морозостійкістю встановлюють за критичним числом циклів заморожування та відтавання, починаючи з якого відбувається різке збільшення часу розповсюдження ультразвуку в зразку, що відповідає початку інтенсивного руйнування матеріалу.

Порівнюючи знайдене критичне число циклів заморожування та відтавання з встановленим в стандарті його контрольним значенням визначають марку бетону за морозостійкістю (табл. 5.10).

Таблиця 5.10

Значення критичного числа циклів заморожування та відтавання для різних марок бетону за морозостійкістю

Метод визначення морозостійкості	Марки бетону за морозостійкістю, F							
	50	100	150	200	300	400	500	1000
Перший базовий	31	63	95	125	190	250	310	625
Другий базовий	-	63	95	125	190	250	310	625
Другий прискорений	-	13	19	28	47	70	95	280

Розроблені також розрахункові методи прогнозування морозостійкості бетону, що базуються на емпіричних рівняннях між числом циклів заморожування та відтавання і структурними критеріями.

Наприклад, запропонований *критерій морозостійкості (KM)*, лінійно пов'язаний із критичним числом циклів:

$$KM = \frac{P_0 - I_t}{I_{-10}}, \quad (5.35)$$

де $P_0 = P_{zn} - P_p$ – відкрита пористість (P_{zn} – загальна пористість; P_p – умовно-замкнута (резервна) пористість);

I_t і I_{-10} – об'ємний вміст льоду при температурі заморожування зразків $t^\circ\text{C}$ і при -10°C .

Рівняння, яке пов'язує число циклів заморожування і відтавання, що витримує бетон без значного зниження міцності (F) і KM , отримане Т. І. Розенберг і О. В. Кунцевичем, має вид:

$$F = 2.04KM - 25. \quad (5.36)$$

Запропонований також інший параметр морозостійкості (C), пов'язаний із льодистістю бетону I_{-10} :

$$C = I_{-10}(B/C)^{1/3}. \quad (5.37)$$

Залежність морозостійкості бетону F від параметра C пропонується у вигляді рівняння

$$F - F_o = I_{-10} / (C - C_o), \quad (5.38)$$

де F_o і C_o – деякі граничні значення параметрів F і C .

Паропроникність. Паропроникність бетону характеризують коефіцієнтом паропроникності μ в $\text{мг}\cdot\text{м}\cdot\text{год}\cdot\text{Па}$ – кількістю водяної пари в міліграмах, котра проходить за одну годину крізь шар матеріалу площею 1 м^2 та завтовшки 1 м при умові, що температура повітря з обох сторін шару однакова, а різниця парціального тиску водяної пари становить 1 Па .

Випробування проводять на трьох зразках-циліндрах діаметром 100 мм заввишки 30 мм . Бокові поверхні кожного зразка вкривають паронепроникним шаром розігрітої суміші парафіну і каніфолі. Три зразки розміщують на решітчасті полиці шафи. На нижній полиці шафи встановлюють чашки з насиченим водним розчином шестиводного азотно-кислого магнію, що підтримує постійну вологість повітря ($54,5\pm 1,0\%$). Один раз за сім діб температуру і відносну вологість повітря в шафі вимірюють аспіраційним психрометром. Чашку з дистильованою водою виймають із металевої обійми і зважують.

За результатами зважування розраховують щільність потоку водяної пари через зразок q , $\text{мг}/(\text{год}\cdot\text{м}^2)$, за формулою:

$$q = \frac{\Delta m}{\Delta \tau S}, \quad (5.39)$$

де Δm – зменшення маси чашки з дистильованою водою за час $\Delta \tau$, мг ;

$\Delta\tau$ – час між двома послідовними зважуваннями, год;

S – площа зразка, м².

Випробування вважається закінченим, якщо значення щільності потоку водяної пари крізь зразок після трьох послідовних зважувань залишаються без зміни або починають зростати. За щільність потоку приймають найменше значення з результатів розрахованих після трьох послідовних зважувань.

