

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. С. Ратушняк, І. Н. Дудар, Ю. С. Бікс

**ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ТА РОЗПОДІЛУ
БОКОВОГО ТИСКУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ
ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ ДОРОЖНІХ КАМЕНІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 666.97.03

ББК 38.33

P25

Рецензенти:

О. Л. Дворкін, доктор технічних наук, професор

М. Ф. Друкований, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерством освіти і науки України (протокол № 7 від 26.02.2014 р.)

Ратушняк, Г. С.

P25 Прогнозування міцності та розподілу бокового тиску при виробництві пресованих бетонних дорожніх каменів : монографія / Г. С. Ратушняк, І. Н. Дудар, Ю. С. Бікс – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 120 с.

ISBN 978-966-641-583-0

У монографії висвітлено питання прогнозування міцності та розподілу бокового тиску при виробництві пресованих бетонних виробів з використанням теорії нечіткої логіки та регресійного аналізу. Викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень величини прогнозованої міцності бетонних виробів. На базі апарату нечіткої логіки розроблено програмний модуль, який можна адаптувати до цільової функції шляхом навчання моделі. Матеріал монографії може бути корисним для студентів інженерно-будівельних спеціальностей, аспірантів, інженерних робітників.

УДК 666.97.03

ББК 38.33

ISBN 978-966-641-583-0

© Г. Ратушняк, І. Дудар, Ю. Бікс, 2014

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ТА РОЗПОДІЛУ БОКОВОГО ТИСКУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ.....	8
1.1 Особливості виробництва пресованих бетонних каменів ..	8
1.2 Основні вимоги до технології ущільнення бетонних сумішей при виготовленні бетонних виробів	10
1.2.1 Ущільнення бетонної суміші механічним трамбуванням.....	11
1.2.2 Ущільнення бетонних сумішей вібруванням	12
1.2.3 Ущільнення бетонної суміші вібропресуванням	15
1.3 Розподіл тиску по висоті ущільнюваної суміші при виробництві пресованих бетонних виробів	18
1.4 Методи проектування складу суміші при виробництві бетонних виробів із прогнозованими властивостями	20
1.4.1 Прогнозування характеристик бетонних виробів методами математичного планування експерименту	22
1.4.2 Моделювання прогнозованих характеристик бетонних виробів з використанням лінгвістичних змінних	25
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ	30
2.1 Характеристики матеріалів для експериментальних досліджень.....	30
2.1.1 Радіаційно-гігієнічні характеристики будівельних матеріалів	33
2.2 Теоретичне обґрунтування методології фізичних процесів при формуванні пресованих бетонних виробів	34
2.2.1 Розподіл тиску по висоті виробу при ущільненні бетонної суміші	34
2.2.2 Вплив тиску пресування та густини бетонної суміші на зміну об'єму невидаленого повітря	37
2.2.3 Вплив форми поперечного перерізу прес-форми на коефіцієнт бокового тиску ξ та коефіцієнт тертя по боковій поверхні μ при виготовленні пресованих дорожніх каменів	41
2.3 Методика проведення експериментальних досліджень....	45
2.4 Обладнання для дослідження процесу формування пресованих бетонних виробів	46

3 ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ БЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СУМІШІ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇЇ УЩІЛЬНЕННЯ	50
3.1 Ієрархічна класифікація та формалізація факторів, що впливають на прогнозовану міцність бетонного виробу	50
3.2 Моделювання прогнозованої міцності бетонних виробів із використанням лінгвістичних змінних	53
3.3 Перевірка здатності адаптованої математичної моделі прогнозування міцності бетонного виробу до навчання	57
3.4 Перевірка адекватності математичної моделі прогнозування міцності бетонних виробів методом парних порівнянь Сааті	60
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ У ВИРОБНИЦТВО	65
4.1 Експериментальні дослідження розподілу бокового тиску в ущільнюваній суміші по висоті бетонного виробу	65
4.2 Аналіз результатів досліджень розподілу бокового тиску 69	
4.2.1 Аналіз результатів досліджень розподілу бокового тиску по висоті бетонного виробу для невіброваних сумішей	69
4.2.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень розподілу тиску по висоті бетонного виробу для сумішей з попереднім вібруванням	72
4.3. Чисельно-аналітичні дослідження розподілу бокового тиску по висоті ущільнюваної бетонної суміші	75
4.4 Прогнозування величини бокового тиску в масиві суміші при виробництві пресованих бетонних виробів	87
4.5. Розрахунок економічного ефекту доцільності впровадження методики прогнозування міцності пресованих бетонних виробів у виробництво	92
ВИСНОВКИ	99
ЛІТЕРАТУРА	101
ДОДАТОК А Бази знань математичної моделі прогнозування міцності бетону	112
ДОДАТОК Б Бази знань математичної моделі величини бокового тиску	114
ДОДАТОК В Матриці планування експерименту	116
ДОДАТОК Г Експериментальні дані визначення бокового тиску на рівні сенсора СБ1	119

ВСТУП

Якість бетону визначається сукупністю його будівельно-технічних властивостей. Оперативне управління нею можливе при створенні системи науково обґрунтованих надійних методів прогнозу. Відомі дві групи таких методів: експериментальні та аналітичні [1–3]. За допомогою експериментальних методів властивості бетону встановлюють вже після виготовлення матеріалу. Аналітичні методи дозволяють прогнозувати їх на стадії проектування, враховувати можливі зміни якісних показників кінцевого продукту при зміні властивостей вихідних матеріалів і параметрів технологічних режимів. Це дає можливість підвищити ефективність виробництва за рахунок економії матеріальних і трудових ресурсів, підняти значення наукових основ технології. Розвиток аналітичних методів прогнозу властивостей бетону набуває особливого значення при впровадженні автоматичних систем управління виробництвом за допомогою ЕОМ, коли необхідні конкретні кількісні залежності, що дозволяють розраховувати оптимальні рішення в умовах складної багатofакторної системи [4, 5].

Досягнення бетонознавства і технології бетону дозволяють на теперішній час проектувати бетон, вироби та конструкції із заданими властивостями, а також прогнозувати й управляти його властивостями [1, 3, 4, 6]. Основними критеріями, що висуваються для виробництва бетону, є мінімально можливі строки та якість виготовлення [4, 7, 8]. Потреба в бетоні з різними якісними параметрами з часом не зменшується, однак до його якості висуваються більш жорсткі вимоги.

Актуальність теми. Об'єм та якість виробництва бетону достатньо повно характеризує індустріальний рівень розвитку суспільства [9]. Поширюється масове застосування дрібнорозмірних бетонних елементів з важких бетонів на щільних заповнювачах (гранітний щебінь, гравій, річковий та гірський піски) з вираженою тенденцією до збільшення міцності [10, 11]. В умовах ринкової економіки існує потреба гнучкого реагування на вимоги споживача в бетонах із заданими властивостями, необхідну рецептуру яких важко отримати прискореним шляхом у лабораторії [3]. Тому впровадження експрес-методів прогнозування характеристик бетонних виробів з урахуванням технологічних параметрів ущільнення суміші набувають особливої актуальності [12]. Одним із основних напрямків розв'язання поставлених задач є застосування комп'ютеризованих систем підтримки прийняття рішень, що базуються

на експериментально-статистичних та теоретичних залежностях взаємозв'язку основних вхідних факторів впливу на шукану кінцеву цільову функцію [4, 13, 14]. Ці системи дозволяють враховувати нечіткий характер значень фізико-механічних характеристик заповнювачів суміші та встановлювати зв'язки між ними і прогнозованою міцністю бетонного виробу [15]. Серед сучасних підходів для розв'язання багатокритеріальних задач проектування складів бетону варто відмітити використання математичних методів аналізу [3], апарату нечіткої логіки [16, 17] та генетичних алгоритмів [18–20]. Тому розроблення методу прогнозування міцності та розподілу бокового тиску при виробництві пресованих бетонних дорожніх каменів є актуальною задачею.

Теоретичним підґрунтям для досліджень, що виконані в монографії, є роботи вчених України, СНД та далекого зарубіжжя. Серед науковців з України та СНД це: Й. М. Ахвердов, В. А. Вознесенський, Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, І. Н. Дудар, В. М. Вировий, В. Р. Сердюк, О. В. Ушеров-Маршак, М. Ш. Файнер, В. В. Чистяков, Р. Ф. Рунова, К. К. Пушкарьова, Ю. М. Баженов, Д. В. Лихачов, С. Д. Штовба. Серед найвідоміших робіт далекого зарубіжжя є роботи J. D. Dewar, A. M. Newille, J. Z. Wang, Y. I-Cheng. та інших.

Метою дослідження є розроблення математичних моделей й методів прогнозування міцності та розподілу бокового тиску при виробництві пресованих бетонних виробів.

Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. За результатами аналізу стану досліджень з розроблення й впровадження методів проектування пресованих бетонних виробів ієрархічно класифікувати та формалізувати фактори впливу на прогнозовану міцність та розподіл бокового тиску при ущільненні бетонної суміші.

2. Теоретично дослідити та врахувати виявлені фізико-механічні закономірності механізму ущільнення пресуванням суміші при проектуванні складів бетону та технології виробництва бетонних дорожніх каменів.

3. Розробити експериментальну установку й методику та виконати дослідження закономірностей розподілу тиску по висоті виробу під час ущільнення різних проектних складів бетонних сумішей та сформулювати аналітичні залежності розподілу бокового тиску по висоті бетонних сумішей, опору пресувальному тиску в залежності від водоцементного відношення (В/Ц), вмісту пластифікуючих добавок та тривалості попереднього вібрування при виробництві пресованих дорожніх каменів.

4. Створити експертно-моделювальну систему інтелектуальної підтримки проектування пресованих бетонних виробів з прогнозованими властивостями з використанням теорії нечіткої логіки й лінгвістичних змінних та оцінити адекватність розроблених моделей прогнозування міцності та розподілу бокового тиску при ущільненні бетонної суміші.

5. Провести дослідно-промислове впровадження експертно-моделювальної системи інтелектуальної підтримки проектування пресованих бетонних виробів з прогнозованою міцністю та розподілом бокового тиску при ущільненні суміші та визначити її економічну ефективність.

Прогнозування міцності бетонних виробів та розподілу бокового тиску базується на математичному апараті теорії нечіткої логіки. Дослідження динаміки розподілу бокового тиску при ущільненні бетонних сумішей в установці, розробленій Ю. С. Біксом, виконано з використанням атестованих засобів вимірювальної техніки. При встановленні багатофакторних залежностей для характеру розподілу бокового тиску застосували методи математичного планування експерименту. Визначення фізико-механічних властивостей заповнювачів бетонної суміші (модуль крупності піску, активність цементу, водопоглинання крупного заповнювача, насипна густина мілкового та крупного заповнювачів) здійснювалось за допомогою стандартних методів досліджень. Для обробки експериментальних даних та виведення рівнянь регресії застосовано сучасне програмне забезпечення. Реалізація інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень виконана в комплексі «MATLAB».

В результаті проведення досліджень:

- створено модуль інтелектуальної підтримки прийняття рішень при прогнозуванні міцності бетону у віці до 28 діб, який впроваджено в якості дублювальної системи при проектуванні складу бетонних сумішей в будівельній лабораторії ВАТ «Поділля-залізобетон», м. Вінниця;

- розроблені рекомендації щодо врахування виявленого характеру розподілу бокового тиску для різних складів бетонної суміші при конструюванні інвентарної опалубки для виготовлення бетонних дорожніх каменів;

- розроблений модуль інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо прогнозування міцності бетону забезпечує скорочення тривалості випробовування бетонного зразку на 25 годин для сумішей на портландцементі та 27 годин для сумішей на шлакопортландцементі і пуцолановому цементі.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ТА РОЗПОДІЛУ БОКОВОГО ТИСКУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ

1.1 Особливості виробництва пресованих бетонних каменів

В минулому столітті в багатьох країнах виникла задача влаштування покриттів тротуарів, пішохідних доріжок, майданчиків для громадського транспорту з довговічних матеріалів, зокрема з бетону [10, 27].

В країнах Західної Європи (Німеччина, Італія, Франція та ін.) та Північної Америки (США, Канада) було організовано виробництво тротуарних плит, елементів фігурного мощення, бортових каменів з дрібнозернистого пресованого бетону. Широкому використанню пресованих бетонних виробів сприяли їхня механічна міцність, довговічність, точність геометричних розмірів, можливість перевлаштування обладнання для виробництва виробів інших форм та розмірів [10, 28–30].

Дорожні покриття з дрібнорозмірних бетонних елементів можна експлуатувати відразу після їх укладання, тобто піддавати дії експлуатаційного транспортного навантаження. При цьому відмічається [10, 31, 32], що бетонні елементи дорожнього покриття мають високу міцність та довговічність.

Для бетонних сумішей в стандартах різних країн (США, Німеччина, Нідерланди) висуваються приблизно однакові вимоги, а саме: В/Ц суміші для забезпечення морозостійкості, що призначається залежно від кліматичного району будівництва, а також через умови стійкості до протиморозних солей (наприклад хлоридів) – не більше 0,5, при наявності поверхнево-активних речовин співвідношення цемент/заповнювач коливається в межах 1/3...1/6, всі заповнювачі використовуються лише після ретельного промивання, до складу суміші, окрім піску має входити мілкий гранітний щебінь. Формовочна вологість виробів, що виготовляються методом пресування, має складати 5...7% [10].

Застосування дрібнозернистих сумішей для виробництва виробів з бетону обумовлено технологічними, екологічними, ресурсозберігаючими і фізико-механічними факторами.

Ю. М. Баженов і В. Р. Фалікман [33], аналізуючи сучасні можливості технології бетону відзначають, що з різних видів бетону найбільш помітно в найближчому майбутньому розшириться застосування дрібнозернистого бетону. Дрібнозернистий бетон при правильно підбраному складі характеризується високоякісною структурою і відрізняється високою технологічністю, дозволяючи порівняно просто виготовляти вироби як методом пресування з негайним розпалубленням, так і методом лиття, що особливо зручно для монолітного домобудівництва [34], окрім того, він легко й ефективно модифікується органіномінеральними добавками, забезпечуючи отримання матеріалів з різним комплексом властивостей [35]. Його безперечною перевагою є використання дешевих місцевих пісків, що дозволяє знизити вартість бетону на 15...25 % порівняно з грубозернистими бетонами на щебені. Ця перевага має велике значення для дорожнього будівництва Східної і Західної України, де оцінка запасів будівельних матеріалів показує, що обсяг дрібних і дуже дрібних кварцових пісків становить 85 % від загального обсягу розвіданих родовищ [36].

Хоча застосування особливо жорстких сумішей пов'язане з додатковими витратами енергії на перемішування та вкладання, – формування з них виробів вібропресуванням, особливо дрібноштучних (стінові блоки, черепиця, дорожні вироби), має переваги над виготовленням бетону з пластичних і литих сумішей вібруванням, які полягають в можливості розпалубки виробів одразу ж після формування [37]. Завдяки цьому лінії з вібраційними пресами відрізняються високою продуктивністю [29], а також відпадає необхідність в існуванні парку форм та тривалому дозріванні виробів перед тепловою обробкою [38]. При раціонально підбраному складі бетону та параметрах вібропресування (тиск 50...100 МПа) вироби мають резерв міцності (до 200 МПа) при умові подолання сил відштовхування між частинками цементу [38, 39].

Аналіз причин руйнування бетонів дорожніх покриттів, що виконаний Ю. М. Баженовим, А. В. Волженським, О. А. Гершбергом, М. В. Михайловим, А. В. Саталкіним та іншими дослідниками, показав [40] що одним з основних факторів, що визначає недостатню морозостійкість бетону, є неоднорідність структури бетону та його складових, зокрема відмінності в коефіцієнтах лінійно-температурного розширення крупного заповнювача та розчину [10].

Аналіз вітчизняних та закордонних публікацій [10, 28, 29, 41–44] свідчить про те, що для дорожнього одягу не застосовується великогабаритна бруківка. В той же час існує широкий асортимент форм та типів дрібнорозмірних тротуарних плиток та каменів із підвищеними експлуатаційними властивостями (міцність на стискування, водопоглинання, стиранність, морозостійкість) [10]. Однак при сучасному веденні міської забудови, з урахуванням додаткового навантаження на існуючі мережі та реальним станом комунікацій, досить часто виникає ситуація, коли необхідно швидко відновити, наприклад, гаряче водопостачання. При цьому, як правило, розривається котлован у місці прогнозованого пошкодження, що призводить до додаткового облаштування шару дорожнього одягу після ремонту.

В Україні вироби з дрібнозернистого бетону використовуються для облаштування бордюрного каменю, садово-паркових, пішохідних доріжок, дитячих майданчиків, зупинок громадського транспорту [27, 28, 45].

Досвід західних країн у виробництві дрібноштучних вібропресованих бетонних виробів не може бути застосований в Україні без всебічного аналізу та доопрацювання й розроблення методів прогнозування їх міцності та встановлення закономірностей розподілу тиску в прес-формі при ущільненні суміші пресуванням [27, 30, 46, 47].

1.2 Основні вимоги до технології ущільнення бетонних сумішей при виготовленні бетонних виробів

Сучасний підхід щодо впровадження інноваційних енергоефективних технологій у виробництві бетонних виробів передбачає розроблення та застосування ефективних та енергоощадних прийомів ущільнення бетонної суміші. Кожний з методів ущільнення бетонних сумішей, окрім енергоощадності, повинен забезпечувати виконання таких умов [7, 31, 48–53]:

- 1) зближення на мінімально можливі відстані всіх частинок ущільнюваної бетонної суміші без її розшарування й механічного руйнування зерен заповнювача, що може відбутися при високих тисках пресування суміші;
- 2) збереження у зразка бетонного будівельного виробу, який формується, при наступному твердінні суміші всієї кількості води за твору;

3) застосування складів бетону з витратами цементу, які використовуються для приготування якісних та довговічних бетонних виробів із заданими параметрами, при дотриманні оптимальної технології ущільнення твердих сумішей;

4) реальні можливості використання в'язучих та пластифікаторів для поліпшення властивостей бетонних виробів та вдосконалення технологічного процесу їх виготовлення.

Крім вищенаведених умов необхідно, щоб для кожного виду бетонних сумішей використовувалася відповідна технологія ущільнення. Наприклад, для сумішей із мінімально можливим вмістом води, тобто для важких бетонів, необхідне використання механічного трамбування або вібрування з притисканням [44, 50, 54, 55].

З виробництвом високоякісного цементу почали застосовуватись литі суміші із значним надлишком води [48, 56–58], ущільнення яких відбувається під дією сили ваги піску й гравію (щебеню). Однак застосування таких сумішей обмежене через те, що надлишок води призводить до значного розшарування по висоті будівельного виробу [57, 59, 60]. Також через відокремлення води в процесі седиментації суспензії цементного тіста зчеплення бетону з арматурою різко знижується.

Найпоширеніші в будівельній галузі малопластичні бетонні суміші ущільнюються за допомогою вібрування [39, 61–63]. Це гарантує заповнення форми будь-якої складності й одержання бетонного виробу із заданими проектними властивостями. Середньо- та високопластичні бетонні суміші з метою відділення частини води з укладеної суміші піддають вібровакуумуванню [64–66], а для виробів циліндричної форми використовується центрифугування [7, 12, 50, 67].

Нижче розглянуто особливості розповсюджених способів ущільнення сумішей при виготовленні бетонних виробів з жорстких бетонів.

1.2.1 Ущільнення бетонної суміші механічним трамбуванням

Для механізованого ущільнення жорстких бетонів застосовують механічне трамбування. Ущільнення механічними трамбівками не набуло значного поширення через низьку технологічної ефективність та велику вартість такого устаткування [56]. В результаті досліджень О. А. Гершбергом встановлено, що в процесі трамбування бетонної

суміші ударами трамбівки частинкам надається кінетична енергія, під дією якої зерна і шматки крупного заповнювача переміщуються у напрямку дії сил, занурюються в основну масу бетонної суміші та найщільніше укладаються в ній [1, 68]. Трамбування, на думку цього ж автора, можна умовно розглядати як пресувальний тиск, що миттєво прикладається.

Під час трамбування відбувається примусове переміщення й взаємне зближення твердих компонентів бетонної суміші, що приводить до найбільш компактного розміщення їх у необхідному об'ємі виробу. При цьому відбувається видавлювання вільної води й повітря з середини бетонної суміші [49]. Оптимальний тиск, що миттєво прикладається при трамбуванні, становить 5...15 МПа [7, 30]. Величина прикладеного тиску визначається кількістю води та зерновим складом бетонної суміші. Кращі умови для трамбування або пресування суміші створюються при однаковій гранулометрії й максимальному розмірі зерен до 3 мм [32, 49, 69].

Характерними недоліками трамбування суміші при виготовленні бетонних виробів є:

1. Можливість заклинювання шматків крупного заповнювача з утворенням склепінь в період ще повністю не завершеного ущільнення суміші, особливо для жорстких бетонних сумішей з підвищеним вмістом крупного заповнювача. Це призводить до утворення порожнин або крупних пор, що послаблюють міцність бетонного виробу.

2. Нерівномірність передачі ущільнення по висоті виробу є причиною збільшення терміну технологічного процесу, що не сприяє підвищенню енергоефективності технології виробництва бетонних виробів.

Ущільнення бетонної суміші трамбуванням має обмежене застосування в заводській технології та, головним чином, використовується при виготовленні труб вертикальним формуванням і кілець невеликої довжини.

1.2.2 Ущільнення бетонних сумішей вібруванням

Вібрування як технологічний процес ущільнення бетонної суміші характеризується величинами амплітуди, частоти та інтенсивності коливань [10, 63, 70]. Розповсюдженню цьому способу ущільнення сприяли дослідження властивостей і технології віброваного бетону,

що виконані Й. М. Ахвердовим, Б. В. Гусевим, А. Е. Десовим, В. Г. Довжиком, Е. В. Лавріновичем, О. А. Савіновим, В. І. Сороке-ром, В. Н. Шмігальським, Р. Лермітом, П. Ребю та іншими [39, 48, 53, 55, 68, 70–73]. При вібруванні значно зменшуються сили тертя між частинками заповнювачів бетонної суміші та тертя об стінки прес-форм, збільшується їх рухливість під дією сили тиску. Ефективність сумісної дії вібрації та тиску виражається у великій однорідності роз-поділення густини бетону у виробі та зниження питомого тиску пре-сування в декілька раз.

Вібрування є найпоширенішим методом ущільнення бетонних композитів [1, 7, 12, 39, 58, 74]. Понад 90 % всіх будівельних виробів з бетону й залізобетону виготовляється з використанням цього методу ущільнення бетонної суміші [30]. Це пояснюється тим, що в процесі вібраційного впливу на бетонні суміші створюються сприятливі умови тиксотропного розрідження та найбільш компактного розміщення ча-стинок заповнювачів [48, 66, 75].

Дослідники фізичної сутності вібраційного процесу ущільнення, вважають, що при вібруванні зменшується вплив сил тертя й зчеплен-ня, які діють на суміжні частинки бетонної суміші [7, 63, 68]. Сила ва-ги сприяє ущільненню, а сили тертя й зчеплення перешкоджають цьо-му процесу. Як вважає А. Е. Десов [38, 55], ефект вібрування залежить від в'язкості середовища, форми, розміру і характеру поверхні части-нок, кількості твердої фази, а головне – від значення й частоти імпу-льсів, що передаються частинками бетонній суміші. В результаті дії вібрації у бетонній суміші частинки коливаються близько середнього напрямку руху [38, 76]. Бетонна суміш під дією коливальних імпуль-сів переходить зі стану аморфного тіла в стан «важкої рідини» [53, 77, 79]. У розрідженій бетонній суміші частинки перемішуються під дією сили ваги й на поверхні виділяється повітря у вигляді бульбашок. Стан тимчасової текучості розчину й бетонної суміші досліджувався П. А. Ребіндером, Н. В. Михайловим, П. Ф. Овчинниковим, Н. Б. Ур'євим [52, 79, 80].

Процес ущільнення бетонної суміші вібруванням умовно поділя-ють на декілька стадій. О.А. Савінов поділяє цей процес на три стадії [39]: на першій відбувається перекомпонування складових, на другій – з'являються оболонки й рідка фаза на поверхні великого заповнювача, на третій – компресійне стискування бетонної суміші. Б. В. Гусев

стверджує [48], що для рухомих бетонних сумішей необхідна низько-частотна та високоамплітудна вібрація, а для жорстких сумішей – високочастотна й низько амплітудна. Порушення цих рекомендацій призводить до зниження щільності, підвищення пористості, особливо відкритої, водопоглинання, а значить погіршення довговічності бетонних будівельних виробів. При вібраційній технології ущільнення цементобетонних сумішей загальна пористість зразків знаходиться в інтервалі 23...28 %, що менше, ніж у бетонів, ущільнених за литою технологією в 1,5–1,7 рази [30].

Деякі автори [75, 81], у зв'язку з уявленням про бетон як про композиційний матеріал з певними макро- та мікроособливостями, вважають за доцільне умовно поділити процес ущільнення на дві стадії; перша – перекомпонування великих складових(щебенів) і утворення мікроструктури; друга – більш глибокі тиксотропні зміни у дрібнодисперсній (цементній) системі й формування мікроструктури. На першій стадії рекомендуються коливання низької частоти з великою амплітудою переміщення для подолання сили зчеплення й сухого тертя неущільнених частинок бетонної суміші. На цій стадії ущільнення необхідні амплітуди 1...5 мм та інтенсивність за прискоренням 1,5...3,5g для подолання граничної напруги зсуву залежно від властивостей середовища й розмірів великого заповнювача. На другій стадії при протіканні інтенсивних значних тиксотропічних змінах відбувається додаткове ущільнення. Для розрідження розчинної складової суміші доцільні підвищені частоти коливання або введення пластифікуючих добавок [33, 82, 83]. Перша стадія протікає швидше при низьких частотах та більших амплітудах, а для середніх (50 Гц) і підвищених частот на процес ущільнення бетонної суміші більше впливає тиксотропне розрідження.

В роботі [70] технологічні параметри віброущільнення пропонується вибирати за умови досягнення компактного впакування дрібних частинок бетонної суміші. Вважається [48], що при віброущільненні, в основному, необхідно створити умови для переміщення крупних зерен заповнювача. Для більш дрібних частинок цей режим вібрування буде служити вторинним джерелом коливань, що сприяють більш щільному їх впакуванню в бетонній суміші. В дослідженнях [63, 80] стверджується, що ущільнення бетонної суміші повинне починатися з великого заповнювача. Шляхом змін частоти й амплітуди віброущіль-

нення відбувається укладання дрібних фракцій, які при відповідних переміщеннях розташовуються в проміжках між великими зернами.

Одним із шляхів удосконалення технології віброуцільнення бетонної суміші є використання високочастотних вібрацій [63, 84]. Застосування високочастотної вібрації при ущільненні бетонної суміші відображається на зміні міцності цементного каменю. Фізико-хімічні процеси, які виникають в бетонній суміші при високочастотному вібруванні, сприяють підвищенню міцнісних характеристик бетонного виробу в 1,3–1,35 рази [58, 72].

Ультразвукове вібрування сприяє прискоренню процесу розчинення твердих частинок, оскільки при виникненні стоячих хвиль порушуються адсорбційний і дифузійний шари, а кавітаційні явища викликають утворення в кристалах великої кількості мікротріщин, що сприяють руйнуванню й розчиненню речовини [63]. При глибинному поверхневому ультразвуковому вібруванні цементного гелю формуються різні за фізико-механічними властивостями структури цементного каменю [85]. При обробленні цементного гелю глибинним ультразвуковим вібратором приріст об'ємної маси виробу цементного каменю досягає 9,5 %, а міцність бетону може зрости майже вдвічі [63].

Відомий спосіб віброуцільнення розігрітої бетонної суміші [70]. В результаті скорочується тривалість індукційного періоду й формується більш впорядкована кристалогідратна структура цементного каменю [77, 68], а також прискорюється процес структуроутворення бетону, без зміни складу продуктів гідратації. У зв'язку з неможливістю завжди реалізувати приховані енергетичні властивості гарячої бетонної суміші, міцність бетонних зразків з неї в певних випадках виявляється нижче, ніж у зразків отриманих з нерозігрітої суміші [7, 70].

Недоліками віброуцільнення є: високий вміст води; відкрита пористість; тривалість процесу формування та виготовлення; необхідність використання великої кількості форм при виготовленні бетонних виробів.

1.2.3 Ущільнення бетонної суміші вібропресуванням

Фізико-механічні властивості будівельних виробів з вібропресованого бетону або віброваного бетону з притиском визначаються щільністю структури цементного каменю, складом, величиною й міцністю зерен заповнювача [39, 65]. При пресуванні тиск підбирають за умови, щоб між зернами заповнювача не виникали безпосередні контакти, що

призводять до їхнього роздроблення, а внаслідок чого – до зниження міцності бетону. Максимальне використання ефекту від вібропресування може бути забезпечено оптимальною відповідністю між міцністю та деформативністю цементного каменю й зерен заповнювача. Результати експериментальних дослідів [86] підтверджують, що процес тверднення вібропресованих бетонів відбувається швидше. Причиною є підвищення рівня насиченості рідкої фази новоутвореннями та можливе модифікування цементного каменю тиском.

Ефект віброущільнення залежить від частоти коливань та амплітуди. Найбільш достовірним критерієм ефективності вібрування є показник інтенсивності вібрування. Інтенсивність вібрації характеризує потік енергії, що проходить в одиницю часу через одиницю площі бетонної суміші, що вібрується [7].

Для ущільнення бетонної суміші вібропресуванням без руйнування зерен заповнювача необхідно, щоб цементний гель займав більший обсяг, ніж це потрібно для звичайного бетону щільної структури. Зміна обсягу цементного гелю залежить від оптимальної порожнинності суміші заповнювачів, їхньої сумарної поверхні, механічних, деформативних властивостей, а також від тиску, що пресує. Найбільший приріст міцності досягається при $P = 20$ МПа [30, 31], а з подальшим збільшенням тиску міцність збільшується порівняно повільно. Вібропресування бетонної суміші при тисках до 20 МПа застосовують головним чином при виготовленні малогабаритних будівельних виробів [10, 27, 28].

При вібропресуванні укладена в форму і рівномірно ущільнена вібрацією бетонна суміш піддається пресуванню тиском, який забезпечує подальше примусове ущільнення в результаті витискування або зменшення в об'ємі залученого в суміш повітря (40...45 % в жорстких та знижується до 10...15 % в пластичних сумішах [42, 59, 87]) та відтисканням з неї частини вільної води. Задачею ущільнення є також видалення повітря для отримання будівельного виробу з міцною морозостійкою та водонепроникною структурою. Ефективність ущільнення оцінюється коефіцієнтом ущільнення – співвідношенням фактичної середньої густини свіжоукладеного бетону до величини, що отримана при розрахунку проектного складу бетону. Зв'язок між ступенем ущільнення віброваної бетонної суміші та міцністю на стиск відносно невіброваної наведено на рис. 1.1 [7].

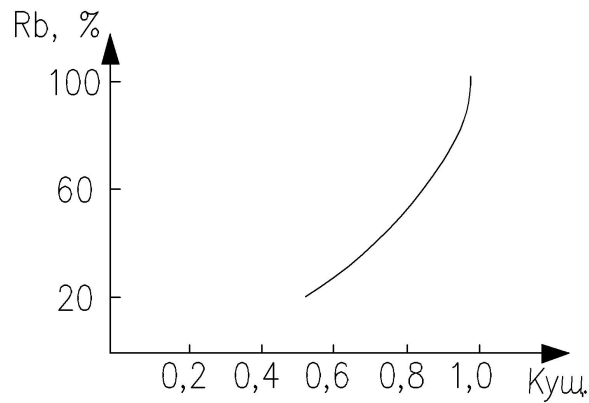


Рисунок 1.1 – Вплив відносного ступеня ущільнення ($K_{уц}$) бетонної суміші на відносну міцність R_b бетону при стиску

Збільшення густини суміші на 1 % збільшує міцність бетону приблизно на 5 % [87]. Вібрування бетонної суміші повинне передувати пресуванню, оскільки її сумісна дія з привантаженням викликає підвищення внутрішнього тертя в стиснутій бетонній суміші, перешкоджає та фактично зводить нанівець ефект віброущільнення. Ефект її полягає не тільки в ущільненні, а також в рівномірному розподілі бетонної суміші й у віброактивації цементного тіста. Дослідженнями [88] показано, що міцність зразків із віброактивованого цементного тіста більше міцності аналогічних відпресованих при тому ж тиску.

Загальна деформація вібропресованого бетону складається з незворотних – зближення зерен заповнювача, витіснення води, та деяких зворотних – зменшення об'єму повітряних пор, процесів. Тому досягнутий стиснений стан суміші повинен зберігатися у відпресованому виробі протягом деякого часу, необхідного для досягнення бетоном міцності, що дозволяє фіксувати досягнутий ступінь ущільнення [89].

Вібропресування застосовується для формування багатьох бетонних виробів, зокрема, для виробництва тротуарних та дорожніх плит, при виготовленні напірних залізобетонних труб методом віброгідропресування та інших виробів із жорстких, в основному, дрібнозернистих сумішей [31, 67].

Ефективним способом одержання надміцних бетонів і економії цементу є тривале об'ємне пресування бетонної суміші. Як показано в [90], в результаті тривалого двох-трьохдобового пресування міцність бетону при стискуванні збільшується на 60...140 % і може досягати 100...150 МПа. Це дозволяє економити до 35 % цементу. Найбільший

ефект тривалого пресування досягається при застосуванні тиску 5...15 МПа під час тужавлення цементу. В результаті відтискання води водоцементне відношення тривало пресованих бетонів досягає 0,18...0,20 [30].

1.3 Розподіл тиску по висоті ущільнюваної суміші при виробництві пресованих бетонних виробів

Закономірності розподілу тиску по висоті ущільнюваної суміші бетонного виробу вивчені недостатньо [12]. Дослідження цих закономірностей дозволяє оцінити передачу тиску на стінки форми та штампів розподілення тисків по товщині ущільнюваної суміші, а, відповідно, густину та міцність бетонного виробу [21].

Динаміка ущільнення цементного тіста в умовах пресування і технологічні особливості способів ущільнення бетонної суміші з відтисненням води розглянуті проф. Й. М. Ахвердовим [68]. Ним встановлені закономірності (рис.1.2) стискувальності цементного тіста і впливу тиску, $(V/C)_{зал}$ – $(V/C)_{зал}$.

