

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 вибрати 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 віброущільнення 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 віброущільнення 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 віброущільнення 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].

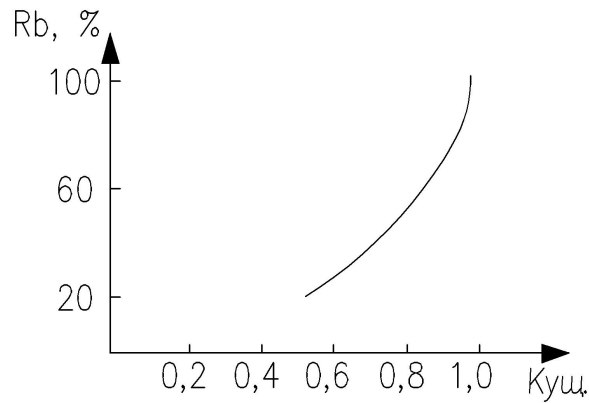


Рисунок 1.1 – Вплив відносного ступеня ущільнення ($K_{уц}$) бетонної суміші на відносну міцність R_b бетону при стиску

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 відтисканням води розглянуті проф. Й. М. Ахвердовим [68]. Ним встановлені закономірності (рис.1.2) стискувальності цементного тіста і впливу тиску, $(V/C)_{\text{зал}}$ – $(V/C)_{\text{зал}}$.

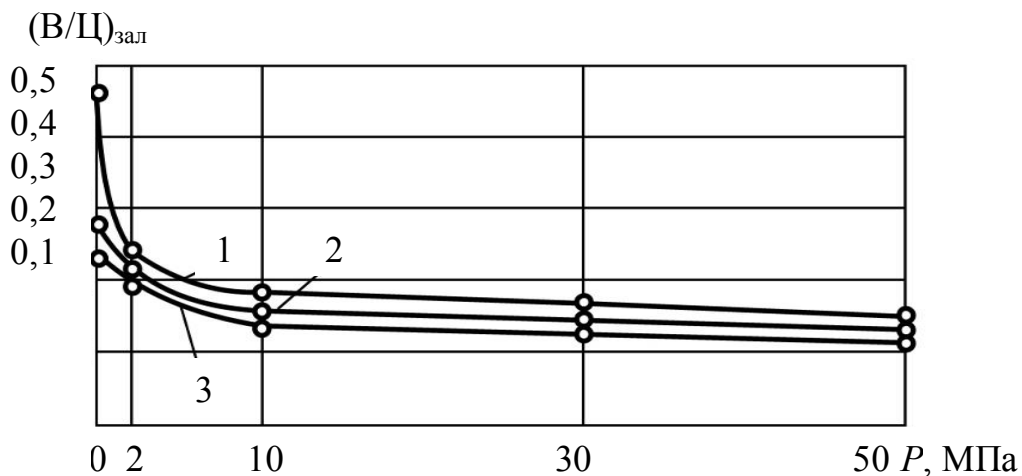


Рисунок 1.2 – Вплив тиску пресування (P) на $(V/C)_{\text{зал}}$ цементного гелю: 1, 2, 3 відповідають $(V/C)_{\text{поч}}$, рівному $1,65 K_{\text{н.г.}}$, $1 K_{\text{н.г.}}$ і $0,876 K_{\text{н.г.}}$.

Він стверджує, що максимальне зближення цементних часток має місце при $X = (V/C)_{\text{поч}} / K_{\text{н.г.}} = 0,876$, де $K_{\text{н.г.}}$ – коефіцієнт нормальної густини цементного тіста. Між $(V/C)_{\text{зал}}$ 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 $0,876 K_{\text{н.Г}}$ 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 тиску 100 МПа [30], на практиці тиск пресування звичайно не перевищує 10...15 МПа (рис. 1.3).

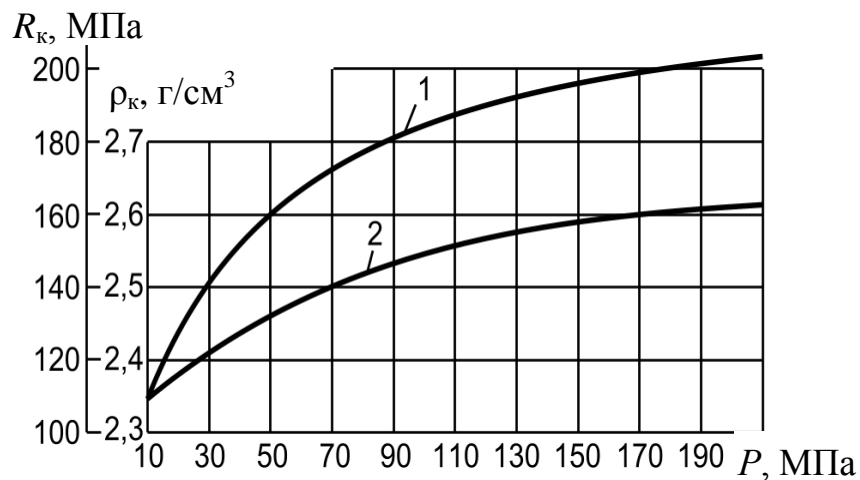


Рисунок 1.3 – Залежність міцності (1) і густини (2) цементного каменю від тиску пресування (P)

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 x 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.

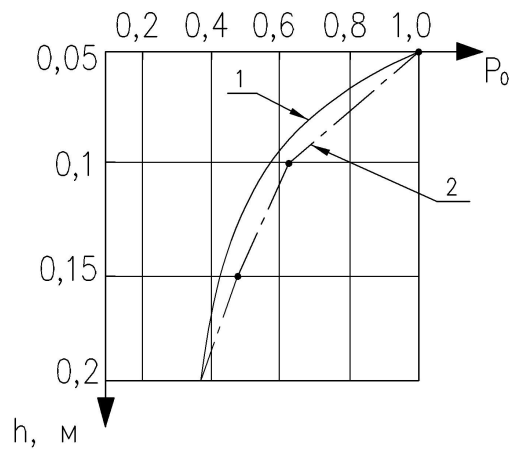


Рисунок 1.4 – Розподіл тиску пресування по висоті цементного гелю, що ущільнюється: 1 – теоретична крива, 2 – крива, побудована за експериментальними даними

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

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 вироби» / 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. Машина 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 формированию 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 : Будиндустрия, 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. Гергега 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. Гергега. – 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.

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 7.10.2014 р.
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.