Опір паропроникненню шару бетону R , (м²год-Па)/мг, розраховують за формулою:

$$R = \frac{P_1 - P_2}{q} - \frac{\delta_e}{\mu_e}, \quad (5.40)$$

де P_1 – парціальний тиск насичених парів води за температури випробування, що визначають за таблицею 5.11, Па;

P_2 – парціальний тиск парів води над зразком, Па;

μ_e – паропроникність повітря в металевій обоймі із зразком, що дорівнює 1,01 мг/(м год Па);

δ_e – товщина повітряного шару, що дорівнює відстані від рівня води у скляній чашці ЧВ до нижньої грані зразка в обоймі при останньому зважуванні, м.

Таблиця 5.11

Залежність тиску водяної пари від температури

Температура, °С	Тиск, Па	Температура, °С	Тиск, Па
18,0	2063	20,2	2366
18,2	2089	20,4	2395
18,4	2115	20,6	2426
18,6	2142	20,8	2455
18,8	2169	21,0	2486
19,0	2198	21,2	2517
19,2	2225	21,4	2547
19,4	2251	21,6	2579
19,6	2281	21,8	2611
19,8	2309	22,0	2643
20,0	2338		

Величину P_2 розраховують за формулою:

$$P_2 = \frac{\varphi \cdot P_1}{100}. \quad (5.41)$$

де φ – середнє значення відносної вологості повітря у шафі із зразками за останні 7 діб випробування, що визначається за даними гігрографа і аспіраційного психрометра, %.

Коефіцієнт паропроникності бетону кожного зразка μ , мг/(м год Па), розраховують за формулою:

$$\mu = \frac{\delta}{R}, \quad (5.42)$$

де δ – товщина зразка, м;

R – опір паропроникненню, (м² год Па)/мг.

Коефіцієнт паропроникності бетону визначають як середнє арифметичнє значення результатів вимірювань трьох зразків.

Теплопровідність. Мірою теплопровідності є кількість теплоти, яка передається за одиницю часу крізь одиницю його поверхні при градієнті температур в 1 °/м (*коефіцієнт теплопровідності*). Теплопровідність розраховують за формулою, що базується на законі Фур'є.

$$\lambda = \frac{Q\delta}{F\tau\Delta T}, \quad (5.43)$$

де Q – кількість теплоти, Дж;

δ – товщина матеріалу, м;

F – площа перерізу, що перпендикулярна напрямленню теплового потоку, м²;

ΔT – різниця температур, °C; τ – час, с.

Довідкові значення λ для газобетонів приведені в табл. 5.12.

Таблиця 5.12

Теплопровідність газобетонів

Вид бетонів	Марка за середньою густиною	Теплопровідність сухого бетону, Вт/(м·°С)
Теплоізоляційний	D150	0,055
	D250	0,070
	D350	0,090
	D400	0,100
Конструктивно-теплоізоляційний	D450	0,110
	D550	0,130
	D650	0,160
	D750	0,200
	D900	0,240

Для розрахунку орієнтовного значення теплопровідності (Вт/(м·°С)) повітряно-сухих матеріалів (вологість 1...7%) застосовують ряд емпіричних залежностей, наприклад, формулу В. П. Некрасова:

$$\lambda = 1,16\sqrt{0,0196 + 0,22d^2} - 0,16, \quad (5.44)$$

де d – відносна густина.

Розрахункові значення теплопровідності лінійно змінюються зі зміною вологості W :

$$\lambda_w = \lambda_c + \Delta\lambda W, \quad (5.45)$$

де λ_c – теплопровідність сухого матеріалу;

$\Delta\lambda$ – приріст теплопровідності % на кожний процент зміни вологості (для мінеральних матеріалів $\Delta\lambda=0,0023$ при позитивних температурах).

Теплопровідність бетону також лінійно змінюється з підвищенням температури (T):

$$\lambda_T = \lambda_{20} + \epsilon T, \quad (5.46)$$

де $\epsilon=0,0025$ при температурі до 100° С, при температурі вище 100° С значення зростає;

λ_{20} – теплопровідність бетону при 20° С.