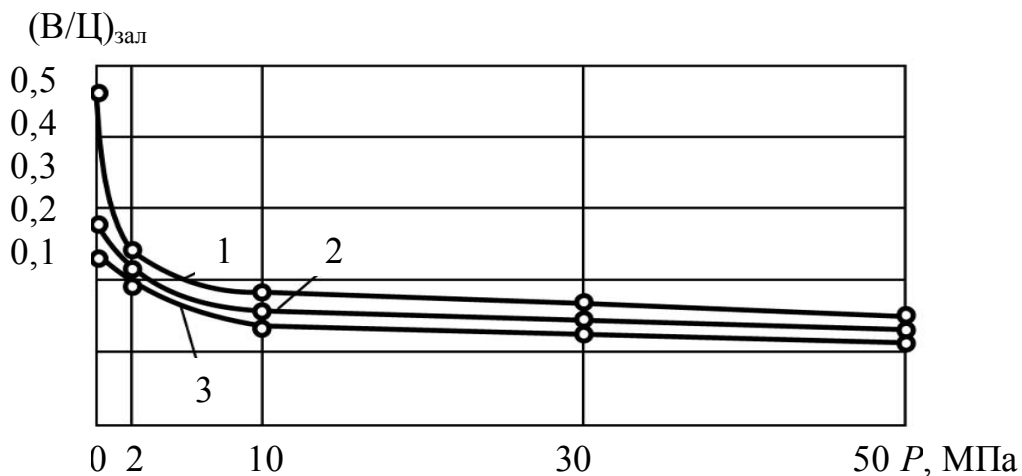


Рисунок 1.2 – Вплив тиску пресування (P) на $(V/C)_{зал}$ цементного гелю: 1, 2, 3 відповідають $(V/C)_{поч}$, рівному $1,65 K_{н.г.}$, $1 K_{н.г.}$ і $0,876 K_{н.г.}$.

Він стверджує, що максимальне зближення цементних часток має місце при $X = (V/C)_{поч} / K_{н.г.} = 0,876$, де $K_{н.г.}$ – коефіцієнт нормальної густини цементного тіста. Між $(V/C)_{зал}$ і пресувальним тиском (див. рис. 1.2) існує така ж функціональна залежність, як між зусил-

лям і деформаціями в реальних твердих тілах. Ущільнене під тиском цементне тісто при $(V/\Omega)_{\text{зал}}$ менше $0,876 K_{н.г}$ не виявляє зворотних тискотропних властивостей у результаті різкого зростання сил взаємодії між частками. В міру зменшення вмісту води замішування все більше негативно на щільності і міцності цементного каменю позначається вплив пружної післядії після зняття зовнішнього тиску. Інтенсивне зростання міцності цементного каменю відбувається до пресувального

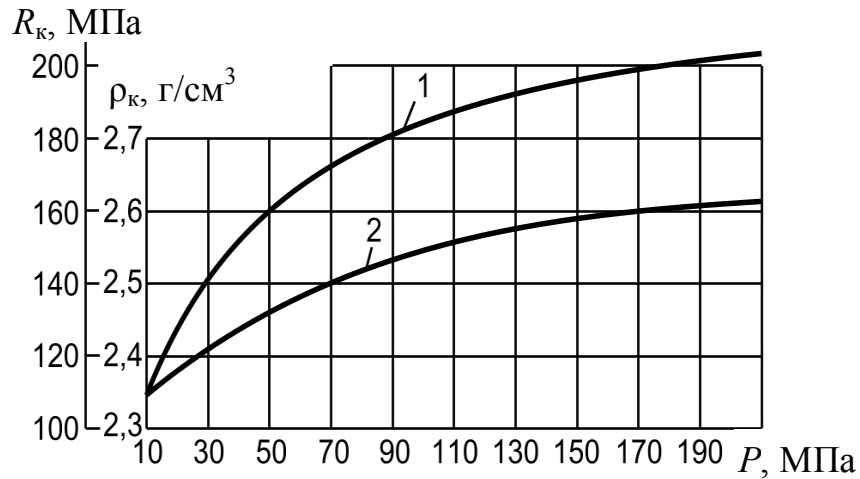


Рисунок 1.3 – Залежність міцності (1) і густини (2) цементного каменю від тиску пресування (P)

тиску 100 МПа [30], на практиці тиск пресування звичайно не перевищує 10...15 МПа (рис. 1.3).

За даними проф. Й. М. Ахвердова [68], розглядаючи цементний гель як рідину, що стискається у відповідності до закону Пуазейля для адіабатичних явищ, можна визначити характер розподілу тиску в цементному гелі по висоті шару, що ущільнюється h :

$$P_h = P \cdot \exp\left(-\frac{\xi f_2}{\alpha_x} \ln h\right), \quad (1.1)$$

де P_h – тиск в масиві бетонної суміші на глибині h ; P – тиск пресування на поверхні бетонної суміші; ξ – коефіцієнт бокового тиску бетонної суміші; f_2 – коефіцієнт внутрішнього тертя бетонної суміші; α_x – коефіцієнт форми поперечного перерізу прес-форми.

Приймаючи за початок координат точку на поверхні цементного геля, що знаходиться у прес-формі, та направляючи вісь униз, отримано співвідношення [68] розподілу тиску по висоті суміші (рис. 1.4)

для інтервалу висот 0,05, 0,1, 0,15 та 0,2 м, де P_0 – тиск привантаження на поверхні суміші.

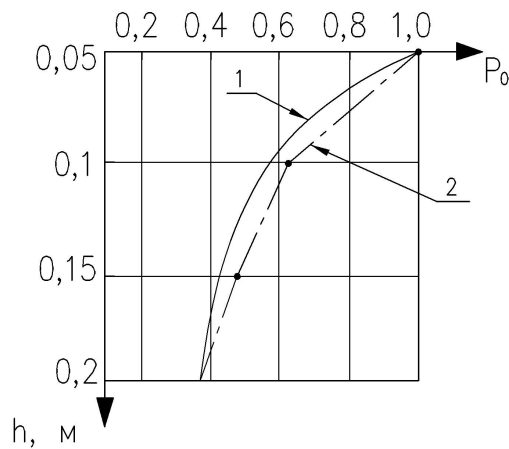


Рисунок 1.4 – Розподіл тиску пресування по висоті цементного гелю, що ущільнюється: 1 – теоретична крива, 2 – крива, побудована за експериментальними даними

Параметри формули 1.1 свідчать, що залишається нез’ясованим вплив пластифікуючих добавок, фракції заповнювача та віброущільнення на розподіл тиску в масиві ущільнюваної бетонної суміші. Для з’ясування впливу на характер розподілу нормального та виникаючого бокового тиску в масиві бетонної суміші по висоті зазначених факторів необхідно провести експериментальне визначення їх впливу на дослідній установці.

Аналіз рис. 1.4 свідчить про достатню апроксимацію фізичного процесу пресування бетонної суміші формулою (1.2), але не в повній мірі враховує тип суміші, вплив режиму пресування та вміст пластифікаторів.

1.4 Методи проектування складу суміші при виробництві бетонних виробів із прогнозованими властивостями

Основна складність проектування складу бетонної суміші полягає в тому, що характеристики компонентів бетонної суміші та бетону, що відповідають задовільній якості, мають нечіткий характер, тобто знаходяться в певних діапазонах значень [4, 20]. Встановлення зв’язків між параметрами готового виробу (бетону) або прогнозування його якості є складною проблемою [2–4, 13, 91] та потребує застосування

нових підходів, що базуються на сучасних інформаційних, програмних та комп'ютерних технологіях [4, 13, 16, 19, 92]. Найбільш відповідальним етапом підготовчої фази та всього технологічного процесу виготовлення бетонних виробів є проектування складу бетонної суміші. Проектування складу бетонної суміші передбачає розрахунок кількісного складу бетонної суміші, планування випробувань, виготовлення дослідних зразків та їхнє випробовування. Можна виділити чотири основних методики проектування бетонної суміші [4]:

- 1) розрахунково-експериментальний (технологічний) метод визначення складу бетону;
- 2) прискорений метод призначення складу бетону за оцінкою якості цементу;
- 3) проектування складу за таблицями, графіками і номограмами;
- 4) проектування складу бетону із застосуванням математико-статистичних методів.

Розрахунково-експериментальний метод є широко використовуваним при проектування бетонних сумішей на виробництві, його ще називають технологічним методом [93, 94]. Основною умовою його застосування є наявність достовірних даних про активність цементу та якості заповнювачів бетонної суміші.

Прискорений метод визначення складу бетонної суміші [93] використовується у тому випадку, коли відсутні дані про активність цементу та якості заповнювачів. Для прискореної оцінки якості цементу в бетоні та одночасного призначення складу бетону потрібної марки використовується залежність міцності бетону (R_6) від водоцементного відношення (В/Ц).

Проектування складу бетону по таблицям, графікам і номограмам виконується таким чином. Спочатку визначають В/Ц з урахуванням коефіцієнта, що залежить від потрібної рухливості або жорсткості бетонної суміші, модуля крупності піску, нормальної густини цементного тіста, крупності щебеню (гравію), В/Ц. Витрата води визначається за графіками, що ґрунтуються на закономірності постійної водопотреби у рівнорухомих бетонних сумішах.

Проектування складу бетонної суміші із застосуванням математико-статистичних методів відбувається одночасно з плануванням експериментів [3, 95–97]. Його рекомендується здійснювати при використанні на виробництві декількох складів бетону за маркою та за рухо-

містю (жорсткістю) бетонної суміші; при побудові залежностей, що необхідні для коригування складу бетону в процесі його приготування, при організації виробництва виробів за новою технологією, а також у випадку використання автоматичних систем управління технологічним процесом [2, 6, 9, 75]

При використанні цієї методики встановлюється математичні залежності між заданими властивостями бетону та витратою і властивостями складових матеріалів. Отримана математична залежність використовується для призначення та пошуку оптимальних складів бетонних сумішей.

1.4.1 Прогнозування характеристик бетонних виробів методами математичного планування експерименту

Методи математичного планування експерименту дозволяють, одночасно виконуючи варіювання кількома значеннями незалежних змінних за спеціальними матрицями, з кодованими значеннями факторів, а також з використанням експериментальних і розрахункових даних, отримати математичну модель прогнозованої міцності бетонних виробів [3, 14, 97].

Взаємозв'язок між натуральними X_i та кодованими значеннями фактора x_i , що впливають на прогнозовану міцність бетонної суміші, визначають таким чином [5]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (1.2)$$

де X_{i0} – натуральне значення фактора на нульовому (основному) рівні; ΔX_i – крок (інтервал) варіювання фактора.

При дослідженні лінійних та неповних квадратичних залежностей найчастіше використовують повний факторний експеримент (ПФЕ). При проведенні ПФЕ планування здійснюється на двох рівнях – верхньому (+1) та нижньому (-1). Цей план дозволяє реалізувати всі варіанти дослідів, які не повторюються на вказаних рівнях, для різної кількості факторів. При цьому кількість дослідів N_l залежить від кількості факторів k і дорівнює 2^k . Наприклад, для двох факторів: $2^2 = 4$, для трьох – $2^3 = 8$, для чотирьох – $2^4 = 16$, для п'яти – $2^5 = 32$. Схему побудови матриць ПФЕ для числа факторів k від 2 до 5 наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення параметрів розрахунку рівнянь регресії Т1...Т6 в залежності від кількості факторів експерименту [5]

Число факторів	Тип плану	Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т6
2	Двофакторний	0,2632	0,1579	0,1667	0,5	-0,1053	0,25
3	Трифакторний	0,1832	0,0704	0,1	0,5	-0,1268	0,125
4	В4	0,2292	0,0625	0,0556	0,5	-0,1042	0,0625
5	На5	0,138	0,0303	0,0556	0,5	-0,0909	0,0625

Результати експериментів обробляють з використанням методів математичної статистики, отримуючи таким чином залежність між вихідними параметрами та факторами, що на них впливають, у вигляді лінійних та неповних квадратичних рівнянь регресії [98]. В загальному вигляді для k факторів рівняння регресії має вигляд

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j. \quad (1.3)$$

Вільний член рівняння (1.3) визначають за формулою

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} y_u}{N_1}, \quad (1.4)$$

де N_1 – число точок плану; y_u – експериментальні значення вихідного параметра в точках плану.

Коефіцієнти для лінійних членів рівняння (1.4) визначають за формулою

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} x_{iu} y_u}{N_1}, \quad (1.5)$$

де x_{iu} – значення i -го фактору в рядку матриці в u -му досліді.

Коефіцієнти парних взаємодій між факторами визначають за залежністю

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} x_{iu} x_{ju} y_u}{N_1}, \quad (1.6)$$

де x_{ju} – значення j -го фактору в u -му експерименті.

При вивченні нелінійних залежностей в широкому діапазоні зміни факторів слід використовувати плани другого порядку. Для планів другого порядку кожний фактор необхідно планувати не менше ніж на трьох рівнях: верхньому (+1), середньому (0) та нижньому (-1). Плани повних квадратичних залежностей отримують шляхом додавання до ядра (ПФЕ) додаткових, так званих «зіркових» точок, а, в деяких випадках, і нульових у відповідності до інтервалу варіювання. У практиці експериментальних досліджень технології бетону найчастіше використовують дво-, три-, чотири- (В4) та п'ятифакторні (На5) плани (див. табл. 1.1).

Результати експериментів оброблюють за допомогою методів математичної статистики, отримуючи квадратичні рівняння регресії в загальному вигляді для k факторів:

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j. \quad (1.7)$$

Для цих планів коефіцієнти b_0 , b_i , b_{ii} , b_{ij} рівнянь регресії (1.7) відповідно, розраховують за формулами:

$$b_0 = T_1(O_y) - T_2 \sum_{i=1}^k (i i y); \quad (1.8)$$

$$b_i = T_3(i y); \quad (1.9)$$

$$b_{ii} = T_4(i i y) + T_5 \sum_{i=1}^k (i i y) - T_2(O_y); \quad (1.10)$$

$$b_{ij} = T_6(i j y), \quad (1.11)$$

де $T_1 \dots T_6$ – параметри для розрахунку рівнянь регресії (див. табл. 1.1) [5].

Недоліком методу планування експерименту є громіздкість врахування кількості вхідних параметрів моделі ($x > 10$), відсутність процесу навчання моделей, неможливість імплементації експертних знань для удосконалення моделі прогнозованої міцності бетону, неповне врахування кількісних та якісних факторів впливу на прогнозовану міцність бетонної суміші для виготовлення бетонних виробів.

1.4.2 Моделювання прогнозованих характеристик бетонних виробів з використанням лінгвістичних змінних

В процесі моделювання складів бетонних сумішей має місце велика кількість невизначеностей та нечіткостей у вхідних даних на проектування [3, 4]. Відповідно до структурної схеми «сірої скриньки» (рис. 1.5), основними факторами впливу на прогнозовану міцність бетонного виробу є параметри в'язучого, заповнювачів (піску, щебеню, хімічних добавок тощо) та технологічні параметри виготовлення бетонних виробів.

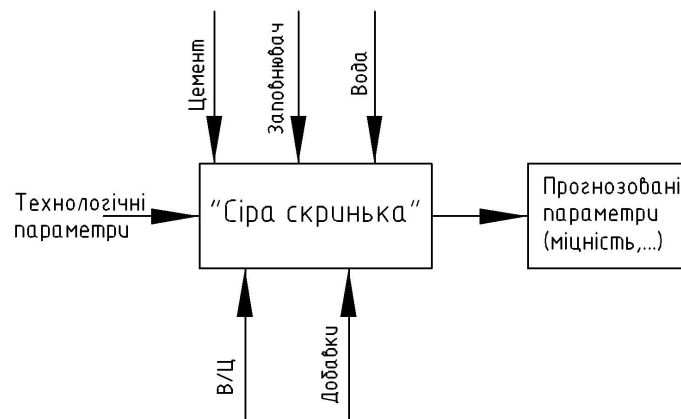


Рисунок 1.5 – Модель впливу факторів, які визначають прогнозовану міцність бетонного виробу

Активність цементу або його дійсна міцність мають властивість з часом знижуватись під впливом кліматичних факторів. Також активність цементу в ємності не точно відповідає його паспортним даним за маркою та при отриманні від виробника. Навіть після здійснення лабораторних випробовувань цементу [99, 100] не можна гарантувати точне значення активності для всієї партії, що відібрана для виробництва у визначений момент часу. Отже, активність цементу має нечіткий характер, тобто її значення змінюються в певних, не точно прогнозованих межах.

Вологість щебеню, що зберігається у відвалах на відкритому повітрі, визначається кліматичними умовами та глибиною розміщення у відвалі. Це стосується також вологості піску, оскільки умови його зберігання збігаються з умовами зберігання щебеню. Таким чином,

вкрай важко стверджувати про істинну вологість матеріалу крупного та мілкового заповнювачів на основі відбору проб. Значення вологості щебеню та піску не повинні перевищувати певну границю (1 %) відповідно до рекомендації щодо виготовлення бетонів [101].

Модуль крупності щебеню характеризує найбільшу величину його частинок та визначається за результатами просіювання через спеціальні сита відібраної проби щебеню (гравію), що також не дозволяє в повній мірі характеризувати його чіткий характер.

Прогнозований проектний склад бетонної суміші носить чіткий характер. Нечіткість в його числові значення вносять похибки дозувальних пристроїв сипучих матеріалів та сенсори закриття подачі води. Похибка дозувальних пристроїв та сенсора подачі води складає до 10 %. Таким чином, виробничий склад бетонної суміші також має нечіткий характер, кількісні характеристики мас його заповнювачів знаходяться в певних діапазонах похибок складових величин.

Результат аналізу вхідних факторів свідчить (див. рис.1.5), що існує невизначеність в оцінюванні результату виробництва бетону. Його якість визначається такими параметрами: міцністю на стиск (R_6 , МПа), морозостійкістю (F , циклів), водопоглинанням, пористістю, водонепроникністю [99, 100, 102]. Ці фактори залежать також від параметрів технологічних процесів обробки при його виробництві. Таким чином, проектування складу бетону ведеться в умовах нечітких вхідних даних про більшість заповнювачів суміші та невизначеності результату міцності бетону на стискування [4].

Одним із ефективних математичних інструментів врахування якісних та кількісних факторів впливу складових бетонної суміші та типу технологічного процесу обробки на прогнозовану міцність бетону є моделювання із застосуванням методик, які враховують якісні фактори впливу на базі теорії нечіткої логіки [6, 16, 103–105].

Нечіткою множиною \tilde{A} на універсальній множині U називається сукупність пар $(\mu_A(u), u)$, де $\mu_A(u)$ – ступінь належності елемента $u \in U$ до нечіткої множини \tilde{A} . Ступінь належності – це число з діапазону $[0, 1]$. Чим вищий ступінь належності, тим більшою мірою елемент універсальної множини відповідає властивостям нечіткої множини U [17, 103, 106, 107]. Функцією належності називається така функція,

яка дозволяє обчислити ступінь належності довільного елемента універсальної множини до нечіткої множини [103].

Якщо універсальна множина складається з кінцевого числа елементів $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, тоді нечітка множина \tilde{A} записується так:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^k \mu_A(u_i) / u_i \text{ або } \tilde{A} = (\mu_A(u_1) / u_1, \mu_A(u_2) / u_2, \dots, \mu_A(u_k) / u_k). \quad (1.12)$$

При неперервній множині U використовують таке позначення:

$$\tilde{A} = \int_u (\mu_A(u) / u). \quad (1.13)$$

Знаки \sum та \int в цих формулах означають сукупність пар $\mu_A(u)$ та u . Доповненням нечіткої множини A на універсумі U називається нечітка множина \bar{A} з функцією $\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$ для усіх $u \in U$.

Перетином нечітких множин \tilde{A} та \tilde{B} , які задані на U , називається нечітка множина $\tilde{C} = \tilde{A} \cap \tilde{B}$ з функцією належності $\mu_C(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u))$ для усіх $u \in U$. Операція \min позначається символом \wedge , відповідно, $\mu_C(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u)$. Об'єднанням нечітких множин \tilde{A} та \tilde{B} , які задані на U , називається нечітка множина $\tilde{D} = \tilde{A} \cup \tilde{B}$ з функцією належності $\mu_D(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u))$, для усіх $u \in U$. Операція \max позначається символом \vee , відповідно, $\mu_D(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u)$ [17].

Лінгвістичною змінною називається така змінна [108], значеннями якої є слова або словосполучення деякої природної чи штучної мови. Множина усіх можливих значень лінгвістичної змінної називається терм-множиною. В теорії нечітких множин терм задається функцією належності. При побудові функцій належностей за експертними оцінками найбільше поширення отримали методи на основі парних порівнянь [109] та статистичної обробки експертної інформації [104].

Позначимо нечіткі логічні змінні через \tilde{A} і \tilde{B} , а функції належності, що задають істинні значення цих змінних через $\mu_{\tilde{A}}(u)$ та $\mu_{\tilde{B}}(u)$, $u \in [0, 1]$. Нечіткі логічні операції ТА (\wedge), АБО (\vee), НІ ($\bar{\quad}$) і імплікація (\Rightarrow) виконуються за такими правилами:

$$\begin{aligned} \mu_{A \wedge B}(u) &= \min(\mu_A(u), \mu_B(u)); \quad \mu_{A \vee B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)); \\ \mu_{\bar{A}}(u) &= 1 - \mu_A(u); \quad \mu_{A \Rightarrow B} = \max(1 - (\mu_A(u), \mu_B(u))). \end{aligned}$$

Нечітким висновком називається апроксимація залежності $D = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за допомогою нечітких правил <Якщо–То> та нечітких логічних операцій. Структура діагностичної залежності типу «входи–вихід» базується на нечіткій базі знань. Нечітка база знань являє собою сукупність правил <Якщо «входи», То «вихід»>, які відображають досвід експерта і його розуміння причинно-наслідкових зв'язків [103].

Формування нечіткої бази знань в [17] трактується як аналог етапу структурної ідентифікації, на якому будується модель діагностування з параметрами, що підлягають настроюванню. Крім цього, сукупність правил <Якщо–То> можна розглядати як набір експертних точок у просторі «входи–вихід». Застосування нечіткого висновку дозволяє відновлювати за цими точками багатовимірну поверхню «входи–вихід».

Метод ідентифікації нелінійних об'єктів нечіткими базами знань як взаємопов'язана сукупність математичних моделей, алгоритмів та формалізованих методик дозволяє використовувати експертно-лінгвістичну інформацію для оптимального вибору заповнювачів бетону та типу технологічного процесу за результатами віртуального експерименту [16].

Побудова моделі діагностування здійснюється у два етапи, які за аналогією з класичними методами [110] можна вважати етапами структурної і параметричної ідентифікації.

Перший етап являє собою формування за доступною експертною інформацією нечіткої бази знань – грубої моделі діагностування. Чим вищий професійний рівень експерта, тим краще адекватність нечіткої моделі діагностування міцності бетону, побудованої на першому етапі. Однак збіг результатів нечіткого висновку (теорія) і експериментальних даних не є гарантованим на першому етапі моделювання, тому необхідний другий етап, на якому навчають нечітку модель шляхом адаптації її параметрів експериментальним даним.

Суттю другого етапу ідентифікації є підбір таких ваг нечітких правил з бази знань і таких параметрів функцій належності, які мінімізують відхилення між експериментальними даними і результатами нечіткого висновку [17]. Навчання нечіткої бази знань зводиться до задачі нелінійної оптимізації, яка може бути розв'язана різними методами. Для навчання великих баз знань доцільно використовувати ге-

нетичні алгоритми [20, 107, 111], які дозволяють значно ефективніше за звичайні методи математичного програмування (метод найшвидшого спуску, квазіньютонівські методи тощо) [103] розв'язати складні задачі оптимізації.

Практичне застосування теорії нечітких множин до прогнозування проектних бетонних сумішей передбачає представлення параметрів стану у вигляді лінгвістичних змінних. Формалізація лінгвістичних значень в рамках теорії нечітких множин здійснюється через функції належності.

Зазвичай функція належності має 2, 3 або 4 параметри [103]. Трикутна модель функції належності потребує трьох параметрів, якими є координати максимуму та мінімумів. Трапецієвидна модель функції належності потребує чотирьох параметрів, якими є координати максимумів та мінімумів.

Дзвіноподібна модель функції належності потребує двох параметрів, якими є координата максимуму та коефіцієнт концентрації функції належності, тому при її використанні зменшується розмірність оптимізаційної задачі, яка виникає при навчанні нечіткої моделі.

Застосування апарату нечіткої логіки при прогнозуванні міцності бетону потребує експертних та експериментальних даних для навчання моделі. Кількість даних навчальної вибірки має бути більше кількості параметрів, що налаштовуються при навчанні моделі прогнозованої міцності бетонних виробів, з врахуванням кількісних та якісних параметрів як лінгвістичних змінних [103].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ

2.1 Характеристики матеріалів для експериментальних досліджень

В якості в'язучого при проведенні досліджень використовувались портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400 (тип ІІ згідно з [112]), крупного заповнювача – гранітний щебінь, мілкого заповнювача – кварцовий пісок різної крупності. Також використовувались пластифікуючі, повітров'язувальні та прискорюючі добавки.

Портландцемент. Використаний портландцемент ПАТ «ХайделбергЦемент Україна», м. Кривий Ріг за мінеральним складом відноситься до найбільш поширених середньоалюмінатних цементів, що найбільш характерні для сучасної вітчизняної цементної промисловості. Хіміко-мінералогічні, речовинні та фізико-механічні характеристики матеріалів наведено у табл. 2.1–2.3.

Таблиця 2.1 – Склад компонентів портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш-400

Тип цементу	Склад компонентів цементу по масі у відсотках, %		
	Портландцементний клінкер	Гранульований шлак	Додаткові компоненти (SO ₃)
ПЦ ІІ/А-Ш-400	80,42	18	1,58

Таблиця 2.2 – Хіміко-мінералогічний склад компонентів портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш-400, %

Хімічний склад							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O+Na ₂ O	R ₂ O
23,52	5,21	4,15	62,7	2,62	1,58	0,20	менше 1
Мінералогічний склад				C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₃ AF
				62,7	14,8	6,4	12,4

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні характеристики портландцементу ПЦ II/A-III-400

№ п/п	Назва показника	Кількісне значення
1	Тонкість помелу, залишок на ситі № 008, %	7,0
2	Питома поверхня за Блейном, см ² /г	2900
3	Строки тужавлення: ...початок, хвкінець, хв	2 год 55 хв 4 год 25 хв
4	Рівномірність зміни об'єму	витримує
5	Нормальна густина, %	24,5
6	Середня активність при пропарюванні в ранньому віці 2 діб, МПа	21,6
7	Міцність на стиск, МПа:	
	у віці 7 діб	28,5
	у віці 28 діб	41,3

В лабораторних умовах додатково до паспортних даних було визначено активність наведеного портландцементу з використанням вольського піску (міждержавний стандарт ГОСТ 6139-2003) з модулем крупності 2,69. Активність цементу в результаті випробовування стандартних балочок 40×40×160 мм склала $R_{ц} = 41,5$ МПа.

Заповнювачі. В якості основного заповнювача бетонних сумішей для виготовлення важкого бетону використовувався гранітний щебінь Гніванського кар'єру фракції 5...20 мм, що відповідає вимогам міждержавного стандарту ГОСТ 8267-93. В якості мілкового заповнювача використовувався митий річковий пісок (Дніпровський) та пісок з родовища біля м. Славути, Хмельницької обл. Характеристики заповнювачів наведено у табл. 2.4 та 2.5.

Таблиця 2.4 Характеристики крупного заповнювача

Щебінь Гніванського кар'єру	Характеристики			
	Густина, кг/м ³	Насипна густина, кг/м ³	Пустот- ність, %	Вміст пилува- тих часток, %
	2750	1350	45,2	1,5

Зерновий склад пісків, характеристики яких наведено у табл. 2.5, задовольняє вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 «Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови».

Таблиця 2.5 – Характеристики мілкового заповнювача

Вид піску за походженням	Характеристики				
	Істинна густина, кг/м ³	Насипна густина, кг/м ³	Пустотність, %	Модуль крупності	Вміст пилюватих та глинистих часток, %
Славутський кар'єр	2640	1430	45,8	1,85	0,8
Дніпровський (річковий)	2670	1620	39,2	1,55	0,58

Добавки. В якості пластифікуючої добавки було використано суперпластифікатор Релаксол СУПЕР ПК (ТУ 64-16-265-80) Запорізького підприємства ДП «Р» ТОВ «Будіндустрія ЛТД». Також було застосовано суперпластифікатор «Поліпласт СП-3» (ТУ 5870-006-58042865-05) Новомосковського заводу «ООО Поліпласт Новомосковск», Росія. Основні характеристики використаних пластифікуючих добавок наведено у табл. 2.6 та 2.7.

Таблиця 2.6 – Характеристики добавки «Релаксол СУПЕР ПК»

Склад добавки «Релаксол СУПЕР ПК»	Суміш поліганідів-прискорювачів та суперпластифікаторів. Не містить хлору.
Галузь застосування	Може бути використана при виготовленні: високорухомих товарних бетонів в нормальних умовах, при виробництві залізобетонних виробів при малотепловій технології, спеціальних видів бетону, гідротехнічних, високоміцних, таких, що самозмінюються, хімічно стійких, дорожних та мостових
Форма випуску	Суміш, готова до застосування
Дозування	Введення у склад бетонної суміші або розчину 0,5...1,0 л на 100 кг цементу, в залежності від потреби рухомості. Враховувати зниження 5...15 % води за творення при приготуванні бетонної суміші.
Сертифікація	ТУ У В-2.7-19266746.001-96, ДСТУ Б В.2.7-65-97 (Добавки для бетонов и строительных растворов), EN 934-2.

Таблиця 2.7 – Характеристики добавки « Поліпласт СП»

Склад добавки «Поліпласт СП-3»	Суміш натрієвих солей поліметиленафталінсульфокислот різної молекулярної маси, лігносульфонатів технічних, промислової суміші тіосульфата та роданіда натрію
Галузь застосування	Може бути використана при виготовленні монолітних та збірних залізобетонних конструкцій із важкого, легкого та ніздрюватого бетонів у будівництві різного призначення: цивільному, промислового, транспортному і т. д.
Застосування	Введення у порошкоподібному вигляді у склад бетонної суміші при ретельному перемішуванні компонентів; Введення у рідкому вигляді разом із розрахунковою кількістю води на заміс. Введення в попередньо перемішану бетонну суміш з частиною(10...20 %) води затворення незадовго до завершення перемішування
Дозування	Для товарного бетону.....0,4...0,8 %, для виготовлення залізобетонних виробів та конструкцій.....0,3...0,5 %, при використанні в якості водоредукуючої добавки0,6...0,8 % від маси в'язучого в перерахунку на суху речовину
Сертифікація	ГОСТ 24211 (ДСТУ Б В.2.7-65-97). ДОБАВКИ ДЛЯ БЕТОНОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ).

2.1.1 Радіаційно-гігієнічні характеристики будівельних матеріалів

Гамма-спектрометричний аналіз будівельних матеріалів, що видобуваються у Рівненській, Вінницькій, Київській, Житомирській, Львівській, Полтавській, Черкаській, Дніпропетровській областях України показав [113], що питома активність радію-226, торію-232 та калію-40 у пробах піску, відібраного у кар'єрах, зареєстрована у межах 2,9...7,2 Бк/кг; 52,5...83,6 Бк/кг, 0,7...4,4 Бк/кг.

У пробах піску, відібраного у р. Дніпро, питома активність природних радіонуклідів (ПРН) не перевищувала, відповідно, значень: $3,6 \pm 0,2$ Бк/кг, $3,2 \pm 0,1$ Бк/кг, $62,3 \pm 5,3$ Бк/кг, $4,8 \pm 1,1$ Бк/кг. Сумарна ПРН у всіх пробах піску (109) не перевищувала 370,0 Бк/кг. Гамма-спектрометричні дослідження проб цементу свідчать про те, що питома активність цезію-137 у пробах реєструвалася на рівні глобальних випадінь (0,3...0,5 Бк/кг); ПРН – в межах: радій-226 – 7,0...17,4 Бк/кг;

торій-232 – 8,1...31,5 Бк/кг; калій-40 – 240,5...444,0 Бк/кг. Ступінь радіоактивного забруднення щебеню залежить не тільки від місця видобування, але й від фракції щебеню. Найбільші значення радію-226 ($42,3 \pm 2,4$ Бк/кг) і торію-232 ($62,1 \pm 5,4$ Бк/кг) зареєстровані у фракції 5...20 мм щебеню, що видобувається у Коростеньському кар'єрі Житомирської області. Мінімальні значення питомої активності радію-226 (11,2...22,8 Бк/кг) і торію-232 (21,7...38,4 Бк/кг) зареєстровані у пробах щебеню, що видобувається на Овруцькому, Гнатопиському кар'єрах Київської області і Чкаловському кар'єрі Полтавської області.

У щебені, що видобувається на Гніванському кар'єрі Вінницької області, значення питомої активності радію-226 не перевищували $34,2 \pm 0,45$ Бк/кг, торію-232 – $64,8 \pm 2,19$ Бк/кг; на кар'єрах Рівненської області – відповідно 8,2...41,2 Бк/кг та 12,2...57,0 Бк/кг. На Ушицькому кар'єрі у пробах щебеню залежно від фракції питома активність радію-226 реєструвалася у межах 14,7...39,5 Бк/кг, торію-232 – 20,2...48,2 Бк/кг. У всіх пробах щебеню [113] питома активність цезію-137 знаходилась на рівні глобальних випадінь.

Тобто, оцінюючи в цілому результати гамма-спектрометричних досліджень проб будівельних матеріалів, відібраних у восьми областях України з'ясовано, що пісок, щебінь, цемент, керамзит можуть використовуватись для всіх видів будівництва без обмежень, оскільки сумарна питома активність ПРН не перевищувала 370 Бк/кг, що відповідає першому класу згідно з будівельними нормами РБН-356-91; цезій-137 реєструвався на рівні глобальних випадінь.

2.2 Теоретичне обґрунтування методології фізичних процесів при формуванні пресованих бетонних виробів

2.2.1 Розподіл тиску по висоті виробу при ущільненні бетонної суміші

На думку проф. І. Н. Дударя залежності розподілення тисків в процесі пресування по перерізах виробу, що отримані в працях проф. Й. М. Ахвердова [68], канд. техн. наук О. В. Світонського [70], проф. Г. М. Ждановича [114], носять наближений характер. Тому в [12] зроблена спроба пояснити теоретичні залежності, які дозволяють точніше прогнозувати характер залежності та абсолютні значення розподілення тисків по висоті виробу, а також встановлювати межу розподілення тиску пресування по товщині виробу. Також розглянуто най-

поширеніший випадок стиснення цементного тіста в жорсткій металевій формі за умови відсутності поперечних деформацій, тобто внаслідок великої жорсткості форми.

Тертя, що виникає на поверхні стінок під час осідання бетонної суміші, сприймає частину вертикального тиску P_z . У зв'язку з цим напруження у цементному тісті, які перпендикулярні до нормальних, можна виразити як

$$P_x = P_y = \xi P_z, \quad (2.1)$$

де ξ – коефіцієнт бокового тиску, P_x, P_y – бокові тиски суміші на стінку форми.

Закономірність розподілу тиску в бетонній суміші густиною γ_b розглядається в прямокутному перерізі з шириною a , довжиною b та висотою h (рис. 2.1). Для цього виділено двома горизонтальними площинами, що перпендикулярні до висоти h , елемент суміші товщиною dz . Цей елемент знаходиться під дією сил, що зображені на рис. 2.1 [12].

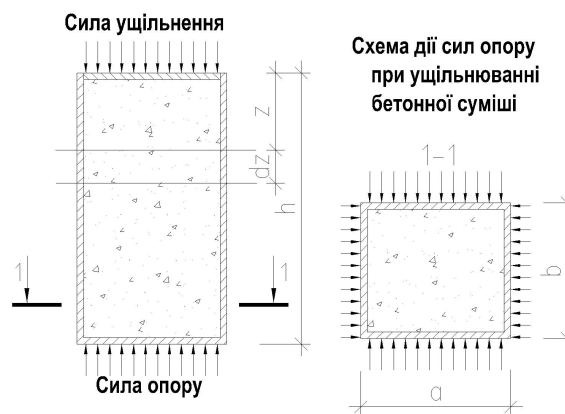


Рисунок 2.1 – Схема для визначення сил, що діють на елементарний прошарок масиву бетонної суміші dz , що ущільнюється

Рівняння рівноваги всіх сил відносно осі Z [12] має вигляд

$$\gamma_b abdz + P_z ab - (P_z + dP_z) ab - \tau_h (2a + 2b) dz = 0, \quad (2.2)$$

де γ_b густина бетонної суміші; a, b – довжина та ширина прес-форми; dz – елементарний прошарок бетонної суміші; опір тертю τ_h по боковій поверхні бетонної суміші, що дорівнює

$$\tau_h = \xi P_z \operatorname{tg} \alpha_c, \quad (2.3)$$

де ξ – коефіцієнт бокового тиску суміші; α_c – коефіцієнт тертя суміші по стінці форми.

Після відповідного перетворення рівняння (2.2) отримує вигляд

$$dz(\gamma_{\delta} - \xi P_z \operatorname{tg} \varphi_0 \frac{L}{S}) = dP_z, \quad (2.4)$$

де $L = 2(a+b)$ – периметр перерізу зразка; $S = a \cdot b$ – площа перерізу зразка.

Достовірність висунутої гіпотези про розподілення тиску в масиві бетонної суміші, що ущільнюється, може бути встановлена шляхом порівняння величини тиску, що отримана в результаті чисельного моделювання за теоретичними залежностями, з експериментальними даними. Для чисельного моделювання залежності розподілу величини тиску привантаження по висоті масиву бетонної суміші, що ущільнюється, після послідовних перетворень рівняння (2.2) отримано залежність [12]

$$P_z = \frac{1}{e^{zK_{s.f.}} K_{s.f.}} [PK_{s.f.} + \gamma_{\delta}(e^{zK_{s.f.}} - 1)], \quad (2.5)$$

де $K_{s.f.} = \xi \operatorname{tg} \varphi_0 \frac{L}{S}$ – коефіцієнт структури цементного тіста та впливу форми.

Базуючись на аналітичній залежності (2.5) та (1.1), при моделюванні розподілу тиску по висоті масиву бетонної суміші під час ущільнення, за таких початкових умов: $P_{\text{надл}} = 5$ МПа, глибина занурення $h = 0,6$ м та поперечний переріз форми $0,1 \times 0,1$ м, отримано криву розподілу тиску (рис. 2.2) [21].

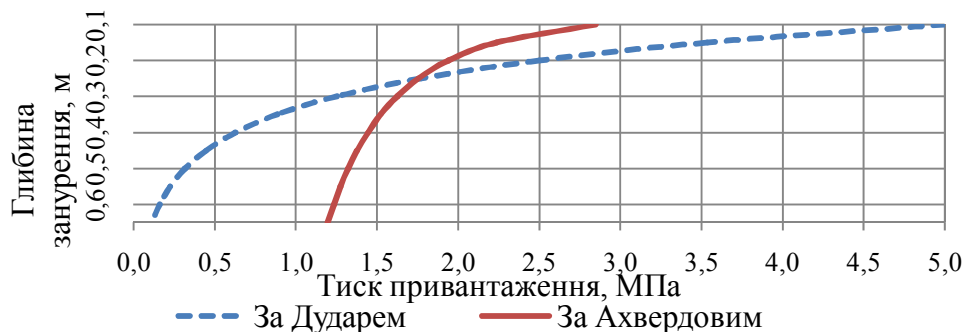


Рисунок 2.2 – Зміна величини тиску привантаження по глибині занурення

Аналіз зміни величини тиску привантаження (рис. 2.2) свідчить, що при збільшенні відстані від поверхні вглиб масиву бетонної суміші відбувається затування величини тиску привантаження в ній. Характер затування тиску, виражений за різними формулами, є неоднозначним. За формулою проф. І. Н. Дударя [12] затування тиску більш виражене, співвідношення тиску на глибині 0,6 м до тиску на глибині 0,05 м складає 0,023, на відміну від залежності, запропонованої проф. Й. М. Ахвердовим [68], в якій теж співвідношення вже 0,42. Невідомим є характер розподілу тиску по висоті бетонної суміші з вмістом пластифікуючих добавок, при варіюванні фракції крупного заповнювача та при впливі імпульсного вібрування. Існує необхідність експериментального визначення характеру розподілу тиску по висоті бетонної суміші при статичному та динамічному ущільненні із з'ясуванням впливу пластифікуючих добавок.

2.2.2 Вплив тиску пресування та густини бетонної суміші на зміну об'єму невидаленого повітря

Фізичну природу сил пружного опору суміші в технологічному процесі її ущільнення при виготовленні бетонних виробів охарактеризовано у роботах [1, 7, 68, 70]. Головним фактором, який визначає пружні властивості бетонної суміші при ущільненні, є невидалене з неї повітря, яке має найбільшу здатність до деформування у порівнянні з її твердою та рідкою фазами [48].

На власну частоту коливань суміші при її ущільненні в процесі формування бетонного виробу впливає радіус бульбашок стиснутого у суміші повітря [23, 89]. Наявність резонансів бульбашок стиснутого у суміші повітря визначає режим збудження останньої. Для реалізації ефекту вібраційного кипіння необхідно збуджувати у досліджуваній системі «вібромашина–оброблювальне середовище–привантаження» високочастотні коливання, які розриватимуть бульбашки. Це суттєво підвищує якість ущільнення бетонної суміші в процесі виготовлення бетонних виробів. Для визначення залежності радіусу бульбашки повітря у бетонній суміші від глибини її занурення використано відповідні припущення.

Біля поверхні суміші діє сумарний тиск

$$p_{\text{сум}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{стат}} \quad (2.6)$$

При незмінній температурі до повітря бульбашки, тобто при ізобаричному процесі, можна застосувати закон Бойля-Маріотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad (2.7)$$

де p_i, V_i – відповідно, тиск повітря та його об'єм в бульбашці.

На глибині занурення у суміш h , рахуючи від її поверхні, тиск

$$p_2 = p_{\text{атм}} + p_{\text{стат}} + \rho g h, \quad (2.8)$$

де h – глибина занурення у суміш, рахуючи від її поверхні.

Об'єм бульбашки повітря біля верхньої поверхні суміші, виражений через її радіус r_0 становить $V_{\text{пов}} = (4/3)\pi r_0^3$.

При $h = 0$ тобто на поверхні суміші, радіус бульбашки дорівнюватиме r_0 , при $h \neq 0$, тобто на глибині від поверхні суміші, радіус бульбашки дорівнюватиме r_0/n . Тоді об'єм бульбашки повітря $V_{\text{глиб}}$ на глибині h від поверхні суміші становить

$$V_{\text{глиб}} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{r_0}{n}\right)^3 = \frac{1}{n^3} \cdot \frac{4}{3}\pi r_0^3 = \frac{1}{n^3} \cdot V_{\text{пов}}, \quad (2.9)$$

де n^3 – коефіцієнт зміни об'єму бульбашки від глибини занурення у суміш.

Після підстановки у рівняння ізобаричного процесу (2.7), врахування (2.8) та відповідних перетворень значення коефіцієнта зміни об'єму бульбашки від глибини занурення у суміш при виготовленні бетонних виробів $n^3 = f(h, \rho, p)$ визначається як

$$n^3 = \frac{\rho g h}{p_{\text{стат}} + p_{\text{атм}}} + 1. \quad (2.10)$$

Аналіз рівняння (2.10) свідчить, що радіус r_0 бульбашки об'єму повітря $V_{\text{глиб}}$, стисненого у бетонній суміші, що ущільнюється, залежить від: атмосферного тиску $p_{\text{атм}}$, тиску привантаження $p_{\text{стат}}$, щільності суміші ρ та глибини занурення в суміш h .

Для виявлення фізико-механічних закономірностей ущільнення суміші при виготовленні бетонних виробів відповідно до залежності (2.10) виконано моделювання [23]. Вихідними змінними умовами є густина бетонної суміші для важких бетонів $\rho = 2250 \dots 2500 \text{ кг/м}^3$, висота прошарку бетонної суміші, що ущільнюється, $h = 0,01 \dots 0,6 \text{ м}$,

тиск привантаження $p_{стат} = 5 \dots 15$ МПа як найбільш ефективний тиск у тривало пресованих сумішах [1, 30]. За результатами чисельного моделювання зміни співвідношень об'єму бульбашки повітря в бетонній суміші на поверхні до її об'єму на глибині при різних тисках привантаження отримано графічні залежності (рис. 2.3–2.5).

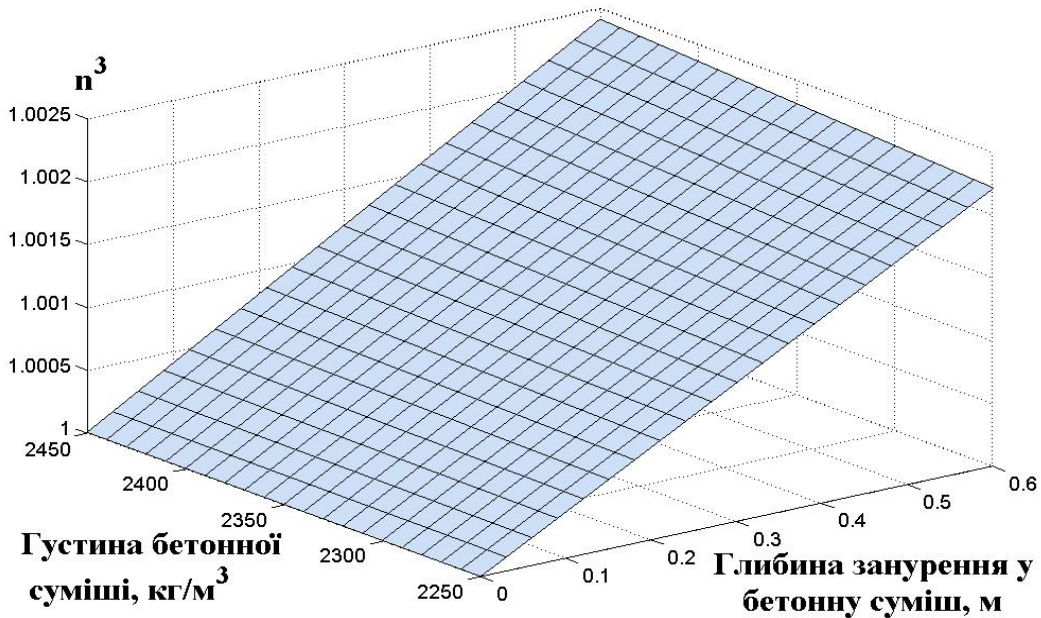


Рисунок 2.3 – Залежність величини співвідношення об'єму бульбашки на поверхні до об'єму бульбашки на глибині h при тиску привантаження 5 МПа

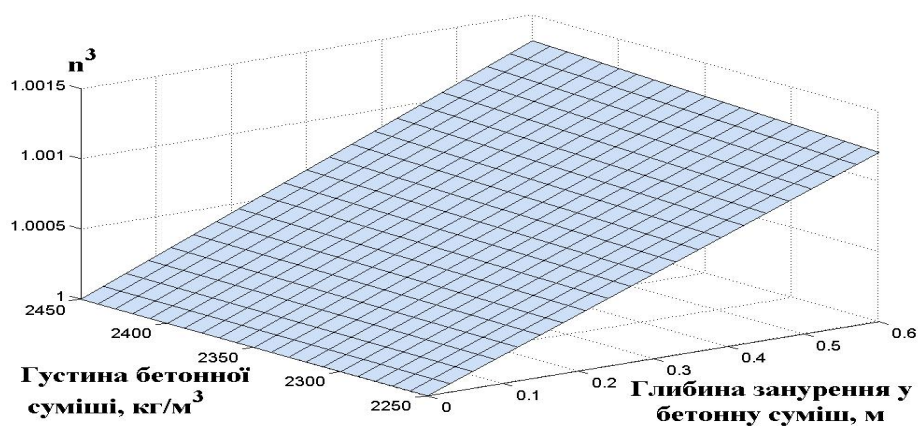


Рисунок 2.4 – Залежність величини співвідношення об'єму бульбашки на поверхні до об'єму бульбашки на глибині h при тиску привантаження 10 МПа

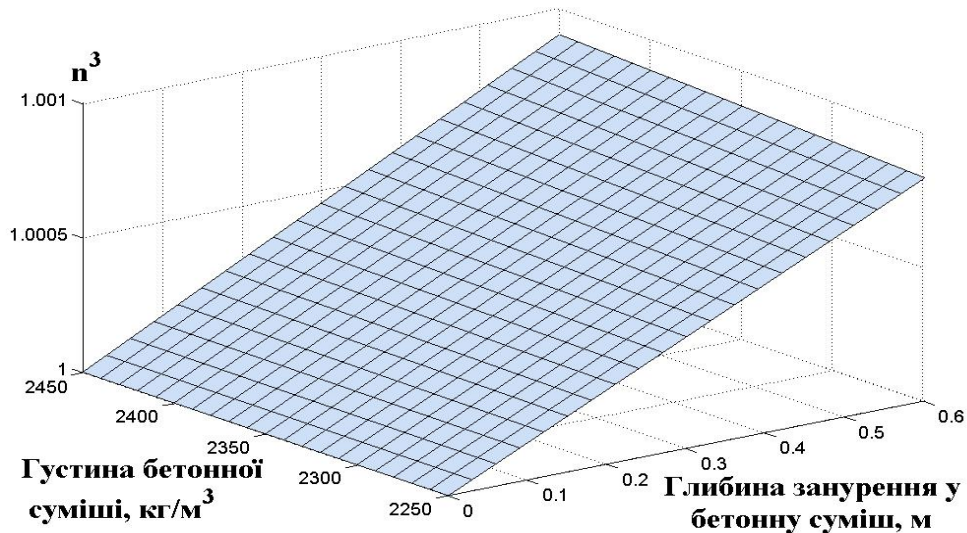


Рисунок 2.5 – Залежність величини співвідношення об’єму бульбашки на поверхні до об’єму бульбашки на глибині h при тиску привантаження 15 МПа

Аналіз результатів моделювання свідчить, що зі збільшенням тиску привантаження $p_{\text{стат}}$ об’єм бульбашки затиснутого повітря $V_{\text{глиб}}$ на глибині прошарку бетонної суміші h наближається до об’єму бульбашки затиснутого повітря $V_{\text{пов}}$ на поверхні. Також зі збільшенням густини суміші ρ зменшується об’єм бульбашки повітря $V_{\text{глиб}}$ на глибині h .

Величини коливання об’єму бульбашки на глибині 0,6 м несуттєві, а саме: для тиску 5 МПа – 0,26...0,29 % від початкового об’єму бульбашки на поверхні, для тиску 10 МПа – 0,13...0,14 %, для тиску 15 МПа – 0,08...0,09 %, відповідно, від початкового об’єму бульбашки на поверхні. При чому площа залежності співвідношення об’єму бульбашки повітря на поверхні до об’єму на глибині суміші при тиску 5 МПа крутіша на 49,5 % від площини при тиску 10 МПа та на 66,2 % від площини при тиску 15 МПа, відповідно. Це свідчить про зменшення об’єму бульбашки повітря на глибині суміші зі збільшенням тиску привантаження.

Збудження коливань високої частоти у системі «вібромашина–оброблюване середовище–привантаження», що можуть просто «розривати» ці бульбашки дозволить зменшити кількість бульбашок затисненого повітря.

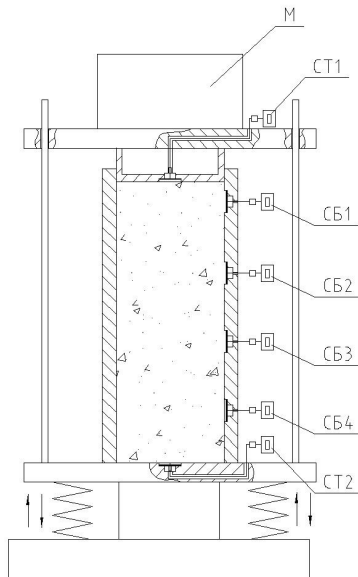
Внаслідок цього структура бетонної суміші буде щільнішою, а отже, будівельний виріб – міцнішим [89].

Кількісним критерієм зменшення затисненого повітря в бетонній суміші може бути експериментальне порівняння міцності бетонного виробу при різних технологіях ущільнення.

2.2.3 Вплив форми поперечного перерізу прес-форми на коефіцієнт бокового тиску ξ та коефіцієнт тертя по боковій поверхні μ при виготовленні пресованих дорожніх каменів

Пружні властивості матеріалу бетонної суміші характеризуються модулем пружності E , сили внутрішнього тертя – коефіцієнтом бокового тиску ξ [66, 68], характер тертя між матеріалом і стінкою прес-форми – коефіцієнтом тертя μ . Відсутність комплексного визначення фізичних властивостей матеріалу бетонної суміші не дозволяє враховувати вплив окремих факторів на коефіцієнт бокового тиску ξ та коефіцієнт тертя по боковій поверхні μ . Наприклад, механічна жорсткість бетонної суміші, що ущільнюється, виміряна за умовною лінією розвантаження [24], в значній мірі залежить від сил тертя між бетонною заготовкою та прес-формою і тому не може дати точного уявлення про модуль пружності матеріалу.

Схема щодо визначення сил тертя при навантаженні бетонної суміші, що ущільнюється, зображена на рис. 2.6.



М - маса рухомої траверси;

СБ1-СБ4 - сенсори бокового тиску бетонної суміші;

СТ1-СТ2 - сенсори тиску

Рисунок 2.6 – Схема для визначення сил тертя при ущільнюванні бетонної суміші для будівельного виробу

Суміш розташована в прес-формі і навантажена: зверху зусиллям статичного привантаження P та інерційним привантаженням у вигляді рухомої траверси з тарованим вантажами загальною масою M ; знизу – віброударним впливом з боку вібростола. Показання сенсорів реєструються записувальним пристроєм [24].

Різниця поточних значень переміщень вібростола $z_{cm}(t)$ і поперечини $z_{np}(t)$, що обчислена за показаннями сенсорів бокового тиску бетонної суміші СБ1 і СБ2 (див. рис. 2.6), є деформацією заготовки бетонного виробу $\Delta z(t)$:

$$\Delta z(t) = z_{cm}(t) - z_{np}(t). \quad (2.11)$$

Залежність $\Delta z(t)$ є також реакцією системи заготовки матеріалу бетонного виробу – поперечина на імпульсний вплив з боку вібростола і носить коливальний характер [115]. Тому жорсткість заготовки $C_{заг}$ може бути визначена безпосередньо із залежності $\Delta z(t)$, якщо вважати її перехідним процесом в одномасовій системі, згідно з [70]

$$C_{заг} = (\omega^2 + 0,25\eta^2)M, \quad (2.12)$$

де ω – частота коливань за залежністю $\Delta z(t)$; η – коефіцієнт демпфування; M – маса рухомої поперечини з тарованими привантаженнями.

Беручи до уваги вираз, який згідно із законом Гука для стиснення матеріалу в абсолютно жорсткій формі

$$\frac{dP}{dl} = \frac{(1 + \xi)}{(1 + \xi - 2\xi^2)E}, \quad (2.13)$$

і враховуючи, що зміна зусилля привантаження по висоті прес-форми $dP/dl = C_{заг}$, знаходимо вираз для визначення модуля пружності бетонної суміші в процесі ущільнення [70]:

$$E = \frac{(1 + \xi)}{(1 + \xi - 2\xi^2)C_{заг}}, \quad (2.14)$$

де коефіцієнт бокового тиску ξ , що визначається як відношення тиску на бокову стінку прес-форми $p_{бок}$ та тиску на торці пуансона $p_{тп}$

$$\xi = \frac{p_{бок}}{p_{тп}}. \quad (2.15)$$

Для визначення ξ використовують показники сенсорів СБ4 і СТ2. Із умови рівності сил, що діють на заготовку бетонного виробу

при ущільненні суміші у вертикальному напрямку при її стисненні, отримуємо:

$$p_{\text{тп}}^{\text{В}} S_{\text{п}} - p_{\text{тп}}^{\text{Н}} S_{\text{п}} - F_{\text{тр}} = 0, \quad (2.16)$$

де $p_{\text{тп}}^{\text{В}}, p_{\text{тп}}^{\text{Н}}$ – тиск на торцях пуансонів відповідно верхнього і нижнього; $S_{\text{п}} = a^2$ – площа пуансона, де a – бокова сторона квадратної прес-форми; $F_{\text{тр}}$ – сила тертя між матеріалом бетонного виробу і стінкою прес-форми.

Силу тертя можна представити таким чином:

$$F_{\text{тр}} = 4al\mu \int_0^L p_{\text{бок}}(l) dl, \quad (2.17)$$

де μ – коефіцієнт тертя між матеріалом і стінкою прес-форми; вираз $4al$ – площа розгортки бокової поверхні експериментальної прес-форми; $p_{\text{бок}}(l)$ – функція розподілу тиску на стінку по висоті прес-форми; l – проміжне миттєве значення висоти заготовки бетонного виробу.

Закон розподілу тиску $p_{\text{бок}}(l)$ може бути отримано апроксимацією показників сенсорів СБ1–СБ4 (див. рис. 2.6).

Якщо прийняти у першому наближенні випадок лінійного розподілу тиску по висоті прес-форми $p_{\text{бок}}(h) = p_{\text{тп}}^{\text{Н}} + Kl$, то вираз (2.17) набуде вигляду

$$F_{\text{тр}} = 4al\mu \frac{(p_{\text{бок}}^{\text{В}} + p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}{2} = 2al\mu(p_{\text{бок}}^{\text{В}} + p_{\text{бок}}^{\text{Н}}). \quad (2.18)$$

Розв'язуючи спільно вирази (2.16) і (2.18) та враховуючи, що $p_{\text{бок}}^{\text{В}} = \xi p_{\text{тп}}^{\text{В}}$ і $p_{\text{бок}}^{\text{Н}} = \xi p_{\text{тп}}^{\text{Н}}$, отримуємо вирази для визначення коефіцієнта тертя між матеріалом бетонної суміші та стінкою прес-форми:

$$\begin{aligned} \text{для квадратної форми перерізу } \mu &= \frac{a}{2} \frac{(p_{\text{бок}}^{\text{В}} - p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}{l\xi(p_{\text{бок}}^{\text{В}} + p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}; \\ \text{для прямокутної форми перерізу } \mu &= \frac{ab}{(a+b)} \frac{(p_{\text{бок}}^{\text{В}} - p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}{l\xi(p_{\text{бок}}^{\text{В}} + p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}; \quad (2.19) \\ \text{для циліндричної форми перерізу } \mu &= \frac{d}{2} \frac{(p_{\text{бок}}^{\text{В}} - p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}{l\xi(p_{\text{бок}}^{\text{В}} + p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}. \end{aligned}$$

Позначивши

$$\psi = \frac{(p_{\text{бок}}^{\text{В}} - p_{\text{бок}}^{\text{Н}})}{l\xi(p_{\text{бок}}^{\text{В}} + p_{\text{бок}}^{\text{Н}})} \quad (2.20)$$

як коефіцієнт втрати тиску по висоті форми, тоді залежність (2.19) з урахуванням (2.20) буде мати вигляд:

- для квадратної форми перерізу $\mu = \frac{a}{2}\psi$;
- для прямокутної форми перерізу $\mu = \frac{ab}{(a+b)}\psi$; (2.21)
- для циліндричної форми перерізу $\mu = \frac{d}{2}\psi$.

Отримані аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів тертя μ між бетонною сумішшю та стінкою форми, а також бокового тиску ξ суміші на стінку (2.21), потребують уточнення шляхом їх експериментального визначення. Наведена модель визначення фізико-механічних властивостей бетонних сумішей буде застосована на експериментальному стенді для різних складів бетонної суміші з різними значеннями В/Ц, фракції заповнювача, типу пластифікатора та ін. Це дозволить визначити експериментальні значення коефіцієнта тертя суміші μ по стінках прес-форми та коефіцієнт бокового тиску ξ . На рис. 2.7 наведено графік теоретичної залежності коефіцієнта тертя суміші μ по стінках прес-форми для трьох типів поперечного перерізу (формула (2.21)) від співвідношення довжини прес-форми до площі поперечного перерізу.

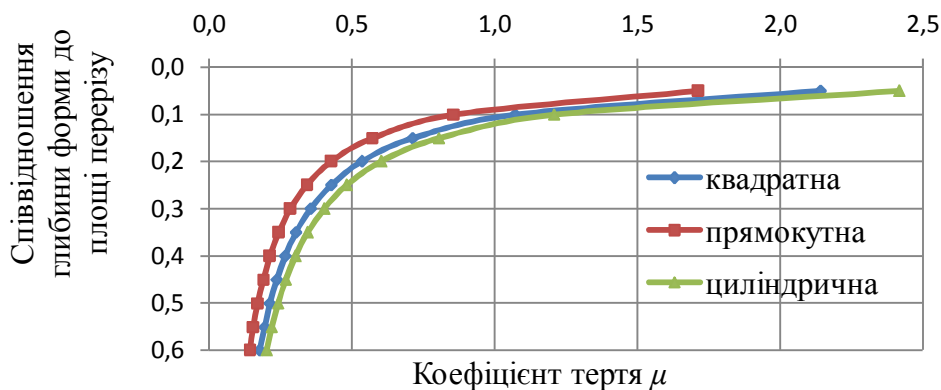


Рисунок 2.7 – Залежність між коефіцієнтом тертя по боковій стінці μ від співвідношення довжини прес-форми до площі поперечного перерізу

Аналіз рис. 2.7 свідчить, що форма поперечного перерізу мало впливає на значення коефіцієнта μ , проте його значення обернено пропорційне співвідношенню глибини форми до площі поперечного перерізу. Прослідковується зменшення значення коефіцієнта μ по висоті прес-форми після глибини 0,1 м і складає 2,14 на глибині 0,05 м, та 0,18 на глибині 0,6 м (для квадратного перерізу).

2.3 Методика проведення експериментальних досліджень

Дослідження фізичних процесів при формуванні виробів з бетонної суміші, що пресувалась, проводилось на базі науково-дослідної лабораторії ефективних будівельних виробів та конструкцій, а також лабораторії будівельних матеріалів Вінницького національного технічного університету для складів важких бетонів з В/Ц = 0,30...0,65 згідно з рекомендаціями [93].

В дослідженнях використовувались стандартні методи випробування [99, 102, 116, 117], вказівки та рекомендації [93, 94, 100, 118] щодо визначення міцності, щільності бетонної суміші тощо. Для вимірювання міцності бетонних кубиків використовувались куби з розмірами 0,1×0,1×0,1 м. Визначення водопоглинання та морозостійкості бетонних зразків виконувалась за стандартними методиками відповідно до ГОСТ 12730.3-78 та ДСТУ Б.В. 2.7-49-96.

Зразки, що були виготовлені з бетонної суміші після вимірювання тиску в різних точках по висоті установки, випробовували на стиск на пресі П-125. Балочки для визначення активності цементу випробовували на згин та стиск за стандартними методиками.

Перед початком експерименту з пресування бетонної суміші експериментально визначались параметри заповнювачів суміші (модуль крупності піску, фракція щебеню, його насипна та істинна густини). Активність цементу перевірялась двома способами: за рекомендаціями [93] та за стандартною методикою [99].

Аналітична обробка отриманих даних експерименту проводилась у комплексі «MATLAB». Оформлення тексту, таблиць та рисунків виконано пакетними продуктами Microsoft OFFICE.

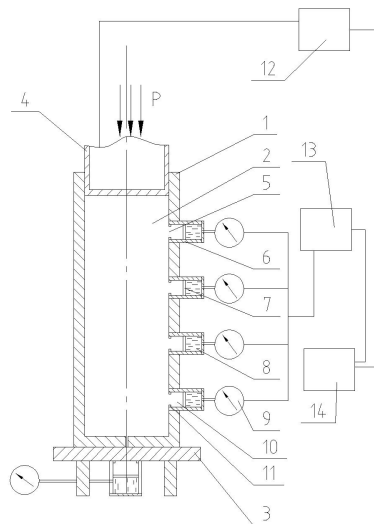
2.4 Обладнання для дослідження процесу формування пресованих бетонних виробів

Патентний пошук [119–122], що виконано у вітчизняній базі по пристроях для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші, показав, що існують декілька варіантів для розв’язання поставленої задачі, але всі вони мають недоліки:

1. Відсутність датчиків тиску в робочій камері з досліджуваним зразком [119].
2. Непропорційне тривісне навантаження [119].
3. Відсутність практичної реалізації вимірювання тиску в декількох точках заготовки по висоті [120, 122].
4. Відсутність можливості вимірювання тиску по висоті масиву бетонної суміші, що знаходиться під тиском у прес-формі [119].

Для експериментального підтвердження отриманої закономірності (див. рис. 2.2) запропоновано дослідну установку (рис. 2.8) вимірювання тиску в масиві бетонної суміші, яка дозволяє виміряти тиск в різних точках по висоті бетонного виробу в часі [22, 25].

Влаштування чотирьох сенсорів у фізичній моделі (рис. 2.8б) виконано для більш точного вимірювання характеру розподілу бокового тиску.



а)



б)

Рисунок 2.8 – Схема (а) та загальний вигляд установки (б) для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші, що ущільнюється

Установка складається з роз'ємного корпусу 1 з порожниною 2 для заповнення випробувальною бетонною сумішшю. В нижній частині порожнини 1 розміщено станину 3, а в верхній – навантажувальний пристрій у вигляді пуансона 4. Пуансон 4 з'єднаний з силовим приводом для передачі зусилля на випробувальну бетонну суміш. На протилежних бокових поверхнях корпусу 1 симетрично зверху, посередині та внизу виконані отвори 5. Навпроти цих отворів на зовнішній поверхні корпусу 1 встановлені робочі гідроциліндри 6, в кожному з яких розміщено рухому діафрагму 7, яка утворює піддіафрагменну 10 та наддіафрагменну 8 порожнини.

Причому кожна наддіафрагменна порожнина 8 заповнена робочою рідиною та з'єднана з показником тиску 9, а піддіафрагменна порожнина 10 через обмежувальне кільце руху 11 гідравлічно з'єднана з порожниною 2, яка слугує для розміщення випробувальної бетонної суміші.

Установка працює таким чином. У порожнину 2 роз'ємного корпусу 1 заливається бетонна суміш. Пуансон 4 під дією тиску силової установки приводиться в дію. Суміш ущільнюється. Надлишковий тиск, який зростає у бетонній суміші, передається через отвори 5 у піддіафрагменну порожнину 10 гідроциліндра 6, передає тиск на рухому діафрагму 7. Переміщення діафрагми 7 з піддіафрагменної порожнини 10 у корпус установки 2 обмежене обмежувальним кільцем руху 11. Надлишковий тиск через рухому діафрагму 7 передається на робочу рідину наддіафрагменної порожнини 8. Показання надлишкового тиску робочої рідини в наддіафрагменній порожнині 8 реєструється показником тиску 9. Після зняття показників тиску з сенсорів тиску 9 по висоті зразка та зняття зусиль з блока реєстрації навантажень 12 припиняють подачу навантажень на випробувальну бетонну суміш через пуансон 4, що з'єднаний з силовим приводом. Вся отримана інформація реєструється блоком зняття бокового тиску 13 та поступає у блок автоматизованої обробки даних 14.

Габарити установки: висота – 0,6 м, відстань до першого сенсора – 0,12 м, від першого до другого – 0,14 м; від другого до третього – 0,14 м; від третього до четвертого – 0,14 м. Переріз пуансона 0,1×0,1 м. Наведені конструктивні габарити установки (0,1×0,1×0,4 + 0,2) м прив'язані до габаритів зразків для вимірювання призменної міцності бетонних зразків згідно з ГОСТ 24452-80 для конструктивного влаштування гідроциліндрів 6.

Оскільки пошук адекватних вимірювальних пристроїв для вимірювання величини бокового тиску не дав позитивних результатів, було запропоновано оригінальний вузол передачі тиску від бетонної суміші на робочу рідину сенсора. Схематичний розріз вузла для передачі тиску від в'язкопружнопластичного середовища бетонної суміші на робочий орган сенсорів установки (а), та конструкцію оригінального цифрового секундоміра з ціною поділки 1 с та точністю вимірювань $\pm 0,1$ с (б) зображено на рис 2.9.

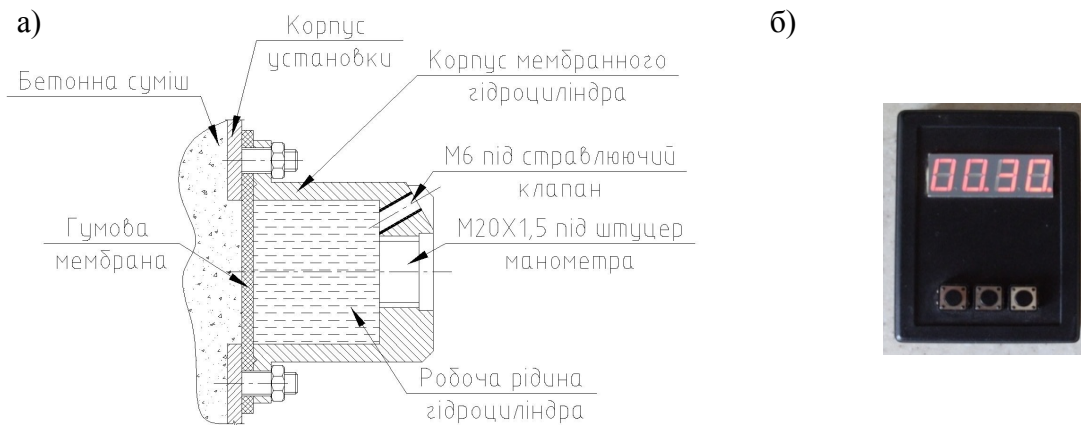


Рисунок 2.9 – Принципова схема вузла передачі тиску від пресованої бетонної суміші на робочий орган сенсора СБ-1–СБ-4 (а) та загальний вигляд цифрового секундоміра (б)

Експериментальним шляхом було визначено пружний опір гумової мембрани для подальшого врахування при вимірюванні величини бокового тиску на кожному з сенсорів СБ-1–СБ-4.