З теплопровідністю однозначно пов'язаний *термічний опір* R_T , який характеризує опір матеріалів теплопередачі:

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (5.47)$$

де δ – товщина матеріалу.

Теплопровідність бетонів може визначатись за ДСТУ Б В.2.7 – 41-95 поверхневим перетворювачем або за ДСТУ Б В.2.7-105 при стаціонарному тепловому режимі.

Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем розповсюджується на будівельні матеріали і вироби з теплопровідністю від 0,02 до 1 Вт/(м·К) в інтервалі температур 5...40° С. Метод полягає у створенні теплового імпульсу на поверхні зразка і реєстрації зміни температури на цій поверхні.

Для випробувань застосовують вимірювальний комплекс (рис. 5.17), який складається з:

- первинного перетворювача, призначеного для перетворення імпульсу електричної енергії в теплову та створення електричного сигналу, який характеризує зміну температури поверхні матеріалу під дією теплового імпульсу.

- вторинного вимірювального приладу для реєстрації електричного сигналу;

- імпульсного джерела струму з таймером теплового імпульсу, який забезпечує нагрів пластини первинного перетворювача.

В якості вторинного вимірювального приладу застосовують вольтметр чутливістю не нижче $1 \cdot 10^{-6}$ В з цифродрукуючим автономним або вбудованим пристроєм та таймером.

При проведенні випробувань первинний перетворювач встановлюють на поверхню бетону, яка повинна бути плоскою і забезпечувати необхідний тепловий контакт. Після подачі теплового імпульсу реєструється зміна сигналу пропорційного температурі поверхні досліджуваного матеріалу. Заміри проводять до появи практично однакових значень. Обробка результатів експериментів і розрахунків теплопровідності виконується відповідно до рекомендацій ДСТУ Б В.2.7-41-95.

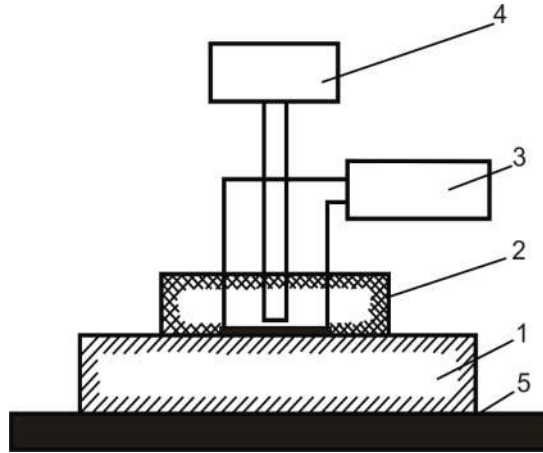


Рис. 5.17. Схема вимірювального комплексу для визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем:
 1 – досліджуваний матеріал; 2 – первинний перетворювач; 3 – вторинний вимірювальний прилад для реєстрації електричного сигналу; 4 – імпульсне джерело струму з таймером теплового імпульсу; 5 – основа

Метод визначення теплопровідності при стаціонарному тепловому режимі полягає у створенні теплового потоку, який проходить крізь плоский зразок певної товщини та направлений перпендикулярно до лицьових (найбільших) граней зразка. Для проведення випробувань застосовують прилади, які мають нагрівач і охолоджувач, а також термомір і датчики температури (рис. 5.18).