Для визначення зміни величини бокового тиску на кожному з сенсорів СБ-1–СБ-4 в часі було використано цифровий секундомір з ціною поділки 1 с. Точність вимірювань $\pm 0,1$ с.

Боковий тиск у бетонній суміші, що пресувалась у формі на висоті 0,12, 0,26, 0,4, та 0,54 м, відповідно, від площини прикладеного навантаження, вимірювався манометрами типу ДМ 05-МП-3У номіналом 1 МПа, 1,6 МПа та 2,5 МПа, що пройшли перевірку на заводі-виробнику (ПАТ «Склоприлад» м. Червонозаводськ, Полтавської обл., згідно з ТУ У 33.214307481-031:2005).

Тиск від бетонної суміші, що ущільнювалась тиском привантаження P , передавався через гумову мембрану вузла передачі бокового тиску на робочу рідину сенсорів СБ1–СБ4. Для визначення ві-

дносного бокового тиску на бетонну суміш у різних точках (СБ1–СБ4) його значення на поверхні прикладання прес-форми нормувалось з урахуванням втрат тиску на подолання сил пружного опору гумової мембрани та втрат тиску по довжині рукава високого тиску в точці СТ-2 (див. рис. 2.6).

Сумарна похибка відтворення дійсної величини параметрів досліджуваної установки складається із систематичних та випадкових похибок елементів вимірювального каналу і може бути визначена за квадратичною залежністю [123]

$$\delta_{\text{сум}} = \sqrt{\delta_{\text{д}}^2 + \delta_{\text{о}}^2}, \quad (2.22)$$

де $\delta_{\text{сум}}$ – сумарна похибка вимірювального каналу; $\delta_{\text{д}}$ – похибка давача; $\delta_{\text{о}}$ – сумарна похибка еластичних характеристик основи мембрани.

Оцінка точності визначення експериментальних даних проводилась з використанням залежності (2.22), де складові середньої квадратичної похибки прийняті за рекомендаціями [123, 124] зокрема: для давачів тиску $\pm 1,6 \%$ і модулю пружності гумової мембрани $\pm 6 \%$. Таким чином, відносна похибка при вимірюванні тиску складає $\pm 6,2 \%$, що задовольняє вимоги, які висуваються до технічних вимірювань при дослідженні фізичних процесів в бетонній суміші при її ущільненні [115].

3 ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ БЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СУМІШІ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЇЇ УЩІЛЬНЕННЯ

3.1 Ієрархічна класифікація та формалізація факторів, що впливають на прогнозовану міцність бетонного виробу

Впровадження енергоощадних технологій виготовлення бетонних виробів потребує швидкого реагування заводів-виробників товарного бетону на потребу споживача у бетоні із заданими властивостями, зокрема, міцністю на стиск. Реагування на ринковий попит вимагає гнучкого підходу щодо приготування та рецептурного складу бетону. Необхідну рецептуру бетону із певними міцнісними характеристиками складно швидко отримати у лабораторії. Одним із ефективних інструментів врахування якісних та кількісних факторів впливу складових бетонної суміші та типу технологічної обробки на прогнозовану міцність бетону є моделювання із застосуванням методик, які враховують якісні фактори впливу на базі теорії нечіткої логіки та лінгвістичних змінних [4, 16, 17, 19, 20, 103].

З метою створення експертно-моделювальної системи для багатофакторного аналізу впливу фізико-механічних параметрів заповнювачів та технологічних параметрів формування бетонного виробу використано математичний апарат, що базується на основі теорії нечіткої логіки та лінгвістичних змінних [125].

Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на прийняття рішення щодо вибору параметрів формування бетонного виробу із прогнозованою міцністю, виконана їх відповідна класифікація за кількісними та якісними показниками: фізико-механічними та технологічними. До технологічних факторів відносяться: вплив тиску, вплив температури тужавлення, вплив вологості, вплив способу ущільнення бетонної суміші. До фізико-механічних факторів можна віднести: водоцементне відношення В/Ц, добавки (пластифікатори), рН води, марка цементу, а також тип, якість поверхні та форми крупного заповнювача, модуль крупності піску. Всі вищезазначені фактори впливу, що впливають на проектний склад бетону із заданою міцністю, розглядаються як лінгвістичні змінні, що задані на відповідних універсальних множинах і оцінюються нечіткими термами [125].

Ієрархічна класифікація параметрів впливу на прогнозовану міцність виконана у вигляді дерева логічного висновку, яке визначає систему вкладених одне в одне висловлювань-знань меншої розмірності.

Дерево логічного висновку для узагальненої моделі прогнозування міцності бетонного виробу для 19 вхідних змінних показано на рис. 3.1.

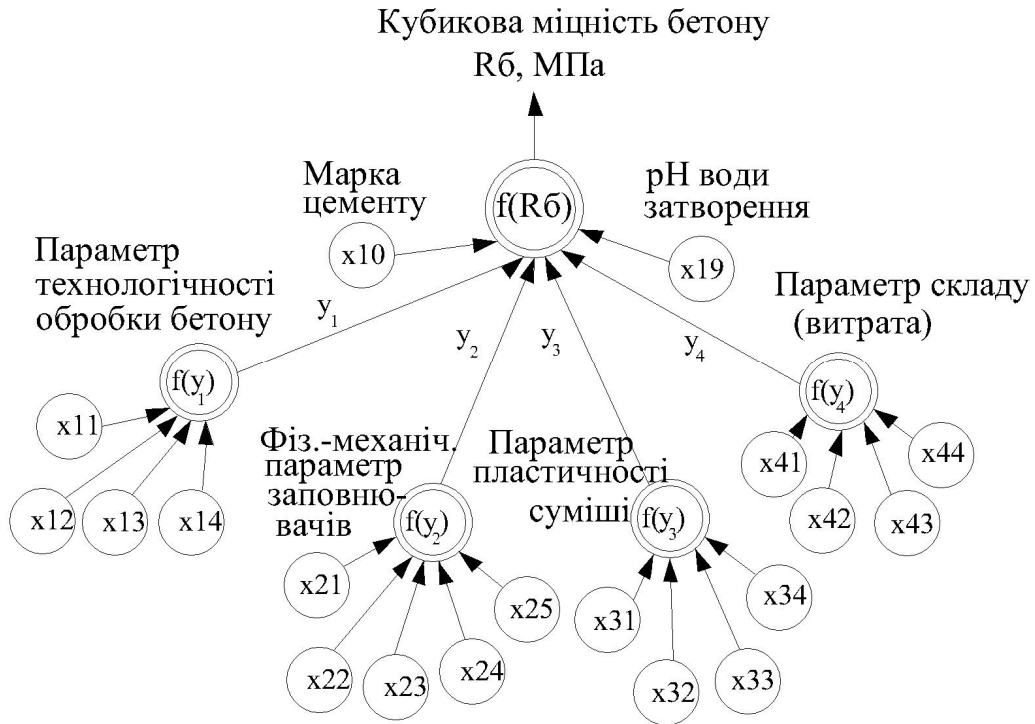


Рисунок 3.1 – Дерево ієрархічного висновку узагальненої моделі прогнозування міцності бетонного виробу

Ієрархічний зв'язок факторів впливу на прогнозовану проектну міцність бетону у логічному дереві (див. рис. 3.1) інтерпретується таким чином: корінь дерева – показник прогнозованої міцності бетонного виробу; термінальні вершини – частинні параметри впливу; нетермінальні вершини (подвійні кола) – згортка частинних параметрів впливу в укрупненні. Стрілки, що виходять з нетермінальних вершин дерева, відповідають укрупненим параметрам моделі прогнозування міцності.

Наведеному на рис. 3.1 ієрархічному дереву логічного висновку відповідає така система співвідношень:

$$R_6 = f_{(R_6)}(x_{10}, x_{19}, y_1, y_2, y_3, y_4); \quad (3.1)$$

$$y_1 = f_{(y_1)}(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}); \quad (3.2)$$

$$y_2 = f_{(y_2)}(x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}); \quad (3.3)$$

$$y_3 = f_{(y_3)}(x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}); \quad (3.4)$$

$$y_4 = f_{(y_4)}(x_{41}, x_{42}, x_{43}, x_{44}), \quad (3.5)$$

де $y_1 \dots y_4$ – проміжні значення лінгвістичних змінних, що характеризують фактори впливу на прогнозовану проектну міцність бетонного виробу, а саме y_1 – параметр технологічності обробки бетону; y_2 – параметр заповнювачів; y_3 – параметр пластичності; y_4 – параметр витрати компонентів; x_{11} – тиск; x_{12} – температура; x_{13} – вологість; x_{14} – коефіцієнт ущільнення; x_{21} – модуль крупності піску; x_{22} – тип заповнювача; x_{23} – форма заповнювача; x_{24} – поверхня заповнювача; x_{25} – фракція заповнювача; x_{31} – зручнукладальність; x_{32} – В/Ц; x_{33} – тип пластифікатора; x_{34} – витрата пластифікатора; x_{41} – витрата цементу; x_{42} – витрата щебеню; x_{43} – витрата піску; x_{44} – витрата води; x_{10} – марка цементу; x_{19} – якість води.

Вихідні дані для баз знань отримано за даними експертів у галузі бетонознавства [1, 2, 7, 9, 91].

Математична модель прогнозування міцності бетонного виробу з врахуванням експериментальних даних І. С. Уєн [126] представлена ієрархічним деревом логічного висновку (рис. 3.2).

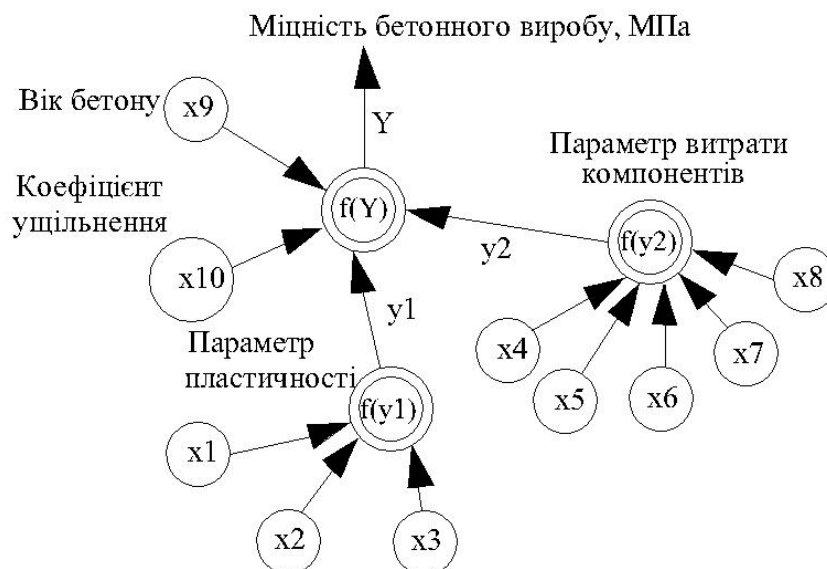


Рисунок 3.2 – Ієрархічне дерево логічного висновку адаптованої моделі прогнозування міцності бетонного виробу

Наведеному на рис. 3.2 дереву адаптованої моделі логічного висновку прогнозування проектної міцності бетонного виробу відповідає така система співвідношень:

$$Y = f_{(Y)}(x_9, x_{10}, y_1, y_2); \quad (3.6)$$

$$y_1 = f_{(y_1)}(x_1, x_2, x_3); \quad (3.7)$$

$$y_2 = f_{(y_2)}(x_4, x_5, x_6, x_7, x_8), \quad (3.8)$$

де y_1, y_2 – укрупнені значення лінгвістичних змінних, що характеризують параметри впливу на прогнозовану проектну міцність бетонного виробу, а саме y_1 – пластичності, y_2 – витрати компонентів та фактори впливу: x_1 – В/Ц суміші, x_2 – витрата золи-виносу; x_3 – витрата суперпластифікатора; x_4 – витрата цементу; x_5 – витрата доменного шлаку; x_6 – витрата води, кг; x_7 – витрата щебеню, кг; x_8 – витрата піску, кг; x_9 – вік бетону, діб; x_{10} – коефіцієнт ущільнення.

3.2 Моделювання прогнозованої міцності бетонних виробів із використанням лінгвістичних змінних

В загальному вигляді математична модель проектної міцності бетону є ієрархічна нечітка система, в якій проміжні значення баз знань лінгвістичних змінних f_{y_1}, f_{y_2} є вхідними для верхньої бази знань Y (див. рис. 3.2). Причому для характеристик проміжних лінгвістичних змінних використовуються нечіткі терми з кількісними виразами «низька» (Н), «середня» (С) та «висока» (В).

Базуючись на принципах побудови експертно-моделювальної системи в нечітких діагностичних системах [16, 104, 107, 111] для прогнозування міцності бетонного виробу шляхом логічного висновку по нечіткій базі знань, використовуючи модуль «Fuzzy Logic Toolbox» програмного комплексу «MATLAB» [16], для кожної лінгвістичної змінної y_1, y_2, Y було створено нечітку базу знань типу «Якщо–То». Використання нечітких термів дозволяє побудувати експертні нечіткі бази знань, які віддзеркалюють зв'язки між вхідними та вихідними лінгвістичними змінними. Навчання моделі виконано з урахуванням експериментальних даних випробовування стандартних зразків бетону на стиск [126].

Змістовну інтерпретацію параметрів пластичності, пропорційності складу, ущільнення бетону та віку бетону, що впливають на прогнозовану міцність бетону на стиск та відповідні множини лінгвістичних оцінок (термів) для адаптованої моделі, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Параметри	Позначення та назва лінгвістичної змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
Пластичності	x1 – В/Ц суміші	0,2...0,5	низьке, середнє, високе
	x2 – витрата золи-виносу, кг	10...200	низька, середня, висока
	x3 – витрата суперпластифікатора, % від маси цементу	1...12,5	низька, середня, висока
Витрати компонентів	x4 – витрата цементу, кг	100...540	низька, середня, висока
	x5 – витрата доменного шлаку, кг	10...360	низька, середня, висока
	x6 – витрата води, кг	120...250	низька, середня, висока
	x7 – витрата щебеню, кг	800...1150	низька, середня, висока
	x8 – витрата піску, кг	590...1000	низька, середня, висока
	x9 – вік бетону, діб	3...28	низький, середній, високий
	x10 – коефіцієнт ущільнення	0,8...0,98	низьке, нижче середнього, середнє, вище середнього, високе

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 3.1, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(y1) &= \mu_H(x1) \wedge \mu_H(x2) \wedge \mu_H(x3) \vee \\ &\vee \mu_H(x1) \wedge \mu_C(x2) \wedge \mu_H(x3) \vee \mu_C(x1) \wedge \mu_H(x2) \wedge \mu_H(x3); \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(y1) &= \mu_C(x1) \wedge \mu_C(x2) \wedge \mu_H(x3) \vee \\ &\vee \mu_B(x1) \wedge \mu_C(x2) \wedge \mu_H(x3) \vee \mu_C(x1) \wedge \mu_B(x2) \wedge \mu_H(x3); \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y1) &= \mu_H(x1) \wedge \mu_H(x2) \wedge \mu_B(x3) \vee \\ &\vee \mu_C(x1) \wedge \mu_H(x2) \wedge \mu_C(x3) \vee \mu_H(x1) \wedge \mu_B(x2) \wedge \mu_B(x3) \vee \\ &\vee \mu_H(x1) \wedge \mu_B(x2) \wedge \mu_C(x3); \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \mu_H(y2) &= \mu_H(x4) \wedge \mu_H(x5) \wedge \mu_B(x6) \wedge \mu_C(x7) \wedge \mu_B(x8) \vee \\ &\vee \mu_H(x4) \wedge \mu_C(x5) \wedge \mu_B(x6) \wedge \mu_H(x7) \wedge \mu_C(x8) \vee \\ &\vee \mu_H(x4) \wedge \mu_H(x5) \wedge \mu_C(x6) \wedge \mu_H(x7) \wedge \mu_B(x8); \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(y2) &= \mu_C(x4) \wedge \mu_C(x5) \wedge \mu_C(x6) \wedge \mu_B(x7) \wedge \mu_C(x8) \vee \\ &\vee \mu_C(x4) \wedge \mu_B(x5) \wedge \mu_C(x6) \wedge \mu_C(x7) \wedge \mu_C(x8) \vee \\ &\vee \mu_C(x4) \wedge \mu_C(x5) \wedge \mu_H(x6) \wedge \mu_B(x7) \wedge \mu_C(x8); \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(y2) &= \mu_C(x4) \wedge \mu_B(x5) \wedge \mu_B(x6) \wedge \mu_B(x7) \wedge \mu_C(x8) \vee \\ &\vee \mu_B(x4) \wedge \mu_B(x5) \wedge \mu_C(x6) \wedge \mu_B(x7) \wedge \mu_B(x8) \vee \\ &\vee \mu_C(x4) \wedge \mu_B(x5) \wedge \mu_C(x6) \wedge \mu_C(x7) \wedge \mu_B(x8) \vee \\ &\vee \mu_B(x4) \wedge \mu_B(x5) \wedge \mu_H(x6) \wedge \mu_B(x7) \wedge \mu_C(x8); \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \mu_H(Y) &= \mu_H(x9) \wedge \mu_H(x10) \wedge \mu_H(y1) \wedge \mu_H(y2) \vee \\ &\vee \mu_H(x9) \vee \mu_{HC}(x10) \wedge \mu_H(y1) \wedge \mu_C(y2) \vee \\ &\vee \mu_C(x9) \wedge \mu_{HC}(x10) \vee \mu_C(y1) \wedge \mu_H(y2) \vee \\ &\vee \mu_H(x9) \wedge \mu_{HC}(x10) \wedge \mu_C(y1) \vee \mu_B(y2); \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(Y) &= \mu_B(x9) \wedge \mu_C(x10) \wedge \mu_C(y1) \wedge \mu_C(y2) \vee \\ &\vee \mu_C(x9) \wedge \mu_C(x10) \wedge \mu_B(y1) \wedge \mu_C(y2) \vee \\ &\vee \mu_B(x9) \wedge \mu_C(x10) \vee \mu_B(y1) \wedge \mu_H(y2) \vee \\ &\vee \mu_C(x9) \wedge \mu_C(x10) \wedge \mu_C(y1) \vee \mu_B(y2); \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(Y) &= \mu_B(x9) \wedge \mu_{BC}(x10) \wedge \mu_C(y1) \wedge \mu_B(y2) \vee \\ &\vee \mu_B(x9) \wedge \mu_{BC}(x10) \wedge \mu_B(y1) \wedge \mu_B(y2) \vee \\ &\vee \mu_B(x9) \wedge \mu_B(x10) \vee \mu_H(y1) \wedge \mu_B(y2) \vee \\ &\vee \mu_C(x9) \wedge \mu_B(x10) \wedge \mu_B(y1) \vee \mu_B(y2). \end{aligned} \quad (3.17)$$

Функціями належності нечітких оцінок впливу на кінцеву проектну міцність бетонного виробу були обрані дзвіноподібні [103], виходячи з таких передумов:

1. Дзвіноподібна модель функції належності потребує двох параметрів, якими є координата максимуму та коефіцієнт концентрації функції належності, що є прийнятним для моделювання заданої задачі.

2. Оскільки дзвіноподібна модель функції належності має лише два параметри, то при її використанні зменшується розмірність оптимізаційної задачі, яка виникає при навчанні нечіткої моделі прогнозованої міцності бетону.

3. Дзвіноподібна модель функції забезпечує достатню «гнучкість» представлення нечіткої інформації [16, с. 27].

Навчання моделі на основі нечітких баз знань відбувалось із застосуванням нечіткого логічного висновку [104], загальна архітектура якого зображена на рис. 3.3.

Блоки системи нечіткого висновку (див. рис. 3.3) щодо прогнозованої міцності бетонного виробу (див. рис. 3.2) виконують такі функції:

1. «Фаззіфікація» перетворює вектор (X) значень вхідних параметрів бетонної суміші в вектор (\tilde{X}) ступенів належності параметрів суміші до нечітких термів.

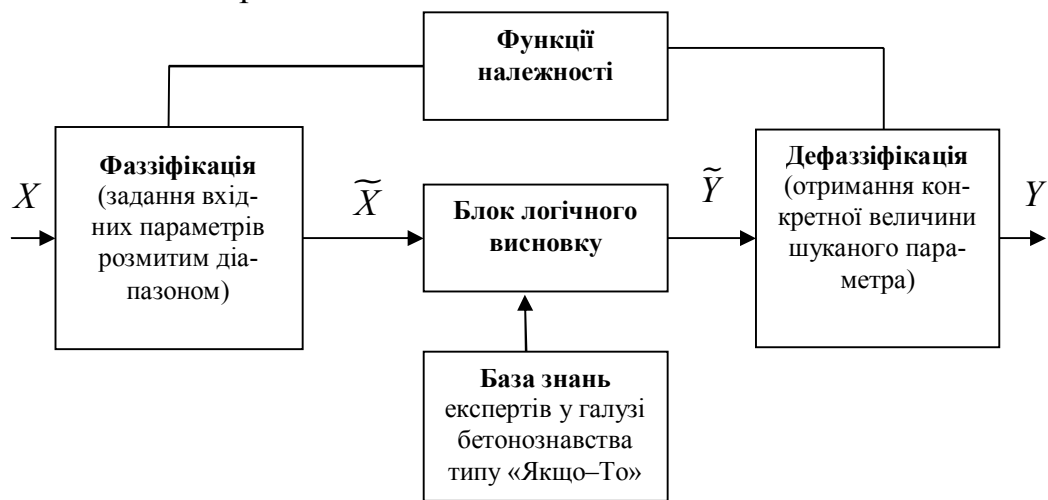


Рисунок 3.3 – Архітектура системи нечіткого висновку

2. «Функції належності» являє собою бібліотеку аналітичних залежностей та параметрів функцій належностей, якими формалізуються лінгвістичні терми з нечітких правил.

3. Бібліотека правил типу «Якщо–То» являє собою сукупність експертних лінгвістичних правил, які формалізовані засобами теорії нечітких множин.

4. «Блок логічного висновку» визначає значення вихідної змінної у вигляді нечіткої множини (\tilde{Y}).

5. «Дефаззіфікація» перетворює нечіткий розв’язок (\tilde{Y}) у чіткий (Y).

6. У відповідності до [104] нечіткий висновок проводиться за системою нечітких логічних рівнянь (формули (3.9)–(3.17)), які будують-

ся по нечітких базах знань (додаток А). За допомогою нечітких рівнянь розраховуються ступені належностей різних показників міцності бетонного виробу при фіксованих значеннях вхідних параметрів.

Навчання нечіткої моделі полягає в знаходженні таких її параметрів, що мінімізують розбіжність між експериментальними даними та модельними результатами. Згідно з [16] в нечіткій моделі настроюють параметри функцій належності термів та вагові коефіцієнти нечітких правил.

В якості критерію навчання обрана величина середньоквадратичної похибки Root Mean Square Error (*RMSE*), яка знаходиться при навчанні моделі

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{r=1, n} (y_r - f_{(y)}(y1, y2, x9, x10))^2} \rightarrow \min, \quad (3.18)$$

де y_r – експериментальні значення міцності бетонного виробу r -ї навчальної (тестової) вибірки [126]; $f_{(y)}(y1, y2, x9, x10)$ – значення прогнозованої міцності бетонного виробу за результатом віртуального експерименту по нечітких базах знань; n – кількість пар вихідних даних у навчальній(тестовій) вибірці.

Задача адаптації моделі (формула (3.18)) може бути розв’язана за допомогою різноманітних технологій оптимізації серед яких найчастіше застосовуються метод найшвидшого спуску, квазін’ютонівські та генетичні алгоритми [126].

Навчання базувалось на даних масиву експериментальної вибірки [126], причому навчальна вибірка математичної моделі складалась із 264 результатів випробувань міцності бетону на стиск при заданих компонентах бетонної суміші у віці від 1 до 28 діб. Тестова вибірка математичної моделі складалась із 159 даних.

3.3 Перевірка здатності адаптованої математичної моделі прогнозування міцності бетонного виробу до навчання

Навчання математичної моделі проектування прогнозованої міцності бетону було виконано із застосуванням пакету «Fuzzy Logic Toolbox», комплексу «MATLAB», в якому нечіткий логічний висновок по нечітких базах знань виконано за алгоритмом [16], використовуючи критерій середньоквадратичної похибки (*RMSE*).

За результатами навчання моделі отримано прогнозовані міцності бетонного виробу за умови мінімальної середньоквадратичної похибки. На рис. 3.4, 3.5 наведено порівняння результатів математичного моделювання прогнозування міцності бетонного виробу для навчальної та тестової вибірок.

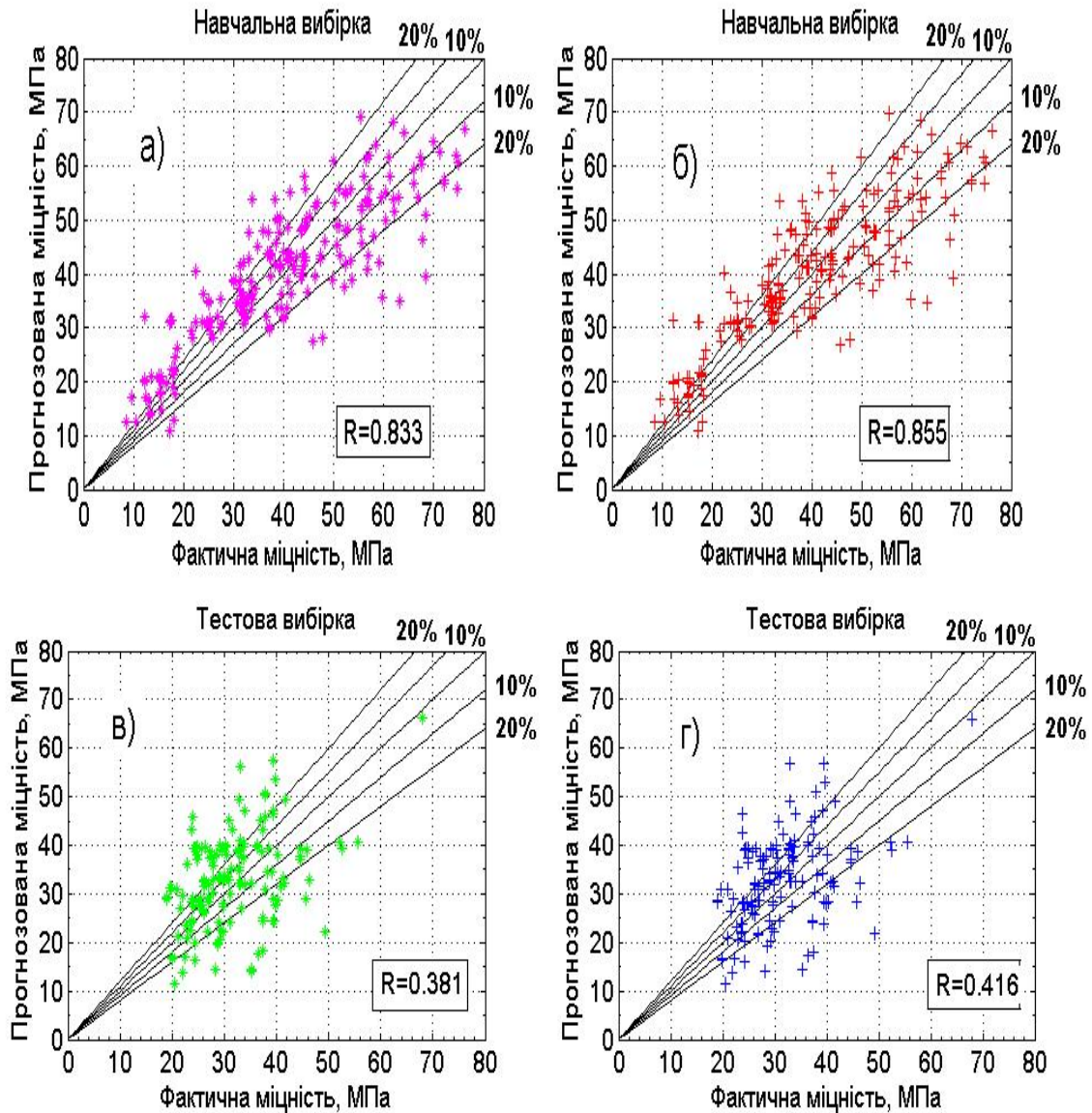


Рисунок 3.4 – Кореляційний зв'язок між величинами прогнозованої та фактичної міцностей бетонного виробу навчальної (а, б) та тестової (в, г) вибірок: а, в – до навчання, б, г – після навчання

Для навчальної вибірки коефіцієнт кореляції між величиною міцності бетонного виробу, визначеної експериментальним шляхом, та розрахованою за побудованою моделлю, становить $R = 0,855$.

Аналізуючи результати моделювання з'ясовано, що величина середньоквадратичної похибки відхилення величини прогнозованої та експериментальної міцностей після навчання, в результаті проходження 60-ти ітерацій зменшилась з 14,8 МПа до 9,1 МПа, що свідчить про здатність моделі до адаптації [127].

Результати розбіжності між отриманими значеннями прогнозованої міцності при навчанні запропонованої моделі наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розбіжності при навчанні моделі прогнозованої міцності бетонного виробу з використанням нечіткої логіки та лінгвістичних змінних

Вибірки	Діапазон відхилення, %	До навчання, %	Після навчання, %
Навчальна вибірка	10	35,23	37,12
	20	67,05	65,53
Тестова вибірка	10	21,38	20,12
	20	45,91	47,17

За результатами аналізу даних табл. 3.2 можна зробити висновок, що після навчання моделі точність прогнозування на навчальній вибірці підвищилася майже на 1,9 % в 10-ти відсотковому діапазоні та майже на 1,3 % в 20-ти відсотковому діапазоні розбіжностей.

На рис. 3.5 показано графік зміни середньоквадратичної похибки при навчанні моделі.

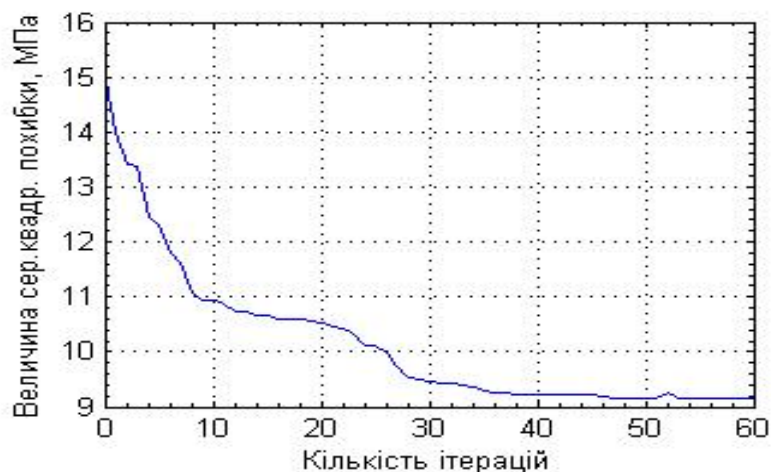


Рисунок 3.5 – Динаміка зміни величини середньоквадратичної похибки при адаптації моделі, в одиницях тиску

Аналізуючи динаміку навчання моделі (див. рис. 3.5), можна зробити припущення про здатність моделі до адаптації, оскільки прослідковується різке зниження величини середньоквадратичної похибки при 30-ти ітераціях, та асимптотична полога ділянка на кривій графіка після 40 ітерацій.

Очевидно, що подальше зменшення величини середньоквадратичної похибки буде відбуватись лише при зміні правил баз знань для лінгвістичних змінних y_1 , y_2 , Y (додаток А) або зміні алгоритму оптимізації дерева логічного висновку (див. рис. 3.3).

3.4 Перевірка адекватності математичної моделі прогнозування міцності бетонних виробів методом парних порівнянь Сааті

Для перевірки адекватності методики проектування бетонних виробів із заданими властивостями методом парних порівнянь за Сааті [128] побудована трирівнева ієрархічна модель [129], що відображає вплив головних чинників впливу на кінцеву мету (рис. 3.6).

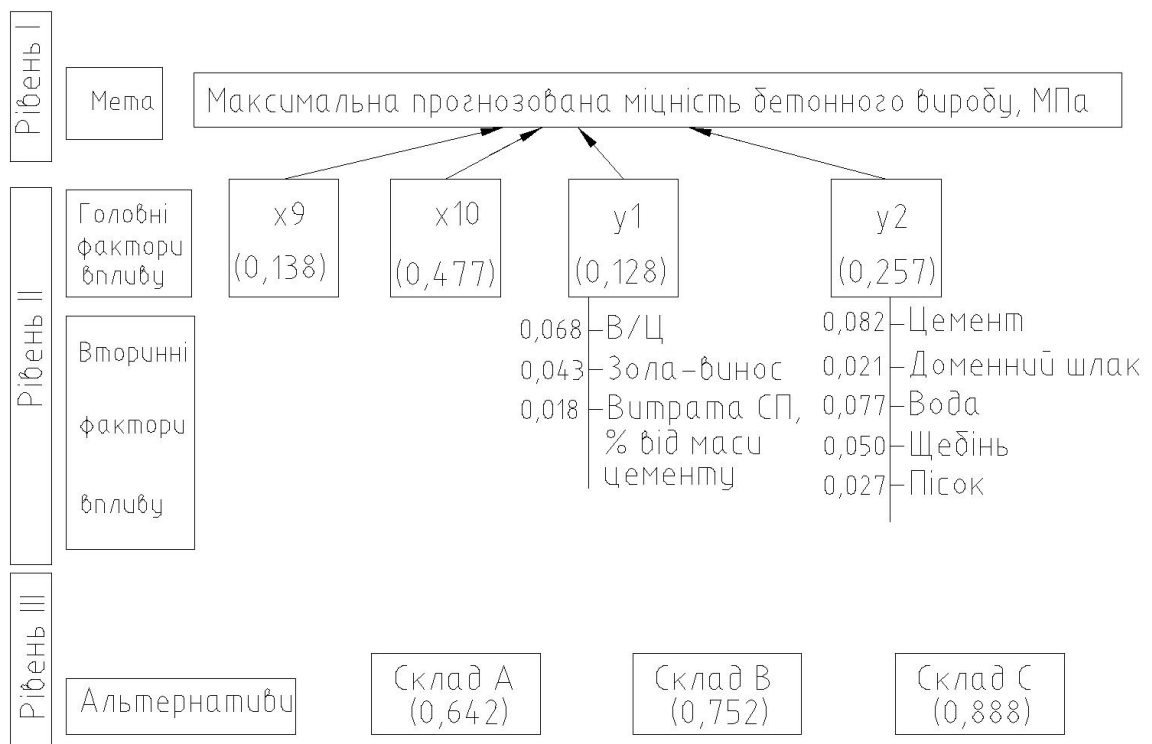


Рисунок 3.6 – Ієрархічна модель для вибору складу бетонної суміші серед трьох альтернатив при проектуванні бетонного виробу із заданою міцністю

Шляхом парних порівнянь за Сааті було виявлено вагу переваг кожного з головних факторів впливу на прогнозовану міцність бетонних виробів y_1, y_2, x_9, x_{10} (див. табл. 3.1).

Кожний із головних факторів впливу y_1, y_2, x_9, x_{10} являє собою матрицю [129], що заповнюється відповідно до формули (3.19), де r_1, r_2, r_3, r_n – відповідні величини пріоритетів оцінюваних параметрів матриці. За відомими елементами рядка матриці (формула (3.19)) визначають елементи всіх інших рядків. Довільний елемент $a_{ij} = r_i/r_j$, при відомих елементах $a_{kj} = r_k/r_j, k, i = \overline{1, n}$ певного n -го рядка, обчислюється як $a_{ij} = a_{kj} / a_{ki}, i, j, k = \overline{1, n}$.

Вектор переваг кожного оцінюваного параметра, що впливає на прогнозовану міцність бетону, знаходився як середнє геометричне елементів кожного рядка матриці, поділене на суму всіх середніх геометричних для оцінюваних параметрів за такою формулою [128]:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{r_1}{r_2} & \frac{r_1}{r_3} & \dots & \frac{r_1}{r_n} \\ \frac{r_2}{r_1} & 1 & \frac{r_2}{r_3} & \dots & \frac{r_2}{r_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{r_n}{r_1} & \frac{r_n}{r_2} & \frac{r_n}{r_3} & \dots & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.19)$$

$$\sqrt[n]{1 \times \frac{r_1}{r_2} \times \frac{r_1}{r_3} \times \dots \times \frac{r_1}{r_n}} = m_1. \quad (3.20)$$

Далі знаходять вектор переваг для першого рядка матриці (формула (3.19)) з урахуванням середніх геометричних елементів кожного з рядків за залежністю

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = x_1, \quad (3.21)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – вектор переваг, відповідно, першого, другого, n -го рядка матриці.

Аналогічно визначаються компонент власного вектора та вектор переваг для інших m_n рядків. В якості множини відносних ваг альтернатив пропонується використовувати компоненти власного вектора, що відповідає максимальному характеристичному числу λ_{\max} [128]. Для неузгодженої матриці завжди $\lambda_{\max} \geq n$.

В якості показника ступеня узгодженості елементів матриці A (формула (3.19)) використовується величина індексу узгодженості (consistency index – CI) [128]:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1). \quad (3.22)$$

Для оцінки достатності ступеня узгодженості використовується відношення узгодженості (consistency ratio – CR), яке дорівнює

$$CR = CI / RI, \quad (3.23)$$

де RI – випадковий індекс узгодженості (random index), математичне очікування випадкового індексу узгодженості, обчислене на великій вибірці випадковим чином згенерованих обернено симетричних матриць парних порівнянь, елементами яких є числа з фундаментальної шкали абсолютних значень для оцінки сили судження [109].

Рекомендується результуючий вектор щодо ваг переваг певної матриці парних порівнянь вважати прийнятним, якщо CR рівне 0,10 (але не перевищує 0,20). Заповнення та знаходження всіх компонентів матриці, а саме власного вектора λ_{\max} , індексу узгодженості матриці парних порівнянь CI , а також відносної узгодженості матриці парних порівнянь CR наведено на прикладі матриці «Коефіцієнт ущільнення» (табл. 3.3, 3.4).

Таблиця 3.3 – Матриця парних порівнянь

Коефіцієнт ущільнення				Вектор переваг (x_i)
	Склад A	Склад B	Склад C	
Склад A	1	1/2	1/3	0,163
Склад B	2	1	1/2	0,297
Склад C	3	2	1	0,540

Таблиця 3.4 – Визначення власного вектору матриці, індексу та відношення узгодженості

Характеристика	Значення
Характеристичне число матриці, λ_{\max}	3,009
Індекс узгодженості, CI	0,005
Відношення узгодженості, CR	0,009

В цій матриці у кожному комірку записано експертні оцінки переваги однієї марки цементу над іншою за 9-бальною шкалою Сааті [109]. При цьому заповнення матриці (див. табл. 3.3) ведеться у такому порядку: числа більше одиниці виставляються у комірку, якщо оцінюва-

ний параметр зліва має перевагу за оцінюваним критерієм над параметром, що знаходиться зверху над ним. Навпаки, числа менше одиниці ставляться у відповідні комірки, якщо оцінюваний параметр зліва має нижчу перевагу за оцінюваним критерієм над параметром, що знаходиться зверху над ним. Після цього кожний локальний вектор переваг кожного із вторинних факторів впливу матриць (блоків) y_1 , y_2 множитья на глобальний вектор переваги блока у головній матриці, що можна пояснити на прикладі матриці «Коефіцієнт ущільнення»

для складу бетонної суміші А: $0,163 \cdot 0,477 = 0,078$;

для складу бетонної суміші В: $0,297 \cdot 0,477 = 0,142$;

для складу бетонної суміші С: $0,540 \cdot 0,477 = 0,257$.

Причому числа 0,138, 0,477, 0,128, 0,257, що знаходяться у дужках нижче назви кожного з головних факторів впливу (див. рис.3.6) – головні вектори переваг, що отримані для головних факторів впливу за аналогічним принципом, що й для матриці «Коефіцієнт ущільнення».

В свою чергу кожний із факторів y_1 , y_4 складається з вторинних факторів впливу. Кожний вторинний фактор впливу оцінюється відповідними кількісними або якісними нечіткими термами для оцінки лінгвістичних змінних [129]. За допомогою методу парних порівнянь Сааті для цих факторів також будується матриця із знаходженням векторів переваг одного терму над іншим. Числа навпроти з кожного із вторинних факторів впливу (див. рис.3.6), наприклад, для матриці y_1 : (0,068 – В/Ц, 0,043 – зола-винос, 0,018 – супепластифікатор) – добуток локального вектора переваг кожного з вторинних факторів матриці y_1 на її глобальний вектор переваг (0,128). Таким же чином, за аналогією з прикладом визначення всіх перелічених величин у матриці «Коефіцієнт ущільнення», знаходяться всі ваги векторів переваг для решти матриць та факторів впливу. Вихідні дані для отримання інтегрального критерію міцнісної переваги III рівня для трьох складів бетонної суміші з використанням експертних даних [9] наведено у табл. 3.5. Виконана формалізація та ієрархічна класифікація факторів (див. рис.3.6) дозволяє кількісно оцінити перевагу одного класу бетону над іншим шляхом кількісного порівняння інтегрального критерію міцнісної переваги.

В результаті чисельного експерименту, використовуючи метод парних порівнянь Сааті, отримано інтегральні критерії міцнісної переваги (див. рис. 3.6), а саме 0,642 для складу бетонної суміші А, 0,752 для складу В та 0,888 для складу С, відповідно.

Таблиця 3.5 – Визначення інтегрального критерію міцнісної переваги між складами бетонної суміші А, В та С на основі парних порівнянь

Альтернативи складів бетонної суміші	Параметр пластичності, y_1			Параметр витрати, y_2					x_9	x_{10}	Цільова функція, Y	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8				
	В/Ц	Зола-винос, кг/м ³	Суперпластифікатор, % від маси цементу	Цемент, кг/м ³	Доменний шлак, кг/м ³	Вода, кг/м ³	Щебінь, кг/м ³	Пісок, кг/м ³				
Склад А	0,72	173,5	3,7	173,5	50,1	124,8	1006,2	793,5	28	0,7	38,20	0,642
Склад В	0,62	24,5	3,2	213,7	98,1	131,7	1065,8	785,4	28	0,8	45,71	0,752
Склад С	0,40	94,0	3,7	387,0	20,0	157,0	938,0	845,0	28	0,9	50,24	0,888

Отримані результати (див. табл. 3.5) є кількісним відображенням запропонованого критерію міцнісної переваги для одного складу бетону відносно другого та дозволяють оцінити питому вагу впливу кожного складового фактора моделі на кінцеву проектну міцність бетонного виробу. Це є підтвердженням адекватності моделі прогнозування міцності виробу з використанням теорії нечіткої логіки та лінгвістичних змінних й достовірності і доцільності запропонованої експертно-моделювальної системи.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ У ВИРОБНИЦТВО

4.1 Експериментальні дослідження розподілу бокового тиску в ущільнюваній суміші по висоті бетонного виробу

На сьогодні існують деякі розбіжності щодо визначення коефіцієнта бокового тиску та відповідно характеру розподілу тиску по висоті виробу під час пресування бетонної суміші [68, 86, 135, 136]. Характер залежностей, запропонованих у працях вищезазначених авторів, не в повній мірі відображає вплив пластифікуючих добавок та вібрування, що передує пресуванню бетонної суміші. В зв'язку з цим актуальним є експериментальне визначення розподілу бокового тиску в масиві бетонної суміші по висоті прес-форми, а також вплив пластифікаторів на характер розподілу тиску.

Для знаходження параметрів розподілу тиску, а саме коефіцієнта бокового тиску та величини його затухання, запропоновано експериментальну установку [22, 25, 26].

Експериментальні дані отримано для бетонних сумішей з додаванням пластифікаторів Поліпласт СП-3 та Релаксол СУПЕР ПК максимальної концентрації (0,5 % та 1,5 % від маси цементу, відповідно) та без пластифікатора для врахування його впливу на розподіл бокового тиску.

Склади всіх досліджуваних сумішей наведені у табл. 4.1–4.7. Попереднє вібрування бетонної суміші на вібростолі у прес-формі тривало протягом 40–120 с, після чого відбувалось пресування суміші на пресі П-125. Амплітуда вібростола 0,5 мм при частоті 50 Гц.

Розподіл тиску вимірювався по висоті бетонного виробу в часі для кожного з реєструвальних сенсорів. Для визначення залежностей розподілу тиску проведено серію експериментів з різними складами бетону з додаванням хімічних добавок широкого спектру дії (Релаксол СУПЕР ПК, Поліпласт СП-3), причому бетонна суміш попередньо ущільнювалась штикуванням.

Для визначення впливу пластифікуючих добавок, часу вібрування, В/Ц співвідношення на величину затухання бокового тиску було виконано серію експериментів.

Таблиця 4.1 – Склад бетонної суміші А (без пластифікаторів)

№ п/п	Назва компонента	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
1	Цемент	400	2,40	штикування
2	Пісок	833	5,00	
3	Щебінь (фракція10...20)	1000	6,00	
4	Вода	200	1,20	
Клас бетону за міцністю на стиск			C16/20	
Марка за водонепроникністю			W2	
Марка за морозостійкістю			F100	

Таблиця 4.2 – Склад бетонної суміші Б (без пластифікаторів)

№ п/п	Назва компонента	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
1	Цемент	450	2,7	штикування
2	Пісок	680	4,08	
3	Щебінь (фракція10...20)	1120	6,72	
4	Вода	159	0,94	
Клас бетону за міцністю на стиск			C20/25	
Марка за водонепроникністю			W4	
Марка за морозостійкістю			F75	

Таблиця 4.3 – Склад бетонної суміші В (без пластифікаторів)

№ п/п	Назва компонента	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
1	Цемент	278	1,67	штикування
2	Пісок	922	5,53	
3	Щебінь (фракція10...20)	1022	6,13	
4	Вода	180	1,08	
Клас бетону за міцністю на стиск			C12/15	
Марка за водонепроникністю			W2	
Марка за морозостійкістю			F75	

Таблиця 4.4 – Склад бетонної суміші Е (з пластифікатором)

№ п/п	Назва компоненту	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
1	Цемент	400	2,40	штикування

Продовження табл. 4.4

№ п/п	Назва компоненту	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
2	Пісок	833	5,00	
3	Щебінь (фракція 5...10)	1000	6,00	
4	Вода*	220	1,32	
5	Суперпластифікатор Поліпласт СП-3	1,25л	0,007л	
Клас бетону за міцністю на стиск			C16/20	
Марка за водонепроникністю			W4	
Марка за морозостійкістю			F100	

Примітка:* – з урахуванням водоредукуючого впливу суперпластифікатора

Таблиця 4.5 – Склад бетонної суміші К (без пластифікаторів)

№ п/п	Назва компоненту	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
1	Цемент	400	2,40	Вібрування на вібростолі 120 с.
2	Пісок	833	5,00	
3	Щебінь (фракція 5-10)	1000	6,00	
4	Вода	200	1,20	
Клас бетону за міцністю на стиск			C16/20	
Марка за водонепроникністю			W4	
Марка за морозостійкістю			F100	

Таблиця 4.6 – Склад бетонної суміші Л (з пластифікатором)

№ п/п	Назва компоненту	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
1	Цемент	480	2,88	Вібрування на вібростолі 80 с.
2	Пісок	560	3,36	
3	Щебінь(фракція5-20)	1178	7,07	
4	Вода*	145	0,87	
5	Суперпластифікатор Релаксол СУПЕР ПК	3,75 л	0,0225л	
Клас бетону за міцністю на стиск			C20/25	
Марка за водонепроникністю			W6	
Марка за морозостійкістю			F200	

Примітка:* – з урахуванням водоредукуючого впливу суперпластифікатора

Таблиця 4.7 – Склад бетонної суміші М (з пластифікатором)

№ п/п	Назва компоненту	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
1	Цемент	322	1,93	Вібрування

Продовження табл. 4.7

№ п/п	Назва компоненту	Витрата на 1м ³ , кг	Витрата на 0,006 м ³ , кг	Тип ущільнення
2	Пісок	665	3,99	на вібростолі 40 с.
3	Щебінь(фракція5-20)	1250	7,50	
4	Вода*	148	0,89	
5	Суперпластифікатор Релаксол СУПЕР ПК	3,75 л	0,0225л	
Клас бетону за міцністю на стиск			C12/15	
Марка за водонепроникністю			W4	
Марка за морозостійкістю			F100	

Примітка:* – з урахуванням водоредукуючого впливу суперпластифікатора

Характер руйнування бетонного виробу при ущільненні після розпалублення (рис. 4.1) та кількість віджатої води після пресування (рис. 4.2) залежить від початкового водоцементного співвідношення – з урахуванням впливу суперпластифікатора, типу заповнювача (щебінь, гравій), режиму пресування.



Рисунок 4.1 – Характер ущільненої структури спресованого бетону після розпалублення

На рис. 4.3 показано процес передачі бокового тиску на реєструвальні сенсори.



Рисунок 4.2 – Віджата вода ущільненої статичним пресуванням суміші

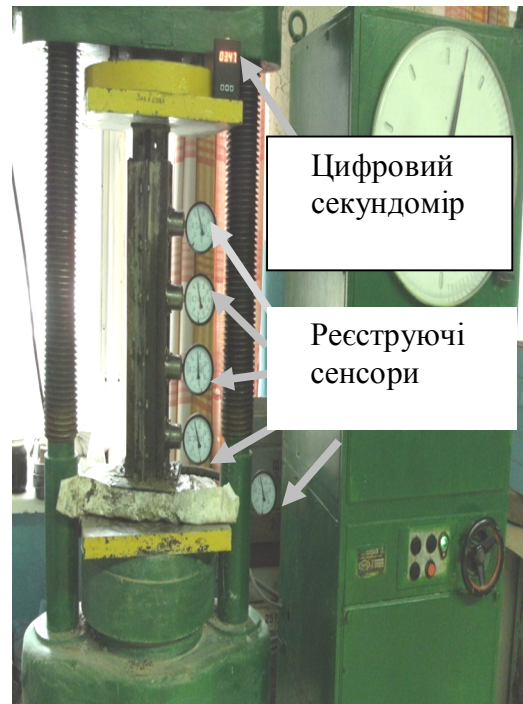


Рисунок 4.3 – Фіксація розподілу бокового тиску в часі по висоті прес-форми

Аналіз рис. 4.2 свідчить про незначну кількість (близько 10 %) віджатої води після пресування бетонної суміші, що зумовлено фізичними процесами які відбуваються під час її впакування та ущільнення під дією пресувального зусилля.

4.2 Аналіз результатів досліджень розподілу бокового тиску

4.2.1 Аналіз результатів досліджень розподілу бокового тиску по висоті бетонного виробу для невіброваних сумішей

В результаті обробки експериментальних даних отримано закономірності розподілу тиску по висоті бетонного виробу в часі по кожному з сенсорів, а також характер зміни тиску по висоті прес-форми від заданого навантаження для бетонних сумішей з різним значенням В/Ц (склади А, Б, Е, див. табл. 4.1, 4.2, 4.4) при застосуванні пластифікуючих добавок Релаксол СУПЕР ПК, Поліпласт СП-3, без попереднього вібрування суміші.

На рис. 4.4 зображено розподіл тиску в бетонних сумішах без додавання пластифікаторів для різних значень пресувального тиску.

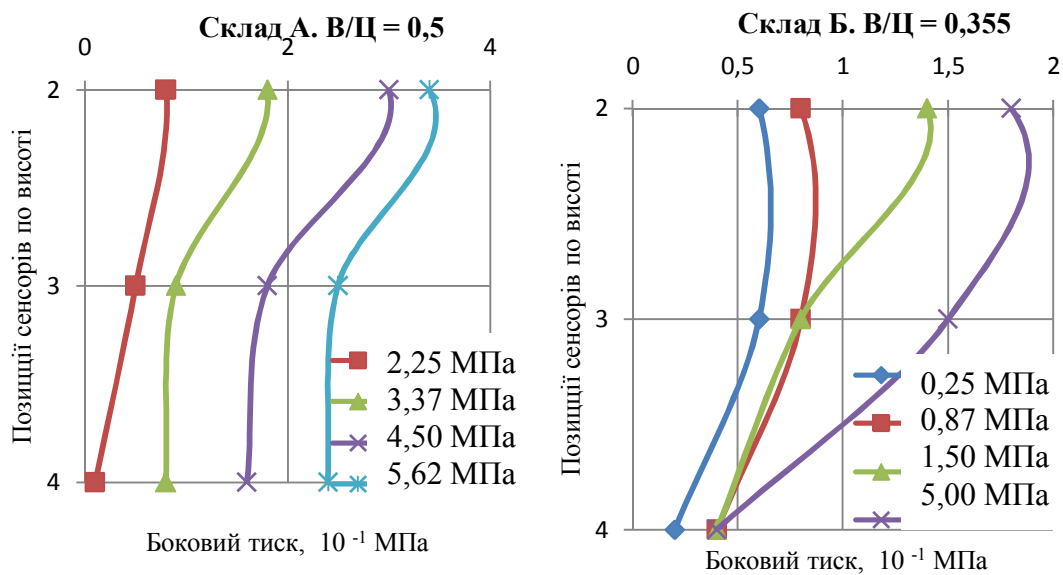


Рисунок 4.4 – Розподіл тиску в бетонних сумішах без додавання пластифікуючих добавок

Аналіз результатів досліджень розподілу тиску в бетонних сумішах без додавання пластифікаторів (див. рис.4.4) свідчить, що зменшення В/Ц збільшує інтенсивність падіння тиску по висоті.

Аналіз порівняння графіків розподілу бокового тиску показав, що вплив пластифікаторів на характер розподілу тиску в суміші неявний. Виявлено, що інтенсивність затухання тиску по висоті бетонних сумішей залежить від величини тиску пресування. Так, із зростанням тиску на пуансон прес-форми інтенсивність затухання бокового тиску зростає. Це можна пояснити більш міцною консолідацією частинок бетонної суміші, внаслідок чого відбуваються значні втрати пресувального тиску на подолання сил внутрішнього тертя та тертя по боковій стінці прес-форми.

На рис. 4.5 зображено зведений графік опору пресувальному тиску для бетонних сумішей складів В, Е.

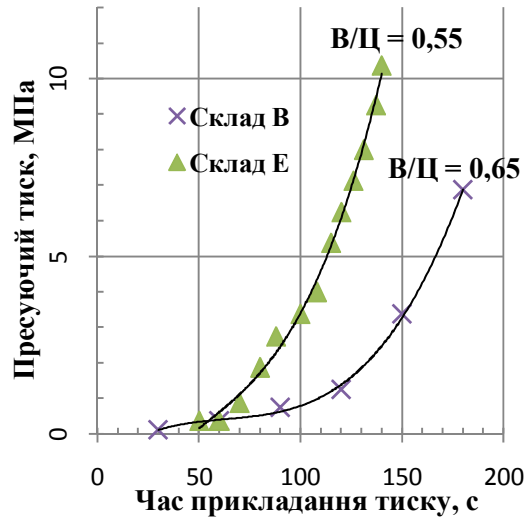


Рисунок 4.5 – Характер опору пресувальному тиску для невіброваних звичайних бетонних сумішей

Аналіз даних (див. рис. 4.5) свідчить про те, що склад суміші Е (див. табл. 4.4) з меншим значенням В/Ц має більший опір стискаючим зусиллям пуансона прес-форми, що корелюється з уявленням про деформативність більш щільної структури [9, 54, 77].

Для бетонних сумішей складів В, Е опір пресувальному тиску можна описати кубічним поліномом з величиною достовірності апроксимації, близькою до одиниці. Це свідчить про адекватність апроксимації. Для бетонної суміші складу В з величиною достовірності апроксимації $R^2 = 0,998$ функція зусилля на пуансон установки $P_{\text{прес}}$ залежить від аргументу часу прикладання тиску $\tau_{\text{прес}}$ як

$$P_{\text{прес}} = 0,0037\tau_{\text{прес}}^3 - 0,7\tau_{\text{прес}}^2 + 49,493\tau_{\text{прес}} - 833,33. \quad (4.1)$$

Для бетонної суміші складу Е з величиною коефіцієнта достовірності апроксимації $R^2 = 0,995$ функція зусилля на пуансон установки $P_{\text{прес}}$ залежить від аргументу часу прикладання тиску $\tau_{\text{прес}}$ як

$$P_{\text{прес}} = 0,0084 \tau_{\text{прес}}^3 - 1,2798 \tau_{\text{прес}}^2 + 110,13 \tau_{\text{прес}} - 3175,3. \quad (4.2)$$

Дослідження різних режимів пресування в запропонованій установці дозволяє отримати кількісні та якісні реологічні та фізико-механічні характеристики бетонних сумішей, які використовуються при виробництві пресованих дорожніх каменів.

4.2.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень розподілу тиску по висоті бетонного виробу для сумішей з попереднім вібруванням

Експериментальна установка із заповненою бетонною сумішшю перед вібруванням на вібростолі показана на рис. 4.6. На рис. 4.7 зображена розпалублена форма після зняття тиску, з візуальним спостереженням величини відносної деформації після зняття тиску.

В результаті експериментів виявлено, що при ущільненні сумішей з попереднім вібруванням виникає незначна відносна деформація виробу по висоті $\Delta h = h_{\text{п}} - h_{\text{к}}$, де $h_{\text{п}}$ – висота прес-форми, $h_{\text{к}}$ – висота суміші після пресування. Наприклад, для складу бетонної суміші без пластифікатора відносна деформація $\Delta h = 0,065$ м, що не перевищує 11 %. При пресуванні без вібрування відносна деформація більше 16 % [46, 134].

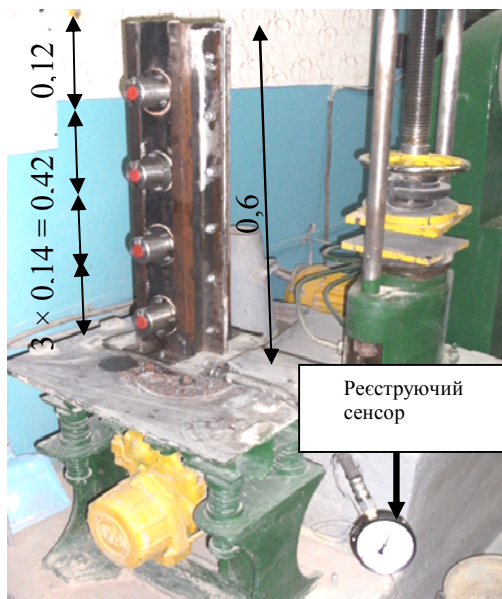


Рисунок 4.6 – Вібрування бетонної суміші на вібростолі перед пресуванням



Рисунок 4.7 – Величина відносної деформації вібропресованого бетону після розпалублення форми

Це можна пояснити більш щільною структурою цементного каменю після вібрування, коли видаляється затиснуте в суміш повітря, та пористою структурою, що має значну кількість втягнутого повітря у випадку без попереднього вібрування.

Розподіл тиску по висоті виробу в різних складах бетонних сумішей з попереднім вібруванням для різних значень величини пресувального тиску зображено на рис. 4.8, 4.9.

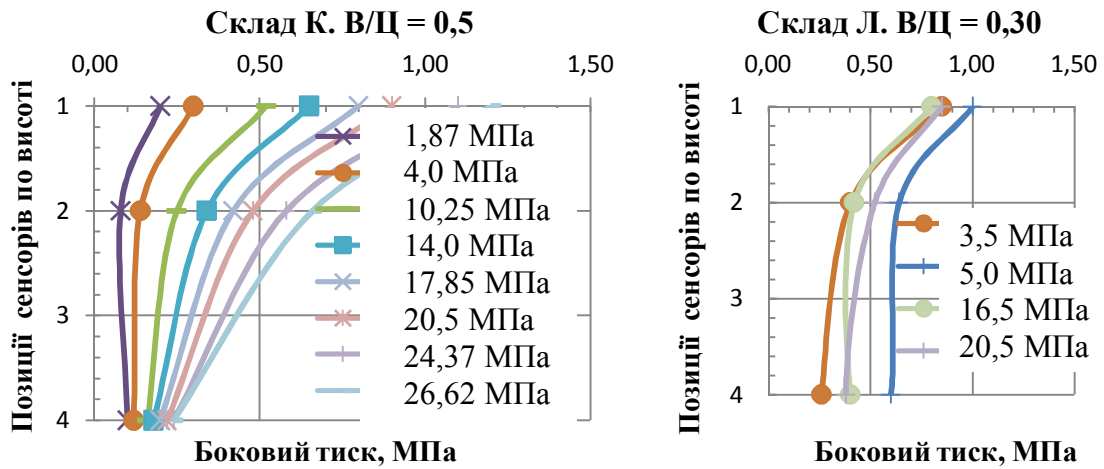


Рисунок 4.8 – Розподіл тиску по висоті бетонного зразка після попереднього вібрування бетонної суміші для складів К, Л

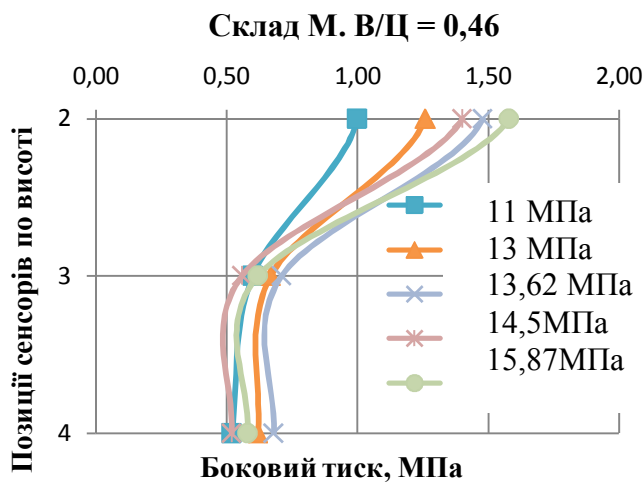


Рисунок 4.9 – Розподіл тиску по висоті бетонного зразка після попереднього вібрування бетонної суміші для складу М

Аналіз наведених закономірностей розподілу бокового тиску у попередньо віброваних сумішах складів К, Л, М (див. рис. 4.8, 4.9) свідчить про його затухаючий по висоті характер. Так, для складу бетонної суміші К (див. рис. 4.8) без пластифікатора, як і для складів бетонної суміші Л, М (див. рис. 4.8, 4.9) з суперпластифікатором Релаксол СУПЕР ПК характерне суттєве падіння тиску по висоті незалежно від вмісту пластифікатора.

На рис. 4.10 наведено зведений графік опору пресувальному тиску для складів віброваних (К, М) та невіброваних сумішей (В, Е), а саме: В – суміш без пластифікатора; Е – суміш з пластифікатором SP-3; К, М – вібровані суміші без та з пластифікатором.

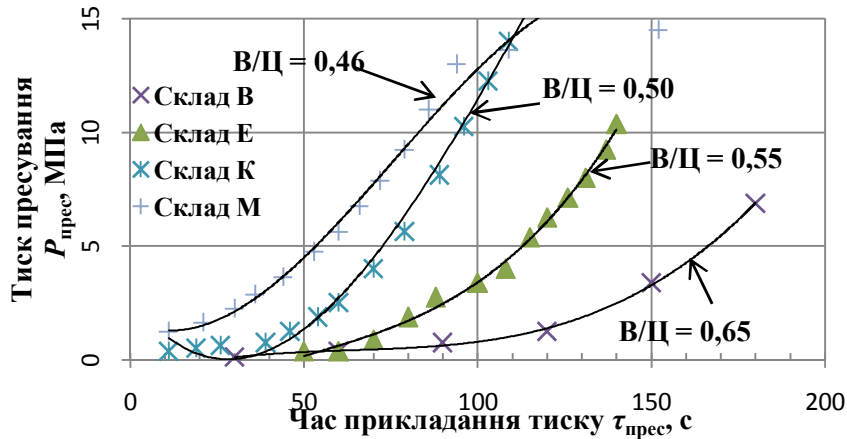


Рисунок 4.10 – Характер опору пресувальному тиску для невіброваних та віброваних звичайних попередньо віброваних бетонних сумішей

Інтенсивність опору пресувальному тиску для наведених складів бетонних сумішей (див. рис. 4.10) свідчить про зв'язок В/Ц з опором пресувальному тиску, а саме із зменшенням В/Ц опір тиску пресування вищий. Апроксимація залежностей виражена кубічним поліномом з достатньою для подальших інженерних розрахунків технологічних параметрів пресування величиною достовірності апроксимації. Фізичний зміст коефіцієнтів при аргументах полінома (табл. 4.8) може бути приведений в результаті регресійного аналізу щодо розподілу бокового тиску в прес-формі. Апроксимуючі рівняння опору пресувальному тиску в часі для складів бетонних сумішей В, Е, К, М (див. табл. 4.1–4.7) наведено у табл.4.8.

Таблиця 4.8 – Рівняння апроксимацій опору пресуючому тиску в бетонних сумішах при різному значенні В/Ц

Склад	В/Ц	Апроксимація	Коеф. достовірності апроксимації, R^2
В	0,65	$P_{\text{прес}} = 0,0037\tau_{\text{прес}}^3 - 0,7\tau_{\text{прес}}^2 + 49,493\tau_{\text{прес}} - 33,33$	$R^2 = 0,998$

Продовження табл. 4.8

Склад	В/Ц	Апроксимація	Коеф. достовірності апроксимації, R^2
Е	0,55	$P_{\text{прес}} = 0,0084\tau_{\text{прес}}^3 - 1,2798\tau_{\text{прес}}^2 + 110,13\tau_{\text{прес}} - 3175,3$	0,995
К	0,50	$P_{\text{прес}} = -0,011\tau_{\text{прес}}^3 + 3,9319\tau_{\text{прес}}^2 - 194,63\tau_{\text{прес}} + 2639,7$	0,998
М	0,46	$P_{\text{прес}} = -0,014\tau_{\text{прес}}^3 + 3,188\tau_{\text{прес}}^2 - 67,776\tau_{\text{прес}} + 1669,4$	0,988

Функціональний зв'язок стискаючого зусилля, прикладеного до пуансону установки $P_{\text{прес}}$, з аргументом часу прикладання тиску $\tau_{\text{прес}}$ виражається поліномом третього ступеня.

4.3. Чисельно-аналітичні дослідження розподілу бокового тиску по висоті ущільнюваної бетонної суміші

В роботах [12, 66, 68] не досліджено вплив пластифікуючих добавок та попереднього вібрування на процес розподілу тиску по висоті масиву бетонної суміші при її ущільненні. Попередні експериментальні випробовування (В/Ц = 0,3...0,65) показали, що додавання пластифікатора суттєво не впливає на зміну величини розподілу тиску по висоті суміші у прес-формі. Аналіз отриманих попередніх результатів дозволив зробити припущення, що значення величини цільової функції – боковий тиск $P_{\text{бок}}$ на глибині h – є функцією

$$P_{\text{бок}} = f(\text{В/Ц}, \tau_{\text{вібр}}, P_{\text{прес}}), \quad (4.3)$$

де В/Ц – водоцементне відношення суміші, що ущільнюється; $\tau_{\text{вібр}}$ – тривалість попереднього вібрування бетонної суміші, с; $P_{\text{прес}}$ – тиск пресування бетонної суміші, МПа.

Дослідження впливу вищезазначених параметрів на розподіл тиску по висоті бетонного виробу пов'язано із значною кількістю експериментальних випробувань. Рівняння регресії для цільової функції – розподілу тиску в масиві бетонної суміші – можуть бути отримані за результатами повнофакторного експерименту типу 2^k , де k – кількість впливаючих факторів відповідно до методу Бокса-Уілсона [98]. Діапа-

зон варіювання впливаючих факторів рівняння (4.3) обирається таким чином, щоб не повторювались в сукупності будь-яких визначених для експерименту діапазонах, міг бути відтворений експериментально та не приводив до протиріч. Шляхом проведення експериментальних досліджень необхідно виявити область, де сполучення рівнів факторів стійко реалізовувались. Оскільки параметри правої частини рівняння (4.3) мають різну розмірність, проведено їх кодування для адекватного зображення поверхні відгуку шляхом лінійного перетворення факторного простору. Встановлено такий діапазон значень для параметрів правої сторони рівняння (4.3): -1 – мінімальне, 0 – проміжне, $+1$ – максимальне, $(+1,682, -1,682)$ – зіркові значення, загальна кількість експериментів N дорівнює 20 [98].

Істинні значення факторів, що визначені на основі проведених пошукових експериментів, наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	$-1,682$	-1	0	$+1$	$+1,682$	
x_1 – В/Ц суміші	0,3	0,34	0,475	0,46	0,65	0,146
x_2 – тривалість попереднього вібрування, с	0	20	50	80	100	30
x_3 – тиск пресування, МПа	0,25	2,225	5,125	8,025	10	2,90

Для проведення повнофакторного експерименту з врахуванням трьох факторів типу 2^3 було складено матриці планування експериментів, які наведено у додатку В. Заплановано отримати такі регресійні моделі 2-го порядку [3]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (4.4)$$

де y – шукана цільова функція $P_{\text{бок}}$; $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії.