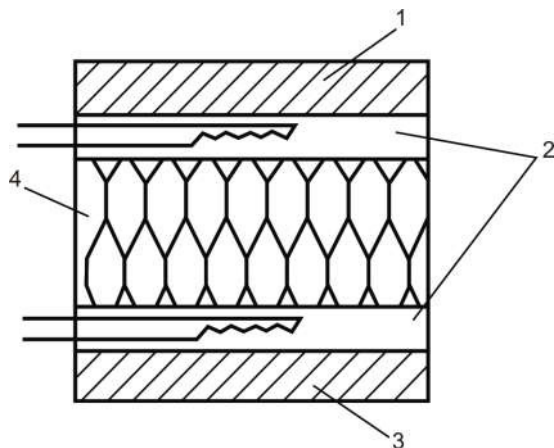


Рис. 5.18. Схема приладу для визначення теплопровідності при стаціонарному тепловому режимі:
1 – нагрівач; 2 – тепломір; 3 – холодильник; 4 – досліджуваний зразок

В процесі випробувань забезпечують різницю температур лицьових граней зразка $10...30^{\circ}\text{C}$. Через кожні 300 с проводять заміри сигналів тепломіра і датчиків температур лицьових граней зразка. Тепловий потік вважається стаціонарним, якщо значення термічного опору зразка відрізняються один від одного менше ніж на 1%. Обробка результатів випробувань виконується згідно ДСТУ Б В.2.7-105.

ЛІТЕРАТУРА

1. Большаков В.И. Производство изделий из ячеистого бетона по резательной технологии / В.И. Большаков, В.А. Мартыненко, В.В. Ястребцов. Днепропетровск: Пороги, 2003. 141 с.
2. Вайсбурд О.М. Полістиролбетон. – К.: Будівельник, 1977. 72 с.
3. Гоц В. І. С. Бетони і будівельні розчини / В.І. Гоц, В.В. Павлюк, П.С. Шилюк. – К.: Основа, 2016. 568 с.
4. Дворкін Л.Й. Бетони спеціального призначення. К.: Видавничий дім "Кондор", 2018. 354 с.
5. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства. К.: Основа, 2007. 613 с.
6. Дворкін Л.Й. Будівельні в'язучі матеріали. К.: Видавничий дім "Кондор", 2019. 628 с.
7. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство. К.: Видавничий дім "Кондор", 2017. 642 с.
8. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство / Л.Й. Дворкін, С.Д. Лаповська. Рівне: НУВГП, 2016. 448 с.
9. Дворкін Л.Й. Теоретичні основи будівельного матеріалознавства. К.: Каравела, 2023. 800 с.
10. Дворкін Л.Й. Використання техногенних продуктів у будівництві / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, К.К. Пушкарьова, М.О. Кочевих, М.А. Мохорт, М.П. Безсмертний. Рівне: НУВГП, 2009. 339 с.
11. Дворкін Л.Й. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.В. Марчук, Ю.О. Степасюк, М.М. Скрипник. Рівне: НУВГП, 2017. 424 с.
12. Дворкін Л.Й. Ефективні гіпсові матеріали / Л.Й. Дворкін, О.М. Гавриш, О.В. Безусяк, А.В. Мироненко, Т.О. Поліщук-Герасимчук, І.В. Ковалик. К.: "СПД Павленко", 2013. 240 с.
13. Дворкін Л.Й. Міцність бетону. Київ: "Кондор", 2021. 312 с.
14. Кривенко П.В. Будівельне матеріалознавство / П.В. Кривенко, К.К. Пушкарьова, В.Б. Барановський та ін. К.: "Екс.Об", 2004. 703 с.

- 15.Кривенко П.В. Цементы и бетоны на основе топливных зол и шлаков / Кривенко П.В., Пушкарева Е.К., Гоц В.И., Ковальчук Г.Ю. К.: КНУСА, 2012. 255 с.
- 16.Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Кочевих М.О. Заповнювачі для бетону. – К.: ФАДА, ЛТД, 2001. 399 с.
- 17.Саницький М.А., Позняк О.Р., Марущак У.Д., Енергозберігаючі технології в будівництві. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. 236 с.
- 18.Ху Шугуан. Легкие бетоны / Ху Шугуан, Ван Фа Чжоу. – АСВ, 2016. 304 с.
- 19.Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Construction materials Based on Industrial Waste Products. Nova Science Publishers, New York, 2016. 242 p.
- 20.Dvorkin L, Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010. 409 p.