Для визначення коефіцієнтів $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ використано метод найменших квадратів. Адекватність регресійних моделей перевірялася за критерієм Фішера.

Для забезпечення достатньої достовірності отриманих результатів необхідно для кожного виду експерименту провести кількість експериментів не менше ніж визначено за формулою [98]

$$N = \frac{V^2 t^2}{P^2}, \quad (4.5)$$

де t – показник достовірності; V – коефіцієнт мінливості досліджуваної величини; P – показник точності.

Згідно з рекомендаціями [123] довірча ймовірність $P_{\text{дов}}$ при нормуванні оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах 0,8...0,9. Для отримання довірчої імовірності правильності отриманих результатів $P_{\text{дов}} = 0,9$ показник достовірності має дорівнювати $t = 1,96$.

Отримані результати є репрезентативними, якщо точність не перевищує 5 %, тобто $P = 0,05$ [123]. Коефіцієнт мінливості при вимірюванні тиску пресування в заданому діапазоні не перевищує 6 %, тобто $V = 0,06$. Тоді необхідна кількість експериментів дослідження ущільнення суміші під дією тиску при виготовленні бетонних виробів при однакових умовах їх проведення $N = (0,06^2 \cdot 1,96^2) / 0,05^2 = 5,53$. Остаточно прийнято $N = 6$. Тобто для кожних нових умов при зміні будь-якого параметра системи, що впливає на процес ущільнення бетонної суміші, необхідно провести не менше шести експериментів.

Значимість коефіцієнтів регресії для моделі (4.2) проводилася за t_i -критерієм Ст'юдента [98]. Розрахункове значення критерію t_i порівнювалося з критичним, а саме, за умови $|t_i| \leq [t(f_2)]$, i -й коефіцієнт регресії вважався незначним, $[t(f_2)]$ – критичне значення t -критерію Ст'юдента, яке рівне значенню розподілу Ст'юдента. Отже, додатковою умовою адекватності регресійної моделі була умова про те, що у випадку отримання при всіх значимих коефіцієнтах розрахункових значень $|t_i| \leq [t(f_2)]$, рівняння регресії вважались некоректними.

Кількість повторних експериментів знаходилась за формулою Ст'юдента [98]:

$$n \geq \frac{1 + P_{\text{дов}} + 2n_{\text{відк}}}{1 - P_{\text{дов}}}, \quad (4.6)$$

де $n_{\text{відк}}$ – число вимірювань, що відкидається.

$$\text{Тоді при } n_{\text{відк}}=0, n \geq \frac{1 + (0,8 \dots 0,9)}{1 - (0,8 \dots 0,9)} = 9 \dots 19.$$

Для обробки експериментальних даних та виведення рівнянь регресії було застосовано програмне забезпечення, розроблене в ВНТУ, з використанням програмної оболонки Borland Delphi 5.0, а також комплекс «MATLAB».

В додатку В наведено матриці планування експерименту дослідження ущільнення бетонної суміші для цільової функції – боковий тиск $P_{\text{бок}}$, що реєструється сенсорами тиску СБ1–СБ4 на висоті 0,12, 0,26, 0,4 та 0,54 м, відповідно, від діючої площини пуансона; b_i – коефіцієнти при членах полінома (4.4) в кодованих значеннях, b_{ei} – коефіцієнти при членах полінома (4.4) в дійсних значеннях, t – значення критерію Ст'юдента.

Для функції відгуку – боковий тиск $P_{\text{бок}}$ на рівні сенсора СБ1 (див. табл. В.1 додатку В) рівняння регресії, згідно з проведеним повнофакторним експериментом для кодованих значень, має вигляд

$$P_{\text{бок}} = 0,31770 - 0,06222x_1 + 0,06176x_2 + 0,23951x_3 + 0,085x_1x_2 - 0,005x_1x_3 + 0,13x_2x_3 + 0,10726x_1^2 - 0,00237x_2^2 + 0,05775x_3^2. \quad (4.7)$$

Після відкидання незначних ефектів взаємодій рівняння регресії (4.7) в кодованих значеннях виглядає так:

$$P_{\text{бок}} = 0,31770 - 0,06222x_1 + 0,06176x_2 + 0,23951x_3 + 0,085x_1x_2 + 0,13x_2x_3 + 0,10726x_1^2 + 0,05775x_3^2. \quad (4.8)$$

Для дійсних значень кодованих факторів рівняння регресії для функції відгуку $P_{\text{бок}}$ має вигляд

$$P_{\text{бок}} = 6,46933 - 27,23398V/\Pi - 0,02423\tau_{\text{вібр}} - 0,05816P_{\text{прес}} + 0,04722V/\Pi \cdot \tau_{\text{вібр}} + 0,00144\tau_{\text{вібр}} \cdot P_{\text{прес}} + 29,79478V/\Pi^2 + 0,00642P_{\text{прес}}^2. \quad (4.9)$$

За аналогією до рівнянь (4.7)–(4.9), значення коефіцієнтів полінома (4.4) для функції відгуку $P_{\text{бок}}$, що отримано в результаті регресійного аналізу (додаток В), згруповано у табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Коефіцієнти рівняння полінома (4.4) для дійсних значень кодovаних факторів

Коефіцієнт b_{ei}	Фактор	тип	Отримане значення на рівні сенсорів			
			СБ1	СБ2	СБ3	СБ4
b_0		к*	0,31770	0,25289	0,21337	0,14677
		д*	6,46933	4,35618	3,99036	2,91215
b_1	(В/Ц)	к*	-0,06222	-0,04991	-0,04359	-0,02842
		д*	-27,23398	-20,34256	-18,78522	-12,23603
b_2	$(\tau_{\text{вiбр}})$	к*	0,06176	0,05191	0,05730	0,02842
		д*	-0,02423	-0,00193	-0,00141	-0,01095
b_3	$(P_{\text{прес}})$	к*	0,23951	0,21349	0,19392	0,10728
		д*	-0,05816	-0,00207	-0,00491	-0,02571
b_{12}	(В/Ц $\tau_{\text{вiбр}}$)	к*	0,08500	0,06500	0,045	0,03750
		д*	0,04722	0,00361	0,00250	0,02083
b_{23}	$(\tau_{\text{вiбр}} P_{\text{прес}})$	к*	0,13	0,11500	0,10500	0,06250
		д*	0,00144	0,00013	0,00012	0,00069
b_{11}	$(В/Ц)^2$	к*	0,10726	0,08699	0,08070	0,04824
		д*	29,79478	24,16270	22,41717	13,40095
b_{33}	$(P_{\text{прес}})^2$	к*	0,05775	0,05869	0,05595	0,02349
		д*	0,00642	0,00652	0,00622	0,00261

Примітка: к* – кодоване значення, д* – дійсне значення.

Значення коефіцієнта b_{13} для взаємодії факторів В/Ц· $P_{\text{прес}}$ та коефіцієнта b_{22} для фактору $\tau_{\text{вiбр}}^2$ виявилось менше граничного значення t -критерію Ст'юдента (додаток В).

Статистичні характеристики результатів регресійного аналізу по кожному із сенсорів СБ1–СБ4 наведено в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Статистичні характеристики результатів регресійного аналізу по розподілу бокового тиску по висоті прес-форми

Назва характеристики	Отримане значення на рівні сенсорів			
	СБ1	СБ2	СБ3	СБ4
Дисперсія відтворюваності, $S^2_{\text{вiдг}}$	0,002	0,001	0,002	0,0007
Дисперсія адекватності, $S^2_{\text{ад}}$	0,005	0,004	0,003	0,0012
Критерій Фішера, $[F] = 2,770$	2,728	2,589	2,03	1,599
Коефіцієнт кореляції, R^2	0,969	0,967	0,969	0,969

Поверхні відгуку для факторів (див. табл. 4.9) показано на рис. 4.11–4.15.

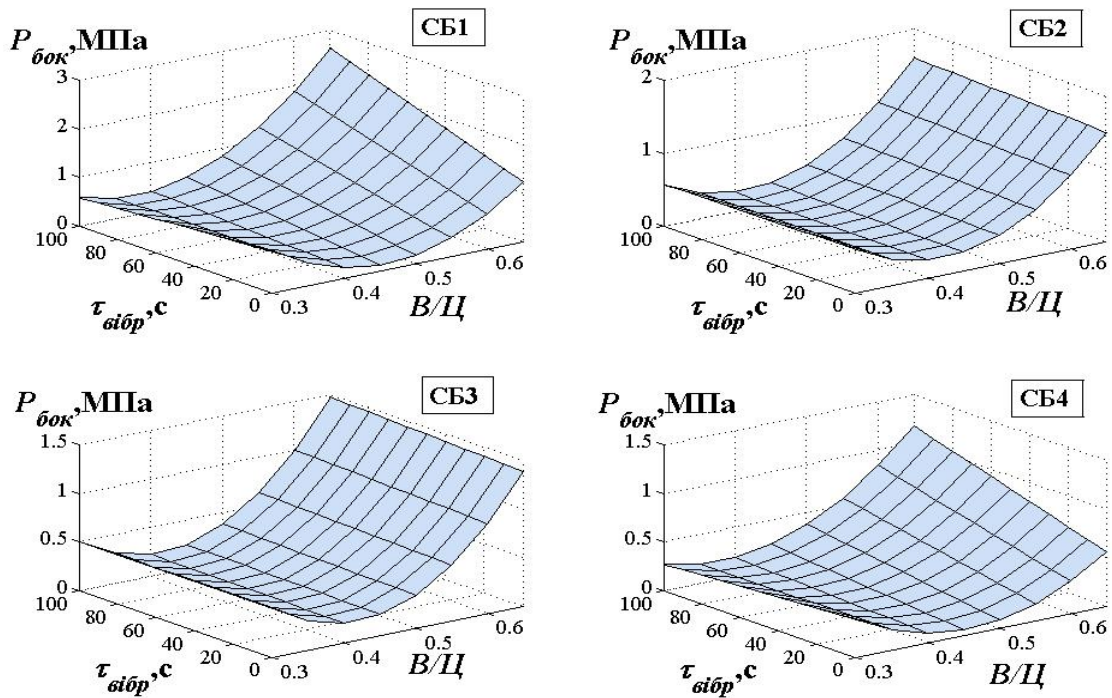


Рисунок 4.11 – Поверхня відгуку $P_{бок}$ в координатах В/Ц – $\tau_{вібр}$ ($x_3 = 0$), на рівнях сенсорів СБ1–СБ4

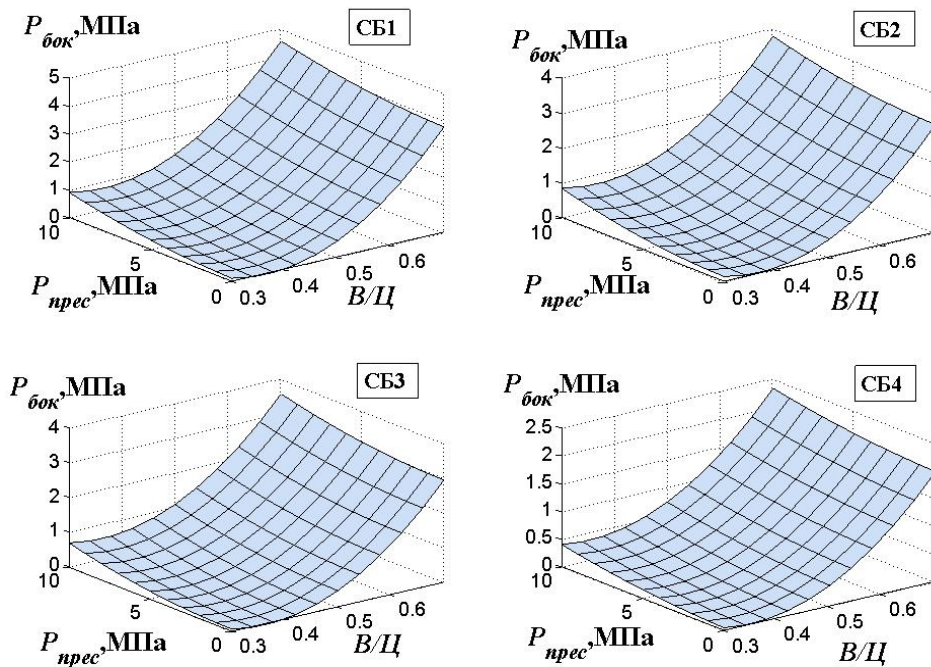


Рисунок 4.12 – Поверхня відгуку $P_{бок}$ в координатах В/Ц – $P_{прес}$ ($x_2 = 0$) на рівнях сенсорів СБ-1–СБ-4

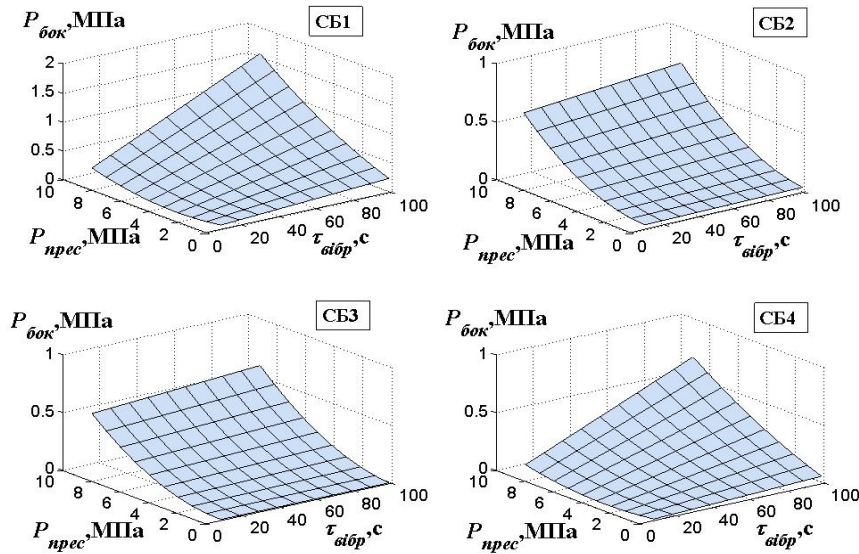


Рисунок 4.13 – Поверхня відгуку $P_{бок}$ в координатах $\tau_{вібр} - P_{прес}$ ($x_1 = 0$), на рівнях сенсорів СБ1–СБ4

Динаміку впливу факторів В/Ц, $\tau_{вібр}$, $P_{прес}$ при ущільненні бетонної суміші на значення цільової функції – боковий тиск $P_{бок}$ на різних рівнях сенсорів СБ1–СБ4 за результатами регресійного аналізу наведено на рис. 4.14–4.16.

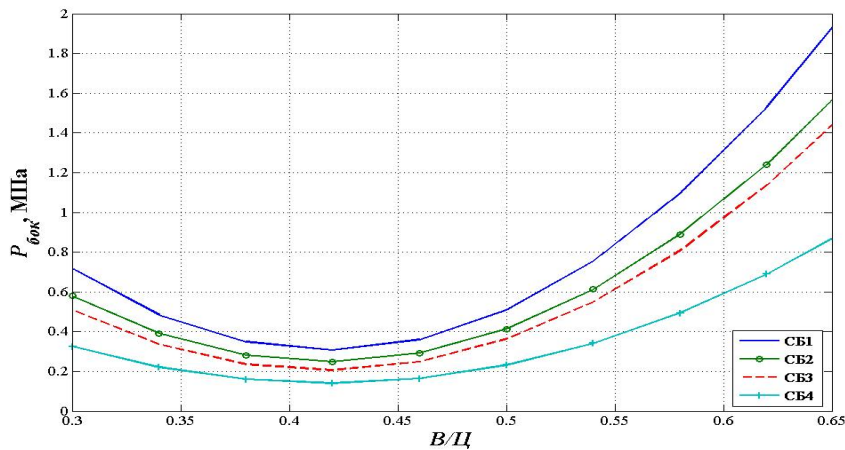


Рисунок 4.14 – Вплив В/Ц на значення бокового тиску $P_{бок}$ (при $x_2 = x_3 = 0$)

Аналізуючи рис. 4.14, можна припустити, що вплив відношення В/Ц на величину бокового тиску неоднозначний: у бетонних сумішах з В/Ц = 0,41...0,43 боковий тиск $P_{бок}$ при фіксованих параметрах ($x_2 = x_3 = 0$) буде приймати мінімальне значення, але при В/Ц = 0,3...0,4 та В/Ц = 0,43...0,5 $P_{бок}$ зростає. На рис. 4.15 зображено

графік впливу тривалості часу вібрування $\tau_{\text{вібр}}$ на значення бокового тиску $P_{\text{бок}}$ при фіксованих параметрах ($x_1 = x_3 = 0$).

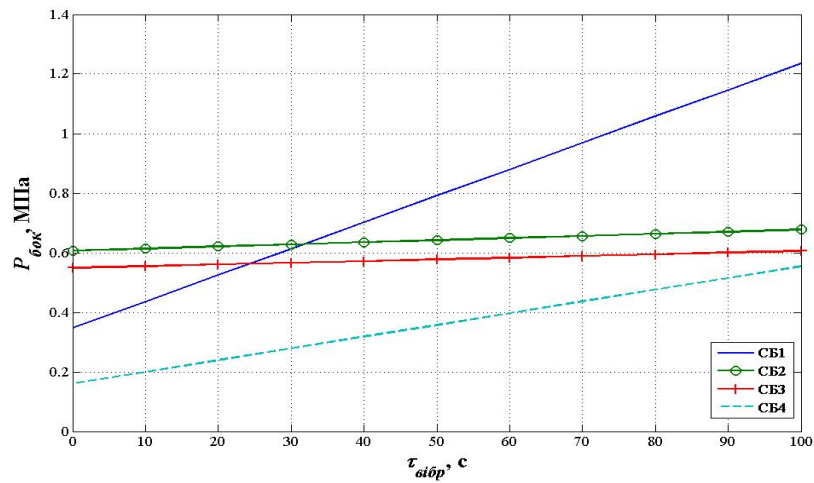


Рисунок 4.15 – Вплив $\tau_{\text{вібр}}$ на значення бокового тиску $P_{\text{бок}}$ (при $x_1 = x_3 = 0$)

Закономірність впливу тривалості часу вібрування бетонної суміші на значення бокового тиску $P_{\text{бок}}$ носить лінійний характер (див. рис. 4.15). Аналізуючи графік (див. рис. 4.15), можна зробити висновок про однозначний вплив фактора часу вібрування. Тобто із зростанням часу вібрування суміші зростає величина бокового тиску. Так, для верхньої зони бетонної суміші (рівень сенсора СБ1) вібрування кожних 10 с збільшує боковий тиск на 0,02 МПа. Для затухаючого характеру тиску в нижній зоні бетонної суміші приріст тиску на кожні 10 с вібрування вдвічі менше. На рис. 4.16 наведено графік залежності бокового тиску $P_{\text{бок}}$ при фіксованих значеннях (при $x_1 = x_2 = 0$).

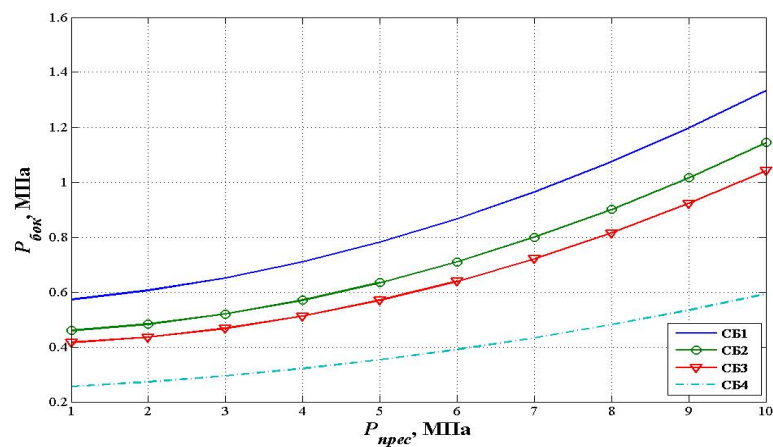


Рисунок 4.16 – Вплив $P_{\text{прес}}$ на значення бокового тиску $P_{\text{бок}}$ (при $x_1 = x_2 = 0$)

Проаналізувавши графік впливу величини тиску пресування бетонної суміші на розподіл бокового тиску $P_{бок}$ по висоті виробу (див. рис. 4.16), можна зробити висновок про прямопропорційний нелінійний вплив пресувального тиску. Він характеризується квадратичною параболою по всіх чотирьох рівнях розміщення сенсорів СБ1–СБ4.

Аналіз статистичних даних проведеного моделювання (див. табл. 4.11) свідчить про високий ступінь адекватності отриманих аналітичних рівнянь для заданої цільової функції $P_{бок}$ (значення отриманої величини критерію Фішера для всіх сенсорів менше граничного).

В результаті регресійного аналізу експериментальних даних для звичайних (В/Ц = 0,30...0,65), попередньо віброваних бетонних сумішей по характеру розподілу бокового тиску по висоті отримано залежність

$$P_h = (A + B \ln(P_{прес})) C^h, \quad (4.10)$$

де P_h – величина бокового тиску на глибині h бетонного виробу, МПа;

A, B, C – емпіричні коефіцієнти; h – відстань від площини прикладання тиску до площини, на рівні якої вимірюється боковий тиск, см.

Значення коефіцієнтів A, B, C рівняння (4.10) наведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Значення коефіцієнтів A, B, C для рівняння розподілу бокового тиску

Тип бетонної суміші	В/Ц	Час вібрування, с	A	B	C	Коеф. кореляції, R
1. Звичайна+пласт. (склад Е)	0,55	-	0,397	0,859	0,982	0,974
2. Звичайна(склад А)	0,5	-	-0,196	0,591	0,969	0,965
3. Вібропресована (склад К)	0,50	120	0,123	0,247	0,978	0,961
4. Вібропресована (склад Л)	0,30	80	0,109	0,697	0,987	0,974
5. Вібропресована (склад М)	0,46	40	0,041	0,251	0,978	0,971

Графічне зображення залежності (4.10) для різних складів бетонних сумішей при пресувальному тиску $P_{прес} = 5$ МПа наведено на рис. 4.17.

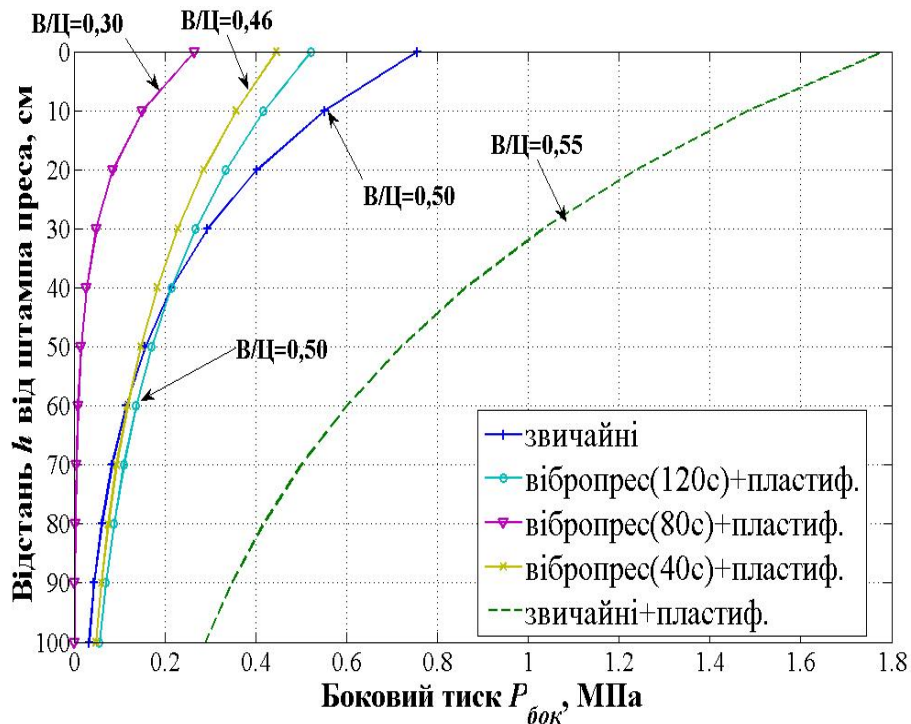


Рисунок 4.17 – Розподіл тиску по висоті бетонної суміші для різних складів та умов пресування

Аналіз рис. 4.17 свідчить про неоднозначний вплив вібрування на зміну величини бокового тиску в бетонній суміші. Але явно прослідковується тенденція впливу В/Ц фактора та додавання пластифікаторів на цю величину для невіброваних сумішей. Так, для пластифікованої суміші з В/Ц = 0,55 початковий боковий тиск склав $P_{поч} \approx 1,8$ МПа, а для суміші з В/Ц = 0,5 тиск склав $P_{поч} \approx 0,75$ МПа. Тобто, чим більше значення В/Ц та більш пластичніша суміш, тим більший коефіцієнт бокового тиску, який зменшується по висоті пресованої бетонної суміші зі збільшенням відстані від площини прикладання тиску. З огляду на отримані залежності (див. рис. 4.17), можна припустити, що збільшення величини В/Ц наближує фізичну в'язкопружнопластичну структуру цементного тіста до умовно нормальної (тієї, що не стискається), на яку розповсюджується закон Паскаля, а також зробити висновок про те, що незалежно від складу суміші та типу пластифікатора, при попередньому вібруванні величина бокового тиску та характер його зміни залежать від В/Ц. Так, із зменшенням В/Ц зменшується величина бокового тиску по висоті ущільнюваної бетонної суміші.

Приймаючи до уваги результати робіт [12, 46, 134, 135, 137], виконано порівняння графічного зображення теоретичних залежностей розподілу бокового тиску в масиві бетонної суміші по висоті, отрима-

ного проф. Й. М. Ахвердовим, проф. І. Н. Дударем (рис. 4.18), й Ю.С. Біксом за результатом експериментальної залежності (формула (4.10)).

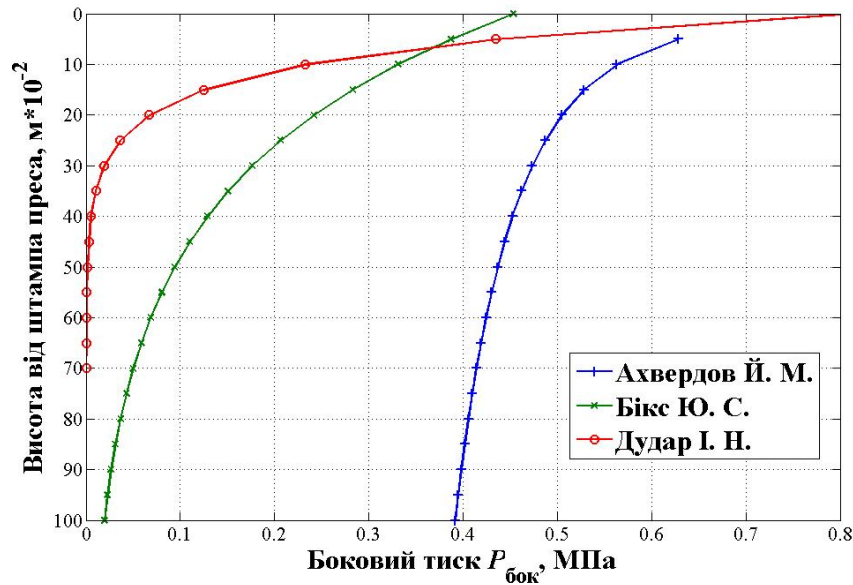


Рисунок 4.18 – Порівняння теоретичних залежностей розподілу бокового тиску по висоті бетонної суміші з експериментальними

Порівняння виконувалось при таких початкових умовах: тиск пресування 3 МПа, консистенція цементного тіста 1,69; форма квадратна (коефіцієнт форми перерізу 1,7 [68, с. 150] переріз форми 0,1×0,1 м, периметр 0,4 м, площа поперечного перерізу 0,01 м², висота форми 0,6 м; коефіцієнт бокового тиску $\xi = 0,27$ [68, с. 150]; кут тертя цементного тіста по боковій поверхні 30° [12, с. 44], коефіцієнт внутрішнього тертя 0,1 [68] коефіцієнт зчеплення бетонної суміші із стінками прес-форми 21,5 Па [68, с. 92]. Побудовані залежності (див. рис. 4.18) отримані за формулами (4.10), формулою проф. І. Н. Дударя [12], та проф. Й. М. Ахвердова [68].

Аналізуючи рис. 4.18, можна помітити, що характер затухання бокового тиску в бетонній суміші за запропонованою Ю. С. Біксом залежністю носить більш плавний характер, на відміну від залежності проф. І. Н. Дударя, яка відображає майже нульові значення бокового тиску на висоті більше 30 см від поверхні прикладання. Проте, порівнюючи подібність кривих Ю. С. Бікса та проф. Й. М. Ахвердова, можна звернути увагу на приблизно рівну різницю в показниках по вісі абсцис, що зміщені на величину $\Delta P \approx 0,38P_0$.

На рис.4.19 наведено порівняння залежності, отриманої Ю.С. Біксом та формулою проф. І. Н. Дударя для кутів внутрішнього тертя $\varphi = 20^\circ$ та $\varphi = 30^\circ$ для поперечного перерізу $0,1 \times 0,1$ м.

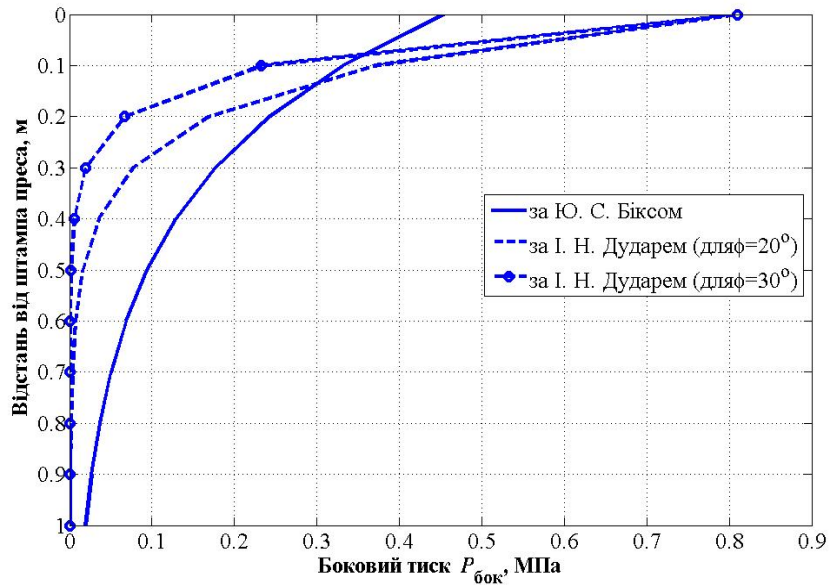


Рисунок 4.19 – Порівняння теоретичних (для $\varphi = 20^\circ$ та $\varphi = 30^\circ$, переріз форми $0,1 \times 0,1$ м) та експериментальних даних щодо затухання бокового тиску по висоті бетонної суміші

На рис 4.20 наведено порівняння залежності, отриманої Ю. С. Біксом та формулою проф. І. Н. Дударя для кутів внутрішнього тертя $\varphi = 20^\circ$ та $\varphi = 30^\circ$, для поперечного перерізу $0,2 \times 0,2$ м.

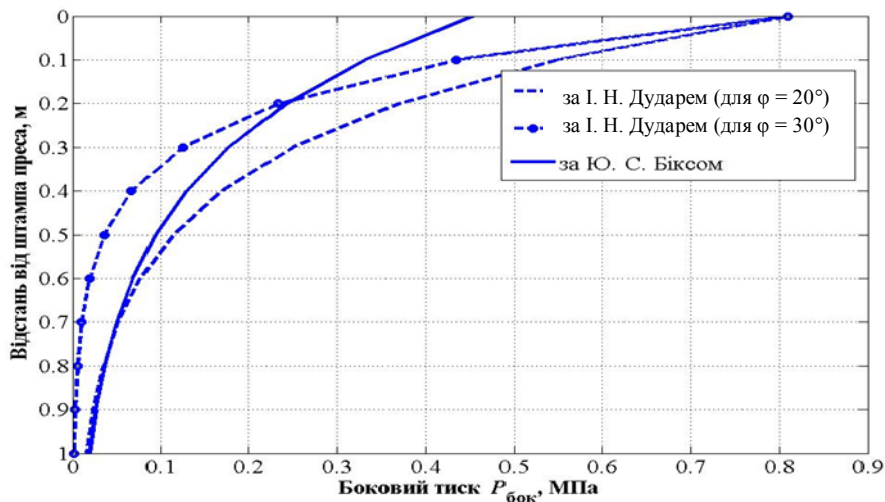


Рисунок 4.20 – Порівняння теоретичних (для $\varphi = 20^\circ$ та $\varphi = 30^\circ$, переріз форми $0,2 \times 0,2$ м) та експериментальних даних затухання бокового тиску по висоті бетонної суміші

Якщо проаналізувати рис. 4.19 та рис. 4.20, то можна виявити, що графіки падіння бокового тиску, зображені на рис. 4.20, більш наближені до експериментальних даних, хоча й тут помітно суттєву різницю в початковому значенні величини бокового тиску – 0,45 МПа для формули Ю.С. Бікса та 0,8 МПа для формули проф. І. Н. Дударя. Також (див. рис.4.20) при явному наближенні теоретичних даних до експериментальних втрачається фізичний зміст складових коефіцієнту $K_{с.ф.}$ проф. І. Н. Дударя [12].

Звідси можна зробити висновок, що необхідно вносити поправочний коефіцієнт у формулу проф. І. Н. Дударя для більш адекватного врахування величини затухання бокового тиску по висоті бетонної суміші, що пресується.

4.4 Прогнозування величини бокового тиску в масиві суміші при виробництві пресованих бетонних виробів

Математичний апарат, що заснований на базі нечіткої логіки та лінгвістичних змінних, також застосовано до багатофакторного аналізу щодо прогнозування розподілу бокового тиску в прес-формі при виробництві пресованих бетонних виробів. Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на величину бокового тиску на стінки форми, виконана їх відповідна класифікація за такими показниками: параметром витрати складових та технологічними параметрами ущільнення. До параметра витрати відносяться витрата цементу, піску, щебеню та води. До технологічного параметра відносяться величина В/Ц, час попереднього вібрування та величини прикладеного тиску на суміш у прес-формі.

За аналогією до дерева ієрархічного висновку узагальненої моделі прогнозування проектної міцності бетонного виробу (див. рис. 3.1) запропоновано дерево логічного висновку для впливу факторів технологічного процесу та співвідношення заповнювачів суміші на прогнозовану величину бокового тиску на стінку прес-форми (рис. 4.21).

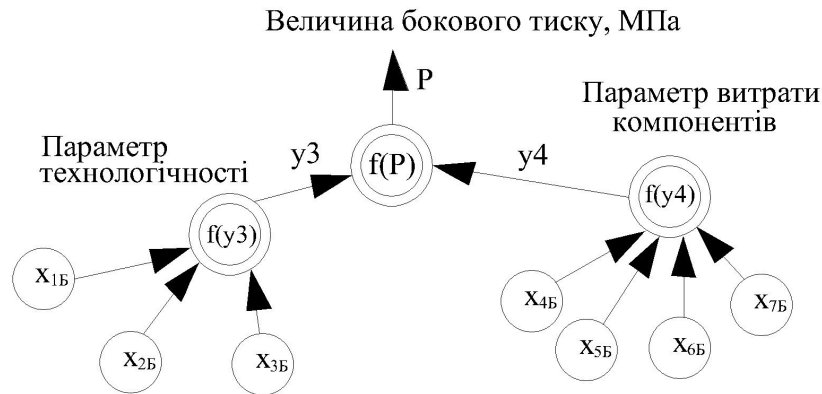


Рисунок 4.21 –Дерево ієрархічного висновку моделі прогнозування величини бокового тиску в масиві суміші при ущільненні бетонного виробу пресуванням

З рис. 4.21 випливає, що знання про прогнозовану величину бокового тиску на стінки прес-форми при ущільненні бетонного виробу є функцією виду $P_{бок} = f_{(P)}(x_{1Б}, x_{2Б}, \dots, x_{7Б})$ про зв'язок входів (x_i, y_i) з виходом (P) , замінюються послідовністю співвідношень:

$$P_{бок} = f_{(P)}(y_3, y_4); \quad (4.11)$$

$$y_3 = f_{(y_3)}(x_{1Б}, x_{2Б}, x_{3Б}); \quad (4.12)$$

$$y_4 = f_{(y_4)}(x_{4Б}, x_{5Б}, x_{6Б}, x_{7Б}), \quad (4.13)$$

де y_3, y_4 – проміжні значення лінгвістичних змінних, що характеризують укрупнені фактори впливу на величину бокового тиску на стінку прес-форми при ущільненні бетонного виробу пресуванням; $x_{1Б} \dots x_{3Б}$ – значення лінгвістичних змінних, що входять до складу y_3 ; $x_{4Б} \dots x_{7Б}$ – значення лінгвістичних змінних, що входять до складу y_4 ; $P_{бок}$ – прогнозована величина бокового тиску на стінку прес-форми; $f(y)$ – функціональний зв'язок між вхідними та вихідними змінними.

В загальному вигляді математична модель величини бокового тиску є ієрархічною нечіткою системою, в якій проміжні значення баз знань лінгвістичних змінних $f(y_3), f(y_4)$ є вхідними для верхньої бази знань $f(P)$ (див. рис. 4.21). Для характеристик проміжних лінгвістичних змінних використовуються нечіткі терми з кількісними виразами «низька» (Н), «середня» (С) та «висока» (В). Базуючись на принципах побудови експертно-моделювальної системи в нечітких діагностичних системах [16, 17, 104] для прогнозування величини бокового тиску

шляхом логічного висновку по нечіткій базі знань, використовуючи програмний комплекс «MATLAB» [127, 130] для кожної лінгвістичної змінної u_3 , u_4 , $P_{бок}$ для значень бокового тиску на рівні сенсорів СБ1–СБ4 (див. рис. 2.7), створено нечітку базу знань типу «Якщо–То», що наведені у додатку Б. Використання нечітких термів дозволяє побудувати експертні нечіткі бази знань, які віддзеркалюють зв'язки між вхідними та вихідними лінгвістичними змінними. Вихідні дані для баз знань отримано за даними експертів у галузі бетонознавства [2, 7, 9, 57, 91, 131–133]. Навчання моделі виконано з урахуванням експериментальних даних випробовування різних складів бетонної суміші (див. табл. 4.1–4.7) на установці для вимірювання бокового тиску (див. рис. 2.8). Приклад вибірки для навчання моделі розподілу бокового тиску на рівні сенсора СБ1 наведено у додатку Г.

Діапазони варіювання параметрів суміші, що впливають на прогнозовану величину бокового тиску, та їхня змістовна інтерпретація і відповідні множини лінгвістичних оцінок (термів), наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Параметри	Позначення та назва лінгвістичної змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
Технологічності	$x_{1Б}$ – В/Ц суміші	0,35...0,5	низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий
	$x_{2Б}$ – тривалість попереднього вібрування, с	10...120	низька, середня, висока
	$x_{3Б}$ – тиск пресування, МПа	0,2...35	низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий
Витрати	$x_{4Б}$ – витрата цементу, кг	280...600	низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока
	$x_{5Б}$ – витрата піску, кг	500...944	низька, середня, висока
	$x_{6Б}$ – витрата щебеню, кг	1200...1250	низька, середня, висока
	$x_{7Б}$ – витрата пластифікатора, % від маси цементу	0,5...1,5	низька, середня, висока

У відповідності до [103] нечіткий висновок проводиться за системою нечітких логічних рівнянь (формули (4.11)–(4.13)), які будуються

по нечітких базах знань (додаток Б). За допомогою нечітких рівнянь розраховуються ступені належностей факторів, що впливають на боковий тиск, при фіксованих значеннях вхідних параметрів.

Навчання нечіткої моделі полягає в знаходженні таких її параметрів, що мінімізують розбіжність між експериментальними даними та модельними результатами. Згідно з [16] в нечіткій моделі настроюють параметри функцій належності термів та вагові коефіцієнти нечітких правил. В якості критерію навчання обрана величина середньоквадратичної похибки $RMSE$, яка знаходиться при навчанні моделі (формула (3.18)).

Навчання математичної моделі розподілу бокового тиску у суміші було виконано із застосуванням пакету «Fuzzy Logic Toolbox», комплексу «MATLAB», в якому нечіткий логічний висновок по нечітких базах знань виконано за алгоритмом [103]. Навчальна вибірка математичної моделі складалась із 51 даного випробувань бокового тиску на стінку прес-форми для заданих компонентів бетонної суміші. Тестова вибірка математичної моделі складалась із 43 даних.

Дані використаних вибірок отримані експериментальним шляхом [46, 134]. На рис. 4.22 наведено порівняння результатів математичного моделювання прогнозування величини бокового тиску для навчальної та тестової вибірок, відповідно, перед та після процедури навчання з наведеними коефіцієнтами кореляції R .

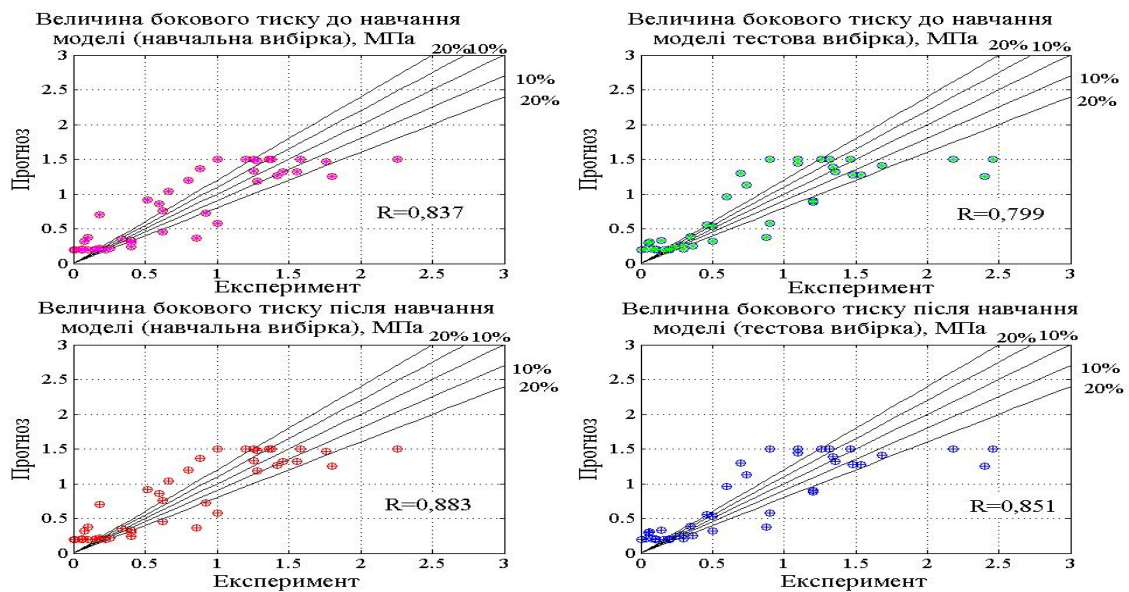


Рисунок 4.22 – Кореляційний зв'язок між величиною прогнозованої та фактичної величин бокового тиску

При проходженні 35-ти ітерацій величина середньоквадратичного відхилення між експериментальними даними та результатами моделювання зменшилась з 0,714 МПа до 0,281 МПа (рис. 4.23).

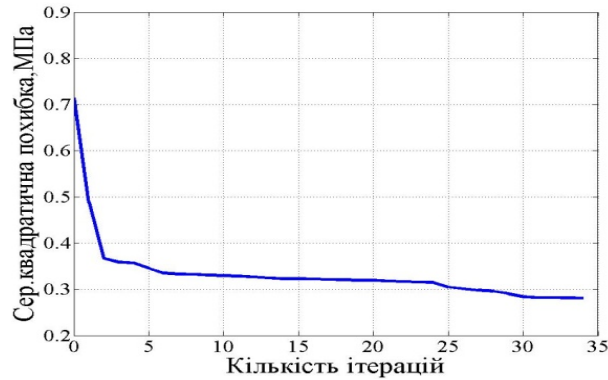


Рисунок 4.23 – Динаміка зміни величини середньоквадратичної похибки при навчанні моделі, в одиницях тиску

Результати розбіжності між отриманими значеннями прогнозованої міцності при навчанні запропонованої моделі наведено у табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – Розбіжності при навчанні моделі величини бокового тиску на рівні сенсорів СБ1–СБ4 з використанням нечіткої логіки

Вибірки	Діапазон відхилення, %	До навчання, %	Після навчання, %
Навчальна	10	9,3	13,95
	20	25,58	37,20
Тестова	10	16,66	19,04
	20	28,57	40,47

Формули (4.14)–(4.16) відображають фрагмент системи нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом (див. табл. 4.13):

$$\mu_H(P_{бок}) = \mu_B(y_3) \wedge \mu_H(y_4) \vee \mu_B(y_3) \wedge \mu_{HC}(y_4) \vee \mu_B(y_3) \wedge \mu_C(y_4) \vee \mu_B(y_3) \wedge \mu_{BC}(y_4); \quad (4.14)$$

$$\mu_C(P_{бок}) = \mu_C(y_3) \wedge \mu_C(y_4) \vee \mu_C(y_3) \wedge \mu_{BC}(y_4) \vee \mu_C(y_3) \wedge \mu_B(y_4); \quad (4.15)$$

$$\mu_B(P_{бок}) = \mu_H(y_3) \wedge \mu_C(y_4) \vee \mu_H(y_3) \wedge \mu_{BC}(y_4) \vee \mu_H(y_3) \wedge \mu_B(y_4). \quad (4.16)$$

Подальше вдосконалення баз знань, що являють собою знання експерта про зв'язок входів (x_i, y_i) з виходом $(P_{\text{бок}})$, а також збільшення навчальної та тестової вибірок даних, дозволить отримати більш репрезентативну модель. Аналізуючи динаміку навчання моделі (див. рис. 4.23), можна зробити припущення про здатність моделі до адаптації, оскільки просліджується різке зменшення величини середньоквадратичної похибки після третьої ітерації, та асимптотична полого ділянка на кривій графіка після шести ітерацій.

Подальше зменшення величини середньоквадратичної похибки можливе лише при зміні правил баз знань для лінгвістичних змінних $y_3, y_4, P_{\text{бок}}$ (додаток Б) або зміні алгоритму оптимізації дерева логічного висновку (див. рис. 4.21).

4.5. Розрахунок економічного ефекту доцільності впровадження методики прогнозування міцності пресованих бетонних виробів у виробництво

Оскільки сучасний підхід щодо проектування та підбору складу бетону вимагає гнучкого та миттєвого реагування на потреби ринку, існує необхідність в розробці сучасних систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень при прогнозуванні міцності будівельних виробів. Це дозволить зменшити час, необхідний для статистичної обробки результатів лабораторних випробовувань, зменшити кількість попередніх дослідів з підбору складу сумішей бетону, оптимізувати розрахункову кількість компонентів для замісу бетону тощо. Аналіз розробок на цю тематику, що виконані останнім часом [4–6, 13, 19, 20, 138], свідчить про те, що є суттєвий попит на такий продукт серед заводів залізобетонних конструкцій.

Для прикладу можна навести комп'ютерні програми КСУБС-1–КСУБС-4 розроблені на кафедрі «Технології будівельних виробів і матеріалів» Національного університету водного господарства та природокористування [5], програма підтримки прийняття рішень при виробництві залізобетону касетним способом [6], програма автоматизованого проектування складу бетонної суміші, а також програма ФоБеС-1, запропонована для проектування міцності у виробництві бетонних сумішей [4]. Всі наведені вище програми мають свої недоліки та переваги.

Наведений у розділі 3 метод проектування прогнозованої міцності бетону на базі нечіткої логіки та лінгвістичних змінних дозволяє мінімізувати час та витрату матеріалів при визначенні прогнозованої міцності бетонного виробу.

Дослідно-промислове впровадження модуля прогнозування міцності бетонних виробів у виробництво полягає в тому, що значення міцності бетонних виробів визначається одразу, тобто після введення початкових вхідних параметрів складу бетонної суміші, параметрів заповнювачів, параметрів пропорційності складу та технологічної обробки в запропоновану програму, без потреби лабораторного експериментального визначення міцності у віці 28 діб. Все це можливо за умови, що бази знань модуля містять формалізовану експертну або експериментальну інформацію щодо залежностей для вхідних параметрів модуля.

На рис. 4.24 зображено структурно-логічну схему впровадження модуля прогнозування міцності пресованих бетонних дорожніх камнів на виробництві.

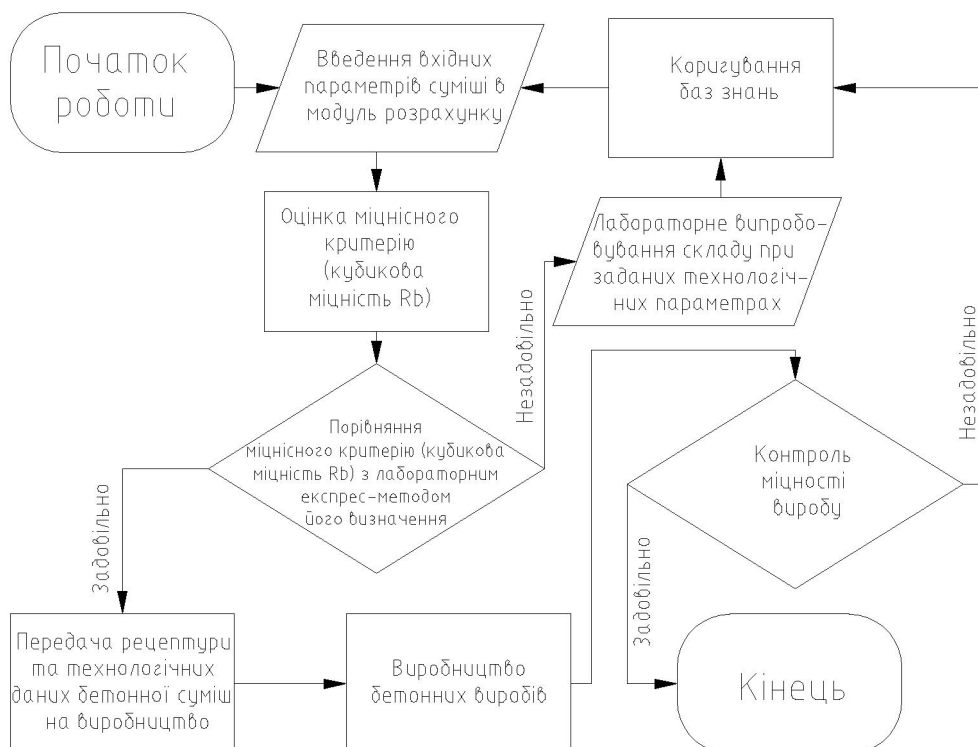


Рисунок 4.24 – Структурно-логічна схема інтеграції модуля прогнозування міцності бетонних виробів у виробництво

На рис. 4.25 показане вікно модуля коригування баз знань для технологічних параметрів розробленої програми прогнозування міцності бетонних виробів у комплексі «MATLAB».

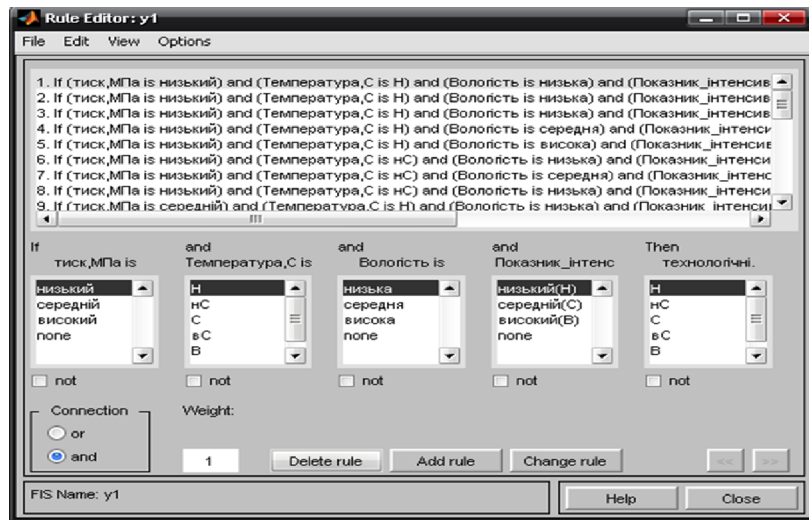


Рисунок 4.25 – Вікно коригування баз знань на прикладі технологічних параметрів головного інтерфейсу модуля

На рис. 4.26 наведено розроблений інтерфейс користувача програми прогнозування міцності бетонних виробів, який являє собою інтегрований в комплексі «MATLAB» програмний пакет, що дозволяє оцінити прогнозовану міцність бетонного виробу з урахуванням кількісних та якісних параметрів заповнювачів та технологічного процесу шляхом логічного висновку по нечітких базах знань з використанням апарату нечіткої логіки та лінгвістичних змінних [105, 125, 127, 130, 139].

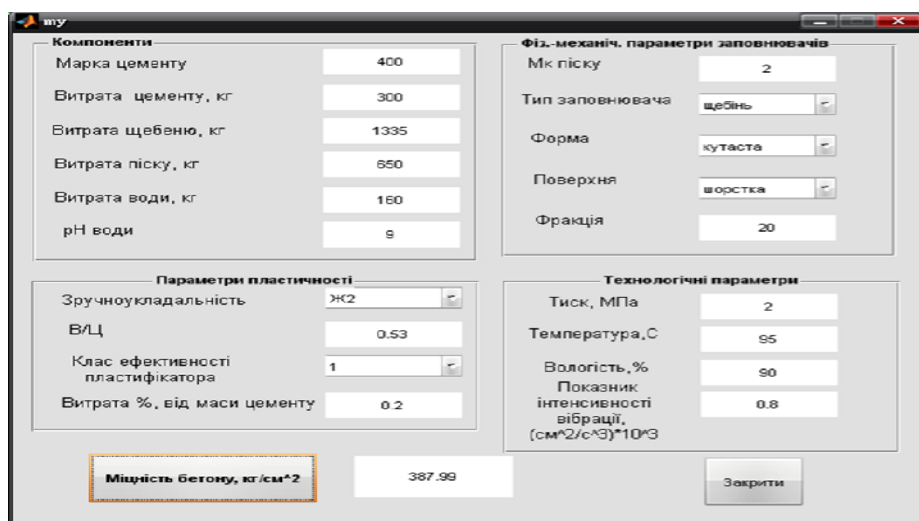


Рисунок 4.26 – Головний інтерфейс модуля прогнозування міцності

Модуль розрахунку (див. рис. 4.26) являє собою інтегрований в комплексі «MATLAB» програмний пакет, що дозволяє оцінити прогнозовану міцність бетонного виробу шляхом логічного висновку по нечітких базах знань з використанням апарату нечіткої логіки та лінгвістичних змінних [105, 125, 127, 130, 139].

Принцип, за яким був створений програмний продукт, дозволяє вносити корективи в бази знань й гнучко та оперативно змінювати та доповнювати модуль баз знань з урахуванням додаткових експертних оцінок та даних лабораторних вимірювань.

На рис. 4.27 показано технологічну схему виготовлення пресованих бетонних дорожніх каменів після передачі даних з модуля прогнозування міцності бетонного виробу (див. рис.4.26).

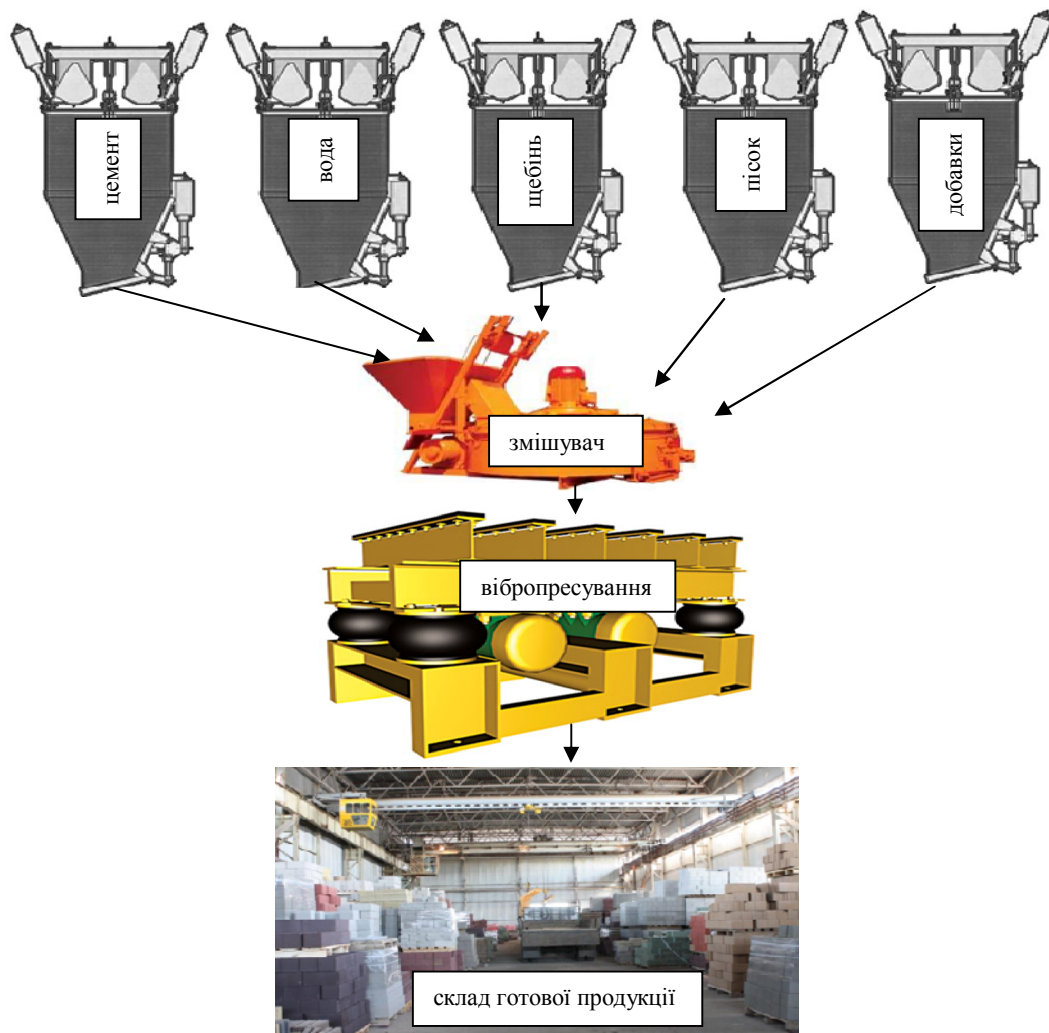


Рисунок 4.27 – Технологічна схема виготовлення пресованих бетонних дорожніх каменів з використанням вихідної інформації з модуля прогнозування міцності бетонних виробів

Оцінку ефективності від впровадження модуля інтелектуальної підтримки прийняття рішень прогнозування міцності бетонних виробів на заводі ТОВ «Поділля-залізобетон» у м. Вінниця виконано за спрощеною методикою [139], порівнюючи основну вартість процесу проектування складу бетону та окупність від впровадження модуля у виробництво:

А) Основна заробітна плата начальника лабораторії, яка розраховується за формулою

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ [грн]}, \quad (4.17)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн; T – число робочих днів в місяці, $T_p = 22$; t – число днів роботи розробника (дослідник буде працювати 1 день).

Розрахуємо основну заробітну плату для начальника лабораторії

$$Z_0 = \frac{3400}{22} \cdot 1 = 154,5 \text{ (грн)},$$

де 3400 грн – середня зарплата у будівництві для розряду 3,8 по Україні на 2012 рік.

Б) Нарахування на заробітну плату робітників та дослідників – це виплати в Пенсійний Фонд України, у Фонд соціального страхування на випадок безробіття, у Фонд соціального страхування в зв'язку з тимчасовою втратою працездатності, у Фонд соціального страхування від нещасних випадків на виробництві:

$$H_n = 0,38 \cdot (Z_0) = 0,38 \cdot (154,5) = 58,72 \text{ (грн)}. \quad (4.18)$$

В) Амортизація основного обладнання, яке використовувалось для досліджень.

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання можуть бути розраховані за формулою

$$A = \frac{Ц}{T_{\text{кор}}} \times \frac{T}{12} \text{ (грн)}, \quad (4.19)$$

де $Ц$ – балансова вартість обладнання, грн; T – термін використання обладнання, 1 день; $T_{\text{кор}}$ – корисний термін використання обладнання, роки.

Розрахуємо амортизаційні відрахування для преса П-125:

$$A = \frac{148060}{12} \cdot \frac{1}{365} = 33,8 \text{ (грн).}$$

Аналогічно проводимо розрахунки для іншого обладнання і дані зводимо до табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Амортизаційні відрахування

Найменування обладнання	Балансова вартість*, грн	Термін корисного використання, років	Термін використання обладнання, дні	Величина амортизаційних відрахувань, грн
1. Прес П-125	148060	12	1	33,8
2. Пропарочна камера КУП 1 М	24800	12	1	5,66
3. Вібростіл СМЖ 539	8575	10	1	2,3
4. Сита КСИ	2153,6	12	1	0,49
Всього А = 42,25				

Примітка:* – балансову вартість обладнання взято з сайтів мережі Інтернет станом на 2012 рік.

Г) Запишемо витрати матеріалів, необхідних для визначення фактора міцності за Ц/В, що наведено у табл. 4.16.

Таблиця 4.16 – Вартість матеріалів для замісу трьох складів бетону

Склад	Ц/В	Витрата в кг на 9 л ущільненої бетонної суміші, для кубів 10×10×10 [93]				
		Цемент	Пісок	Щебінь	Води основної	Води для поглинання крупного заповнювача
1	1,43	2,5	8,3	13,5	1,74	0,135 <i>W</i>
2	2	3,6	7,5	12,3	1,80	0,123 <i>W</i>
3	2,8	7,7	4,5	10,6	2,73	0,106 <i>W</i>
Ціна, грн/кг		1,01	0,08	0,15	0,008	
Вартість матеріалів, грн		13,92	1,06	5,46	0,05	≈0,01
Всього, грн						Σ = 20,50

Примітка: 1. Прийнято усереднене водопоглинання крупного заповнювача $W = 5\%$.

2. Вартість матеріалів прийнята, виходячи з оптових цін для підприємств.

Д) Витрати на силову електроенергію розраховуються за формулою

$$V_e = V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi} \text{ [грн]}, \quad (4.20)$$

де $V = 0,96$ грн/кВт-год – вартість електроенергії для II класу промислоде
 $V = 0,96$ грн/кВт-год – вартість електроенергії для II класу промислових підприємств в 2013 році; Π – установлена потужність обладнання, кВт; Φ – фактична кількість годин роботи обладнання щодо виготовлення одного виробу, годин; K_{Π} – коефіцієнт використання потужності, $K_{\Pi} = 0,5$.

В роботі використовуються вібростіл СМЖ 539, прес П-125 та пропарочна камера КУП 1М. В залежності від часу використання та потужності обладнання витрати складуть:

$$V_{\text{стіл}} = 0,96 \cdot 0,25 \cdot 2 / 60 \cdot 0,5 = 0,004 \text{ (грн)};$$

$$V_{\text{прес}} = 0,96 \cdot 1,8 \cdot 3 / 60 \cdot 0,5 = 0,04 \text{ (грн)};$$

$$V_{\text{п.камера}} = 0,96 \cdot 4 \cdot 9 \cdot 0,5 = 17,28 \text{ (грн)}.$$

Всього витрати за електроенергію складуть 17,32 грн.

Е) Інші витрати (накладні витрати) — приймаються як 200 % від основної заробітної плати інженера, який здійснює проектування складу бетонної суміші, тобто

$$I_B = 2 \cdot (Z_0) = 2 \cdot 170 = 340 \text{ (грн)}.$$

Сума всіх попередніх витрат дає загальні витрати на визначення фактору міцності для бетонної суміші – V

$$V = Z_0 + H_{\Pi} + A + M + V_e + I_B \text{ [грн]}; \quad (4.21)$$

$$V = 170 + 64,6 + 42,25 + 20,35 + 17,32 + 340 = 654,52 \text{ (грн)}.$$

Ж) При оціночній вартості V_M модуля прогнозування міцності бетонного виробу 1500 грн термін окупності витрат при його впровадженні на заводі залізобетонних конструкцій ТОВ «Поділля-залізобетон» у м. Вінниця наступить через два місяці за умови потреби у проектуванні двох нових складів бетону прискореним методом пропарювання в камері (3 год підйом + 6 год витримка + 2 год охолодження) для сумішей на портландцементі:

$$O = V_M / V \cdot n = 1500 / 654,52 \cdot 2 = 1,14 \text{ (місяці)},$$

де O – окупність впровадження, місяців; n – потреба у проектуванні нових складів щомісяця.

Таким чином, використання моделі прогнозованої міцності бетонних виробів на базі нечіткої логіки та лінгвістичних змінних надає можливість прогнозувати міцність бетонного виробу, а також скоротити час, витрату матеріалів та грошових коштів.

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено метод прогнозування міцності та розподілу бокового тиску при виробництві пресованих бетонних виробів, заснований на використанні апарату нечіткої логіки та регресійного аналізу, що дозволило врахувати вплив кількісних та якісних параметрів заповнювачів бетонної суміші, а також технологічних параметрів ущільнення на цільову функцію. До основних результатів роботи можна віднести:

1. Запропоновано концептуальні моделі прогнозування міцності бетонних виробів у вигляді ієрархічного дерева логічного висновку, що включає в себе чіткі (витрати компонентів, технологічні параметри ущільнення) та нечіткі параметри (тип, форма, поверхня заповнювачів) й розподілу бокового тиску.

2. Встановлено зв'язок між коефіцієнтом тертя по боковій поверхні прес-форми μ та бокового тиску ξ , що виникає при пресуванні бетонних сумішей при виробництві бетонних дорожніх каменів. Визначено зв'язок між коефіцієнтами n^3 зміни величини бульбашки повітря, густиною бетонної суміші ρ та глибиною занурення h у бетонну суміш. Величини коливання зменшення об'єму бульбашки на глибині 0,6 м несуттєві, а саме: для тиску 5 МПа становлять 0,26...0,29 % від початкового об'єму бульбашки на поверхні, для тиску 10 МПа – 0,13...0,14 %, для тиску 15 МПа – 0,08...0,09 %, відповідно, від початкового об'єму бульбашки на поверхні для сумішей важких бетонів з густиною 2250...2500 кг/м³.

3. Розроблено експериментальну установку та методику для дослідження фізико-механічних та реологічних характеристик бетонної суміші при її пресуванні. Визначено затухаючий характер розподілу бокового тиску по висоті масиву пресованої бетонної суміші для різних складів, тривалості попереднього вібрування, вмісту пластифікуючих добавок й пресувального зусилля, який апроксимується показниковою функцією $P_h = (A + B \ln(P))C^h$. Виявлено прямий зв'язок В/Ц з величиною бокового тиску, незалежно від тривалості вібрування, причому максимальний боковий тиск $P_{бок} \approx 1,8$ МПа на поверхні форми ($h = 0$) при тиску пресування $P_{прес} = 5$ МПа буде у пластифікованій суміші з В/Ц = 0,55, а мінімальний $P_{бок} \approx 0,35$ МПа – у суміші з В/Ц = 0,3. З'ясовано, що зі зменшенням В/Ц суттєво збільшується опір

суміші до пресування, який становить 12,5 МПа для попередньо віброваної суміші з В/Ц = 0,46 та 1 МПа для суміші з В/Ц = 0,65.

4. Розроблено експертно-моделювальну систему прогнозування міцності бетонного виробу та розподілу бокового тиску. Визначено, що краще корелювання з експериментальними даними має регресійна модель бокового тиску. Для системи прогнозування міцності бетонного виробу створено інтерфейс користувача в комплексі «MATLAB». Адаптація моделі прогнозування міцності свідчить про зниження величини середньоквадратичної похибки від 14,8 МПа до 9,1 МПа для важких бетонів марки М600 і вище. Коефіцієнт кореляції між величиною міцності, визначеною експериментальним шляхом, та величиною, розрахованою за побудованою моделлю, становить $R = 0,855$. Адекватність запропонованої моделі прогнозування міцності бетонних виробів перевірена методом парних порівнянь Сааті, що підтверджується отриманими інтегральними критеріями міцнісної переваги 0,642, 0,752 та 0,888 для трьох різних складів бетону в побудованій трирівневій ієрархічній моделі.

5. Модуль експертно-моделювальної системи впроваджено в якості дублюючої системи підтримки прийняття рішень з прогнозування міцності бетонних виробів на ТОВ «Поділля-залізобетон» у м. Вінниця. При оціночній вартості модуля 1500 грн, термін окупності від його впровадження на виробництві становить два місяці, виходячи з припущення про щомісячну потребу проектування двох нових складів бетону. Запропонований модуль прогнозування міцності бетонного виробу на базі нечіткої логіки дозволить суттєво скоротити час на підготовку до виробництва складу бетону з майбутньою прогнозованою міцністю, матеріальні витрати, витрати праці фахівців високої кваліфікації при частій зміні сировини та вимог, що пред'являються до якості бетонних виробів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дворкин Л. И. Основы бетоноведения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – СПб. : ООО «Строй-Бетон», 2006. – 692 с.
2. Вознесенський В. А. Комп'ютерне матеріалознавство і технологія бетону / В. А. Вознесенський, Т. В. Ляшенко // Будівельні конструкції. – 2002. – Вип. 56. – С. 217–226.
3. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетону із заданими властивостями / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. – Рівне : Вид-во РДТУ, 2000. – 215 с.
4. Лихачев Д. В. Автоматизация процесса проектирования составов бетонов и их корректировка на основе прогнозирования качества будущего бетона с использованием четких и нечетких моделей: дис. ... кандидата техн. наук : 05.13.06 / Лихачев Денис Валерьевич. – Орёл, 2004. – 148 с.
5. Дворкін Л. Й. Основні задачі комп'ютерного бетонознавства / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. – Рівне : РДТУ, 1999. – 89 с.
6. Журавльов Ю. В. Автоматизоване управління виробництвом залізобетонних виробів на основі нечіткої логіки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.07 «Автоматизація технологічних процесів» / Ю. В. Журавльов. – К., 2005. – 20 с.
7. Баженов Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.
8. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження у будівництво / [Р. Ф. Рунова, В. І. Братчун, В. І. Гоц та ін.] – К. : УВПК ЕксОб, 2008. – 360 с.
9. Файнер М. Ш. Новые закономерности в бетоноведении и их практическое приложение / М. Ш. Файнер. – К. : Наукова думка, 2001. – 448 с.
10. Магдеев А. У. Вибропрессованные элементы мощения с повышенными эксплуатационными свойствами из мелкозернистого бетона : дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.05 / Магдеев Альфред Усманович. – М., 2003. – 170 с.
11. Ахматов М. А. Эксплуатационные и технические требования к качеству бетонных элементов мощения / М. А. Ахматов, С. Р. Лихов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Стр-во и архит. – 2010. – № 20. – С. 70–75.
12. Дудар І. Н. Теоретичні основи технології виробів із пресованих бетонів : моногр. / І. Н. Дудар. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 89 с. – ISBN 966-641-163-6.

13. Міхєєв І. А. Підвищення ефективності рецептурних рішень в технології товарного бетону методами математичного планування : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробы» / І. А. Міхєєв. – Х., 2012. – 20 с.
14. Dewar J. D. Computer modelling of concrete mixture / J. D. Dewar. – London, New York : E&FN Spon, 1999. – 256 p.
15. Optimization methods for material design of cement-based composites / [Ed. A.M. Brandt]. – London, New York : E&FN Spon, 1998. – 328 p.
16. Штовба С. Д. Проектирование нечётких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с. – ISBN 5-93517-359-X.
17. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.
18. Gen M. Genetic Algorithms and Engineering Design / M. Gen R. Cheng. – John Wiley & Sons, 1997. – 352 p.
19. Yeh I-C. Design of high-performance concrete mixture using neural networks and nonlinear programming / I-C. Yeh // Journal of Computing in Civil Engineering. – 1999. – Vol.13, No. 4. – P. 36–42.
20. Yeh I-C. Analysis of Strength of Concrete Using Design of Experiments and Neural Networks / I-C. Yeh // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2006. – Vol.18, No. 4. – P. 597–604.
21. Бікс Ю. С. Закономірності розподілення тиску по висоті бетонної суміші, що ущільнюється / Ю. С. Бікс, І. Н. Дудар // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2010 – № 2. – С. 134–138. – ISBN 5-256-00380-1.
22. Пат. 64440 Україна, МПК G01N 3/10. Установка для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші / Дудар І. Н., Бікс Ю. С., заявник та власник Вінниц. нац. техн. уні-т. – № u201104012; заявл. 04.04.2011; опубл. 10.11.2011 Бюл. № 21.
23. Бікс Ю. С. Математична модель зміни величини бульбашки повітря в процесі виготовлення бетонних виробів // Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк, Н. М. Слободян // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 14–17. – ISSN 1997-9266.
24. Бікс Ю. С. Моделювання взаємодії бетонної суміші з пресформою під час ущільнення / Ю. С. Бікс, Г. С. Ратушняк, І. В. Коц // Сучасні технології матеріали та конструкції у будівництві. – 2011. – № 2. – С. 92–95 – ISBN 5-256-00380-1.
25. Пат. 53612 Україна, МПК G01N 3/10. Установка для вимірювання тиску в масиві бетонної суміші / Дудар І. Н., Бікс Ю. С.; заявник

та власник Вінниц. нац. техн. ун-т. – № u201004690; заявл. 20.04.2010; опубл. 11.10.2010 Бюл. № 19.

26. Пат. 69747 Україна, G01N 3/10. Установка для вимірювання горизонтальної складової тиску в масиві бетонної суміші / Ратушняк Г. С., Бікс Ю. С.; заявник та власник Вінниц. нац. техн. ун-т. – № u201112884; заявл. 02.11.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

27. Житковський В. В. Вібропресований дрібнозернистий бетон з використанням відсівів подрібнення граніту: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.05 / Житковський Вадим Володимирович. – О., 2003. – 200 с.

28. Гарнага В. Л. Термосилова технологія дрібно розмірних бетонних виробів з використанням хімічних добавок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.. техн.. наук : спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробы» / В. Л. Гарнага. – Вінниця, 2011. – 20 с.

29. Дворкін Л. Й. Бруківка з вібропресованого бетону на гранітному відсвіві / Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2001. – Вип. 62. – С. 102–106.

30. Костенко Ю. А. Мелкозернистые дорожные бетоны для изделий получаемых методом гиперпрессования: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.05 / Костенко Юрий Алексеевич. – Харьков, 2005. – 153 с.

31. Костенко Ю. А. Формирование микропористости цементного камня при воздействии вибрации и давления / Ю. А. Костенко, С. Н. Толмачев, Л. Д. Маракина та ін. // Науковий вісник будівництва. – 2003. – Вип. 21. – С. 224–229.

32. Загреба В. П. Формування бетонних і залізобетонних виробів методом пульсуючого пресування бетонних сумішей / В. П. Загреба, І. Н. Дудар. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 104 с.

33. Баженов Ю. М. Эффективные бетоны и технологии – перспективы их развития / Ю. М. Баженов, В. Р. Фаликман // Строительная газ. – 2001. – № 44. – С. 8.

34. Деревянко В. Н. Влияние дисперсного армирования на деформационные свойства покрытий на основе минеральных вяжущих / В. Н. Деревянко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : Gaudeamus. – 2000. – № 6. – С. 34–41.

35. Кровяков С. О. Вплив дисперсного армування і зерен пониженої пружності на властивості дрібнозернистого бетону / С. О. Кровяков, А. В. Даниленко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – О. : Зовнішрекламсервіс. – 2010. – Вип. 38. – С. 389-394.

36. Редкозубов А. А. Ресурсосберегающая технология устройства дорожных одежд на основе использования некондиционных кварце-

вых песков / А. А. Редкозубов, А. Н. Евсевский // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2001. – Вип. 62. – С. 36–40.

37. Швець В. В. Вібротермосилова технологія залізобетонних виробів та конструкцій: монографія / В. В. Швець, І. Н. Дудар. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 87 с.

38. Десов А. Е. Вибрированный бетон / А. Е. Десов. – М. : Госстройиздат, 1956. – 229 с.

39. Савинов О. А. Вибрационная техника уплотнения и формирования бетонных смесей / О. А. Савинов, Е. В. Лавринович. – Л. : Стройиздат, 1986. – 279 с.

40. Перспективи використання пінобетону в дорожньому будівництві України / [П. М. Коваль, А. Є. Фаль, О. В. Кушнір та ін.] // Дорожня галузь України. – 2008. – № 2. – С. 54–56.

41. Голубев В. А. Проблемы покрытия автомобильных дорог. / В. А. Голубев, В. А. Анферов // Цемент и его применение. – 1997. – № 1. – С. 37–40.

42. Автодорожній комплекс України в сучасних умовах : проблеми і шляхи розвитку : зб. наук. праць. – К. : Укртиппроєкт, 1998. – 308 с.

43. Huang Y. Pavement Analysis and Design: 2nd ed. / Y. Huang. – Prentice Hall, Upper Saddle River : New Jersey, 2004. – 792 p.

44. Jamrozy Z. Beton i jego technologie / Z. Jamrozy. – Warszawa : Wydawnictwo naukowe pwn, 2000. – 486 s.

45. Саламаха Л. В. Сухі будівельні суміші з базальтовими волокнами для влаштування елементів підлоги : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробы» / Л. В. Саламаха. – Д., 2010. – 20 с.

46. Бікс Ю. С. Розподіл бокового тиску в бетонних сумішах різного складу, зпресовуваних під час виготовлення дорожнього каменю / Ю. С. Бікс // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 5. – С. 15–18. – ISSN 1997-9266.

47. Бікс Ю. С. Експериментальне визначення бокового тиску в процесі пресування бетонних сумішей / Ю. С. Бікс // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 20–24.

48. Гусев Б. В. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей / Б. В. Гусев, А. Д. Деминов, Б. И. Крюков. – М. : Стройиздат, 1982. – 150 с.

49. Зазимко В. Г. Оптимизация свойств строительных материалов / В. Г. Зазимко. – Л. : Транспорт, 1981. – 103 с.

50. Назаренко І. І. Машини для виробництва будівельних матеріалів: підруч. / І. І. Назаренко. – К. : КНУБА, 1999. – 488 с.

51. Руденко И. Ф. Упругие и неупругие силы сопротивления бетонной смеси колебаниям / И. Ф. Руденко // Технология виброформирования железобетонных изделий. – М. : Стройиздат, 1970. – С. 19–33.
52. Овчинников П. Ф. Реология тиксотропных систем / П. Ф. Овчинников, Н. Н. Круглицкий, Н. В. Михайлов. – К. : Наукова думка, 1972. – 119 с.
53. Ребю П. Вибрирование бетона : практическое руководство / П. Ребю. – М. : Стройиздат, 1970. – 256 с.
54. Neville A. M. Wlasciwosci betonu / A. M. Neville. – Krakow, 2000. – 874 s.
55. Десов А. Е. Распространения и отражения колебаний в жёстких бетонных смесях при поверхностном вибрировании / А. Е. Десов, Ю. М. Чуркин // Технология и свойства тяжелых бетонов. – 1962. – № 29. – С. 76–91.
56. Будівельне матеріалознавство: підручник / [Кривенко П. В. Пушкарьова К. К., Барановський В. Б. і ін.]. – К. : ТОВ УВТК «Екс об», 2004. — 704 с. –ISBN 966-7769-35-6.
57. Горбунов Г. И. Основы строительного материаловедения / Г. И. Горбунов. – М. : Изд-во «АВС», 2002. – 168 с.
58. Горшков В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. – М. : Высшая школа, 1981. – 335 с.
59. Рекомендации по вибрационному формованию железобетонных изделий / [НИИЖБ Госстроя СССР]. – М. : НИИЖБ. – 1986. – 78 с.
60. Горчаков Г. И. Строительные материалы / Г. И. Горчаков, Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1986. – 688 с.
61. Богданов В. С. Процессы при производстве строительных материалов и изделий / В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семикопенко. – Белгород : Везелица, 2007. – 98 с.
62. Мхитарян Н. М. Основы технологии монолитного каркасного строительства / Н. М. Мхитарян, Г. В. Бадеян. – К. : Наукова думка, 2001. – 403 с.
63. Гусев Б. В. Вибрационная технология бетона / Б. В. Гусев, В. Г. Зазимко. – К. : Будівельник, 1991. – 157 с.
64. Коваль С. В. Модифицированные смеси с управляемыми реологическими параметрами: материалы IV междунар. науч.практ. конф. [«Дни современного бетона»], (Запорожье, 7–9 июня, 2004 г.) / Запорожье : Будиндустрія, 2004. – С. 75–81.

65. Davies R. D. Some experiments on the compaction of concrete by vibration / R. D. Davies // Magazine of Concrete Research. – 1951. – No 8. – P. 14–17.
66. Блещик Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона / Н. П. Блещик. – Минск : Наука и техника, 1977. – 232 с.
67. Дударь И. Н. Совершенствование методов и режимов термообработки железобетонных виброгидропрессованных труб: дис... кандидата техн. наук: 05.23.05 / Дударь Игорь Никифорович. – Винница, 1980. – 212 с.
68. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона /И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
69. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении / Ю. М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1970. – 271 с.
70. Свитонский А. В. Разработка и исследование технологии вибропрессования горячих бетонных смесей: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» / А. В. Свитонский. – Минск, 1978. – 20 с.
71. Сорокер В. И. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона / В. И. Сорокер, В. Г. Довжик. – М. : Стройиздат, 1964. – 308 с.
72. Шмигальский В. Н. Формование изделий на виброплощадках / В. Н. Шмигальский. – М. : Стройиздат, 1968. – 212 с.
73. Лермит В. Проблемы технологии бетона / В. Лермит. – М. : 1959. – 351 с.
74. Сторожук Н. А. Задача оптимального управления уплотнением бетонных смесей / Н. А. Сторожук, Т. Н. Дехта // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2001. – № 1. – С. 46–53.
75. Шестоперов С. В. Технология бетона / С. В. Шестоперов. – М. : Высшая школа, 1977. – 432 с.
76. Овчинников П. Ф. Виброреология / П. Ф. Овчинников. – К. : Наукова думка, 1983. – 272 с.
77. Рамачандран В. Наука о бетоне: физико-химическое бетоноведение / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн ; пер. с англ. Т. И. Розенберг, Ю. Б. Ратиновой, под ред. В. Б. Ратинова. – М. : Стройиздат, 1986. – 278 с.
78. Djelal C. Tribological Behaviour of Self-Compacting Concrete / C. Djelal, Y. Vanhove, A. Magnin // Cement and Concrete Research. – 2004. – No. 5. – P. 821–828.

79. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1966. – 400 с.
80. Урьев Н. Б. Коллоидные цементные растворы / Н. Б. Урьев, И. С. Дубинин. – Л. : Стройиздат, 1980. – 192 с.
81. Barnes H. A. Thixotropy – A Review / H. A. Barnes // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 1997. – No. 70. – P. 1–33.
82. Billberg P. Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete – Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest: PhD Thesis / Peter Billberg. – Stockholm, 2006. – 91 p.
83. Грушко И. М. Повышение прочности и выносливости бетона / И. М. Грушко, А. Г. Ильин, Э. Д. Чихладзе. – Харьков : Вища школа, 1986. – 152 с.
84. Миклашевский Е. П. Глубинное вибрирование бетонной смеси / Е. П. Миклашевский. – М. : Стройиздат, 1981. – 176 с.
85. Шейкин А. С. Структура прочность и трещиностойкость цементного камня / А. С. Шейкин. – М. : Стройиздат, 1974. – 192 с.
86. Дударь И. Н. Исследование кинетики твердения виброгидропрессованного бетона по изменению его динамических электрофизических и прочностных свойств / И. Н. Дударь, М. Ф. Друкованый // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. – 1980. – № 5. – С. 66–71.
87. Дорожно-строительные материалы : учеб. для вузов / [Грушко И. М., Королев И. В., Борщ И. М., Мищенко Т. М.]. – М. : Транспорт, 1991. – 357 с.
88. Элбакидзе М. Г. Прессование и вибропрессование цементного теста бетона и раствора / М. Г. Элбакидзе // *Известия ТНИСГЭИ*. – 1978. – Т. 21. – С. 31–39.
89. Ратушняк Г. С. Вібросилова технологія формування декоративних бетонних виробів / Г. С. Ратушняк, Н. М. Слободян. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 161 с. – ISBN 978-966-641-221-1.
90. Бабич Е. М. Прочность бетона, твердеющего при трехосном сжатии / Е. М. Бабич, И. И. Блаженин, Л. П. Макаренко // *Бетон и железобетон*, 1966. – № 2. – С. 29–30.
91. Выровой В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, В. Г. Суханов. – Одесса : ТЕС, 2010. – 169 с.
92. Hong-Guang N. J. Prediction of compressive strength of concrete by neural networks / N. J. Hong-Guang, Z. Wang // *Cement and Concrete Research*. – 2000. – Vol. 30, No. 8. – P. 1245–1250.

93. Рекомендации по ускоренной оценке качества цемента в бетоне и назначению его состава / [НИИЖБ Госстроя СССР]. – М. : Стройиздат, 1975. – 24 с.

94. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / [НИИЖБ Госстроя СССР]. – М. : Стройиздат, 1979. – 103 с.

95. Прогнозирование в материаловедении : материалы к 41-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов-МОК'41. (Одесса, 25-26 апреля 2002 г.) / гл. ред. В. А. Вознесенский. – Международная инженерная академия, Одесская гос. академия строительства и архитектуры, Одесский дом ученых. – Одесса : Астропринт, 2002. – 195 с.

96. Сердюк В. Р. Математичне моделювання і оптимізація складу малоклінкерних в'язучих / В. Р. Сердюк, П. С. Боднар // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 4. – С. 20–23.

97. Файнер М. Ш. Введение в математическое моделирование технологии бетона / Файнер М. Ш. – Львов : Світ, 1993. – 237 с.

98. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука. – 1976. – 280 с.

99. Цементи. Загальні технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-112-2002. – [Чинний від 2002-07-01]. – К. : Держбуд України, 2002. – 39 с. – (Національні стандарти України).

100. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005 IDT): ДСТУ EN 196-1:2007. – [Чинний від 2002-07-01]. – К. : Мінбуд України, 2007. – 24 с. – (Національні стандарти України).

101. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий: СНиП 3.09.01-85 – [Срок введения в действие 1986-01-01]. – М. : ЦИТП Госстроя СССР 1985. – 40 с. – (Національні стандарти України).

102. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань: ДСТУ Б В.2.7-114-2002. – [Чинний від 2002-01-31]. – К. : Держбуд України, 2002. – 25 с. – (Національні стандарти України).

103. Панкевич О. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108 с.

104. Борисов А. Н. Принятие решений на основе нечётких моделей: Примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига : Зинатне, 1990. – 184 с. – ISBN 5-7966-0459-7.

105. Бікс Ю. С. Прогнозування міцності бетону при використанні лінгвістичних змінних апарату нечіткої логіки / Ю. С. Бікс // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 1. – С. 1–6. – Режим доступу до журналу :

http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/vntu/2011_1/2011-1.files/uk/11ysbfla_ua.pdf.

106. Мітюшкін Ю. І. Soft computing ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань : моногр. / Ю. І. Мітюшкін , Б. І. Мокін , О. П. Ротштейн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с. – ISBN 966-641-051-6.

107. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия–Телеком, 2006. – 452 с.

108. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и её применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М. : Мир, 1976. – 167 с.

109. Саати Т. Аналитическое планирование: Организация систем / Т. Саати, К. Кернс ; пер. с англ. В. Г. Вачнадзе ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.– ISBN 5-256-00380-1.

110. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, – 1984. – 320 с.

111. Rotshtein A. Design and Tuning of Fuzzy Rule-Based Systems for Medical Diagnosis / A. Rotshtein, H. Teodorescu and A. Kandel // Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine. – 1998. – P. 243–289.

112. Строительные материалы. Цементы общестроительного назначения. Технические условия: ДСТУ Б В.2.7-46-96. – [Введен 1997-01-01]. – К. : Госкомградостроительства Украины 1996. – 16 с. – (Національні стандарти України).

113. Радіаційно-гігієнічні характеристики будівельних матеріалів: зб. тез доповідей наук.-практ. конф. / МОЗ України, Український наук. гігієнічний центр, Наукове товариство гігієністів України. – К. : 1999.

114. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. – М. : Металлургия, 1969. – 264 с.

115. Искович-Лотоцкий Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев, В. А. Крат. – К. : Техника, 1982. – 208 с.

116. Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-75-98. – [Чинний від 1999-01-01]. – К. : Держбуд України, 1999. – 19 с. – (Національні стандарти України).

117. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-32-95. – [Чинний від 1995-10-31]. – К. : Держкоммістобудування, 1996. – 13 с. – (Національні стандарти України).

118. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А. В. Ушерова-Маршака. – Х. : Колорит, 2005.— 280 с.
119. А. с. 1163196 СССР МКИ4 G01N3/10. Установка объемного сжатия образцов / А. Н. Ставрогин, В. Г. Тарасов (СССР). – № 3699839/22-03, заявл. 06.02.84; опубл.23.06.85 Бюл. № 23.
120. А. с. 1167475 СССР МКИ4 G01N3/10. Установка для испытания образцов бетона / Л. В. Галкин, Г. Н. Пучков (СССР). – № 3733551/22-03, заявл. 28.02.84; опубл.15.07.85 Бюл. № 26.
121. А. с. 1198006 СССР МКИ4 G01N3/10. Камера для испытания материалов на сжимаемость / А. Н. Аполонский (СССР). – № 3780822/22-03, заявл. 03.05.84; опубл.15.12.85 Бюл. № 46.
122. Пат. 63453 Україна, МПК7 G01D1/10. Пристрій для вимірювання тиску у бетонній суміші при її віброущільненні / Сторожук М. А., Ликова С. О., Дехта Т. М., Єфремов П. Л., заявник та власник Придніпровська держ. акад. буд-ва та архіт. – № u2003043639; заявл. 22.04.2003; опубл. 15.01.2004 Бюл. № 1.
123. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зорграф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
124. Коваленко И. Н. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособ. / И. Н. Коваленко А. А. Филипова. – М. : Высшая школа, 1982. – 256 с.
125. Бікс Ю. С. Побудова функцій належності нечітких оцінок впливу параметрів моделі на прогнозовану міцність бетону // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 5. – С.137–141.
126. UCI Machine learning Repository: Concrete Compressive Strength Data Set. Original Owner and Donor Prof. I-Cheng Yeh, Department of Information Management Chung-Hua University, Hsin Chu, Taiwan 30067, R.O.C. e-mail:icyeh@chu.edu.tw [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Concrete+Compressive+Strength>.
127. Бікс Ю. С. Оптимізація параметрів моделі прогнозування міцності бетону шляхом навчання та тестування / Ю. С. Бікс // Сучасні технології матеріали та конструкції у будівництві. – 2011.– № 2. – С. 41–44. – ISBN5-256-00380-1.
128. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Томас Л. Саати, пер. с англ. д-ра техн. наук, проф. О. Н. Андрейчиковой. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 360 с. – ISBN 978-5-397-00844-0.
129. Бікс Ю. С. Визначення глобальних векторів переваг за методом парних порівнянь Сааті у моделі прогнозування міцності бетону /

Ю. С. Бікс // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування – 2011. – № 3 (55). – С. 116–122.

130. Прогнозування міцності бетону на базі апарату нечіткої логіки за допомогою «MATLAB 7»: матеріали 4-ої міжнар. конф. молодих вчених [«Geodesy, architecture & construction 2011»], (Львів, 24–26 листопада 2011 р.) / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львів. політехніка»– Л. : Львів. політехніка. – С. 132–135.

131. Большаков В. І. Будівельне матеріалознавство: навч. посібн. [для студ. будівельн. спец. вузів] / В. І. Большаков Л. Й. Дворкін. – Д. : РВА «Дніп-VAL», 2004. – 677 с.

132. Дворкін Л. Й. Будівельне матеріалознавство / Л. Й. Дворкін. – Рівне : Вид-во РДТУ 1999. – 478 с.

133. Баженов Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны : [науч. изд-е] / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М. : Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.

134. Бікс Ю. С. Дослідження характеру розподілу бокового тиску по висоті прес-форми при пресуванні бетонних сумішей / Ю. С. Бікс // Сучасні технології матеріали та конструкції у будівництві. – 2012. – № 1. – С. 23–28. – ISBN 5-256-00380-1.

135. Arslan M. Effects of Formwork Surface Materials on Concrete Lateral Pressure / M. Arslan, S. Osman, S. Serkan // Construction and Building Materials. – 2005. – No. 4. – P. 319–325.

136. Assaad J. Variations of Lateral and Pore Lateral Pressure of Self-Consolidating Concrete at Early Age / J. Assaad, K. H. Khayat // ACI Materials Journal. – 2004. – No. 4. – P. 310–317.

137. Герега О. М. Генезис структури і властивостей будівельних композиційних матеріалів. Комп'ютерне моделювання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби» / О. М. Герега. – О., 2011. – 35 с.

138. Бікс Ю. С. Інтеграція експертно-моделювальної системи прогнозованої міцності бетонних виробів у виробництво / Ю. С. Бікс // Сучасні технології матеріали та конструкції у будівництві. – 2012. – № 2. – С. 98–101. – ISBN 5-256-00380-1.

139. Козловський В. О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах / В. О. Козловський. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 75 с.

ДОДАТОК А

Бази знань математичної моделі прогнозування міцності бетону

Таблиця А.1 – База знань для лінгвістичної змінної у1

Параметр пластичності у1			
Якщо			То
В/Ц, (x1)	Зола-винос, (x2)	Витрата суперпластифікатора, % від маси цементу (x3)	у1
Н	Н	Н	Н
Н	С	Н	
С	Н	Н	
С	С	Н	С
В	С	Н	
С	В	Н	
Н	Н	В	В
С	Н	С	
Н	В	В	
Н	В	С	

Таблиця А.2 – База знань для лінгвістичної змінної у2

Параметр пропорційності складу бетонної суміші у2					
Якщо					То
Цемент, (x4)	Доменний шлак, (x5)	Вода, (x6)	Щебінь, (x7)	Пісок, (x8)	у2
Н	Н	В	С	В	Н
Н	С	В	Н	С	
Н	Н	С	Н	В	
С	С	С	В	С	С
С	В	С	С	С	
С	С	Н	В	С	
С	С	Н	В	С	
С	В	В	В	С	В
В	В	С	В	В	
С	В	С	С	В	
В	С	С	В	С	
В	В	Н	В	С	

Таблиця А.3 – База знань для лінгвістичної змінної Y

Прогнозована міцність бетону				
Якщо				То
Вік бетону, (x_9)	Коефіцієнт ущільнення, (x_{10})	Укрупнений параметр, (y_1)	Укрупнений параметр, (y_2)	Y
Н	Н	Н	Н	Н
Н	нС	Н	С	
С	нС	С	Н	
Н	Н	В	Н	
Н	нС	С	В	
В	С	С	С	
С	С	В	С	С
В	С	В	Н	
С	С	С	В	
В	вС	С	В	
В	вС	В	В	В
В	В	Н	В	
С	В	В	В	

ДОДАТОК Б

Бази знань математичної моделі величини бокового тиску

Таблиця Б.1 – База знань для лінгвістичної змінної u_3

Параметр технологічності, u_3			
Якщо			То
В/Ц, ($x_{1Б}$)	Тривалість попереднього вібрування, с ($x_{2Б}$)	Тиск пресування, МПа ($x_{3Б}$)	u_3
В	Н	Н	Н
вС	Н	Н	
вС	нС	нС	
вС	Н	вС	
В	Н	нС	
нС	нС	С	С
С	С	С	
С	нС	С	
вС	нС	вС	
Н	нС	С	В
нС	нС	вС	
С	С	В	
нС	нС	вС	
нС	С	В	
Н	С	В	

Таблиця Б.2 – База знань для лінгвістичної змінної u_4

Параметр витрати компонентів, u_4				
Якщо				То
Цемент, ($x_{4Б}$)	Пісок, ($x_{5Б}$)	Щебінь, ($x_{6Б}$)	Пластифікатор, % від маси цементу ($x_{7Б}$)	u_4
Н	С	С	С	Н
Н	С	С	В	
нС	С	С	С	
нС	С	С	В	
С	С	Н	В	нС
С	С	Н	Н	
С	Н	С	В	
С	Н	С	С	
С	С	Н	С	С
С	Н	С	Н	

Продовження табл. Б.2

Параметр витрати компонентів, y_4				
Якщо				То
Цемент, ($x_{4Б}$)	Пісок, ($x_{5Б}$)	Щебінь, ($x_{6Б}$)	Пластифікатор, % від маси цементу ($x_{7Б}$)	y_4
нС	С	нС	С	вС
С	С	С	Н	
вС	нС	Н	В	
вС	нС	Н	С	
вС	С	Н	Н	
вС	Н	Н	Н	
вС	нС	нС	В	
вС	С	Н	С	
В	нС	Н	В	
В	Н	Н	С	
В	Н	Н	В	В
В	Н	Н	Н	

Таблиця Б.3 – База знань для лінгвістичної змінної $P_{бок}$

Величина бокового тиску, $P_{бок}$		
Якщо		То
Укрупнений параметр, (y_3)	Укрупнений параметр, (y_4)	$P_{бок}$
В	Н	Н
В	нС	
В	С	
В	вС	
В	В	нС
С	Н	
С	нС	
С	С	С
С	вС	
С	В	
Н	Н	вС
Н	нС	
Н	С	В
Н	вС	
Н	В	

ДОДАТОК В

Матриці планування експерименту

Таблиця В.1 – Матриця планування експерименту для функції від-
гуку – боковий тиск $P_{бок}$ на рівні сенсора СБ1

№ до-слі-ду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,96
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	0,82
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,32
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	0,72
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,12
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,16
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0,2
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0,38
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,76
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,54
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,22
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,46
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,12
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,9
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,28
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,32
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,36
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,26
b_i	0,318	-0,062	0,062	0,240	0,085	-0,005	0,130	0,107	-0,002	0,058	
b_{ei}	6,469	-27,234	-0,024	-0,059	0,047	-0,028	0,001	29,795	0,000	0,006	
t	16,810	-4,962	4,925	19,101	5,187	-0,305	7,934	8,785	-0,194	4,730	$[t] = 2,571$

Таблиця В.2 – Матриця планування експерименту для функції від-
гуку – боковий тиск $P_{бок}$ на рівні сенсора СБ2

№ до-слі-ду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,84
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	0,76
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,28
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	0,64
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,08
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0,16
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0,3
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,56
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,44
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,18
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,34
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,1
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,74
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,22

Продовження табл. В.2

№ досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,26
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,24
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,32
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,28
b_i	0,253	-0,050	0,052	0,213	0,065	-0,010	0,115	0,087	0,002	0,059	
b_{ei}	4,356	-20,342	-0,002	-0,002	0,004	-0,055	0,000	24,163	0,000	0,006	
t	14,352	-4,270	4,440	18,262	4,255	-0,655	7,528	7,642	0,185	5,156	$[t] = 2,571$

Таблиця В.3 – Матриця планування експерименту для функції відгуку – боковий тиск $P_{бок}$ на рівні сенсора СБЗ

№ досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,74
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	0,68
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,24
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	0,52
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,06
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,12
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0,14
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0,22
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,52
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,38
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,12
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,3
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,08
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,68
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,16
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,22
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,28
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,24
b_i	0,213	-0,043	0,057	0,194	0,045	-0,010	0,105	0,081	-0,004	0,056	
b_{ei}	3,990	-18,785	-0,001	-0,005	0,002	-0,055	0,000	22,417	0,000	0,006	
t	12,110	-3,729	4,902	16,590	2,946	-0,655	6,874	7,090	-0,366	4,915	$[t] = 2,571$

Таблиця В.4 – Матриця планування експерименту для функції від-
гуку – боковий тиск $P_{бок}$ на рівні сенсора СБ4

№ до- слі- ду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,44
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	0,38
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,14
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	0,32
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,06
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,08
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0,1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0,18
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,34
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	0,24
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,1
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0,2
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,04
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0,4
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,16
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,16
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18
b_i	0,147	-0,028	0,028	0,107	0,037	-0,002	0,062	0,048	-0,001	0,023	
b_{ei}	2,912	-12,236	-0,0110	-0,026	0,021	-0,014	0,000	13,401	0,000	0,003	
t	13,171	-3,844	3,844	14,510	3,881	-0,259	6,469	6,702	-0,1759	3,263	$[t] = 2,571$

ДОДАТОК Г
Експериментальні дані визначення бокового тиску
на рівні сенсора СБ1

Таблиця Г.1 – Фрагмент вибірки даних для навчання моделі роз-
 поділу бокового тиску при пресуванні суміші на рівні сенсора СБ1

В/Ц	$\tau_{\text{вibr}}$, с	$P_{\text{прес}}$, МПа	Цемент, кг	Пісок, кг	Щебінь, кг	Тип пластифікатора	Величина бокового тиску, МПа $P_{\text{бок}}$
0,78	0	0,375	278	922	1022	-	0,06
0,75	0	0,375	400	833	1000	Поліпласт СП	0,1
0,5	120	0,375	400	833	1000	-	0,1
0,5	120	0,625	400	833	1000	-	0,06
0,35	0	0,875	600	500	1120	-	0,08
0,78	0	1,250	278	922	1022	-	0,16
0,5	120	1,250	400	833	1000	-	0,15
0,43	80	1,250	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	0,4
0,46	40	1,250	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	0,1
0,5	0	1,625	400	833	1000	-	0,01
0,75	0	1,875	400	833	1000	Поліпласт СП	0,62
0,46	40	2,250	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	0,18
0,5	120	2,500	400	833	1000	-	0,22
0,5	0	3,375	400	833	1000	-	0,18
0,75	0	3,375	400	833	1000	Поліпласт СП	0,92
0,43	80	3,375	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	0,86
0,46	40	3,625	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	0,26
0,35	0	5,000	600	500	1120	-	0,18
0,43	80	5,000	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	1,00
0,75	0	5,375	400	833	1000	Поліпласт СП	1,26
0,5	0	5,625	400	833	1000	-	0,34
0,5	120	5,625	400	833	1000	-	0,4
0,46	40	5,625	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	0,4
0,78	0	6,875	278	922	1022	-	0,62
0,43	80	6,875	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	1,28
0,75	0	7,125	400	833	1000	Поліпласт СП	1,46
0,46	40	7,875	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	0,6
0,75	0	9,250	400	833	1000	Поліпласт СП	1,8
0,43	80	9,500	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	1,42
0,5	120	10,25	400	833	1000	-	0,52
0,46	40	11,000	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	0,88
0,43	80	13,125	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	1,56
0,46	40	13,625	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	1,28
0,5	120	14,000	400	833	1000	-	0,66
0,46	40	15,875	322	665	1250	Релаксол СУПЕР ПК	1,38
0,43	80	16,500	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	1,76
0,5	120	17,875	400	833	1000	-	0,8
0,5	120	22,500	400	833	1000	-	1
0,43	80	23,750	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	2,26
0,5	120	26,625	400	833	1000	-	1,2
0,5	120	29,375	400	833	1000	-	1,26
0,5	120	31,875	400	833	1000	-	1,36
0,5	120	33,750	400	833	1000	-	1,58
0,78	0	0,125	278	922	1022	-	0,04
0,35	0	0,250	600	500	1120	-	0,06
0,43	80	0,250	600	500	1078	Релаксол СУПЕР ПК	0,05

Наукове видання

Ратушняк Георгій Сергійович

Дудар Ігор Никифорович

Бікс Юрій Семенович

**ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ТА РОЗПОДІЛУ БОКОВОГО
ТИСКУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПРЕСОВАНИХ БЕТОННИХ
ДОРОЖНІХ КАМЕНІВ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено Ю. Біксом

Підписано до друку

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,93

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-45

Вінницький національний технічний університет,

КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.