

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОРНІКОВСЬКА ІРИНА БОГДАНІВНА

УДК 666.973.6:625

ДИСЕРТАЦІЯ
НЕАВТОКЛАВНИЙ ПІНОБЕТОН ДЛЯ ШАРІВ ДОРОЖНИХ ОДЯГІВ
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби»

19 - Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ **І.Б. Горніковська**

Науковий керівник Каганов Вадим Оскарович, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник, доцент

Львів–2020

АНОТАЦІЯ

Горніковська І. Б. Неавтоклавний пінобетон для шарів дорожніх одягів автомобільних доріг. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробництво» (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Основний зміст дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота присвячена актуальним питанням розробки теоретичних основ технології виготовлення дисперсно-армованого пінобетону неавтоклавного тверднення з прогнозованими будівельно-технічними і деформаційними характеристиками з метою можливості його використання в якості теплоізоляційного шару дорожнього одягу автомобільних доріг. Запроектовано ефективні склади пінобетонів дисперсноармованих волокнами поліпропіленової фібри, досліджено їхні будівельно-технічні властивості, здійснено дослідно-промислову апробацію та визначено техніко-економічну ефективність застосування останніх в дорожніх одягах автомобільних доріг.

У результаті проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень отримані наступні наукові результати:

- теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість одержання конструктивно-теплоізоляційних пінобетонів неавтоклавного тверднення з підвищеними експлуатаційними властивостями шляхом тривимірного зміцнення дисперсними волокнами та його застосування як теплоізоляційного прошарку багат шарового дорожнього одягу;

- подальший розвиток отримали закономірності дисперсного армування пінобетону поліпропіленовими волокнами, які, інтегруючись в єдину систему, підвищують її складність і мікрооднорідність, сприяють зростанню границь розділу, на яких відбувається перерозподіл внутрішніх напружень, забезпечують впорядкування субмікроструктури, в результаті чого поліпшують опір руйнуванню та підвищують показники тріщиностійкості;

- вперше розроблені принципи проектування дорожнього одягу з використанням в якості теплоізоляційного прошарку монолітного конструкційно-теплоізоляційного пінобетону, що базуються на визначенні термічного опору теплопередачі конструктиву автодороги, попередженні морозного здимання, та запропоновано технологію застосування розроблених конструктивних рішень;

- встановлено величини необхідного опору теплопередачі дорожнього одягу для різних природно-кліматичних зон України та розроблено номограми для визначення необхідної величини теплоізоляційного прошарку з монолітного конструкційно-теплоізоляційного пінобетону густиною 600, 800 та 1000 кг/м³.

Розроблено ефективні склади дисперсно-армованих ніздрюватих бетонів, впровадження яких при безвібраційній технології бетонування та вирішенні забезпечить скорочення виробничого циклу, підвищить довговічність дорожнього полотна.

Результати роботи були використані Державним дорожнім науково-дослідницьким інститутом імені М. П. Шульгіна «ДерждорНДІ» при розробленні «Рекомендацій з використання в дорожньому будівництві пінобетону» (Р В.2.7-218-03450778-681-2007), будівництві дослідних ділянок автодоріг в Одеській обл., впроваджені у будівельну практику при будівництві нових і реконструкції існуючих автомобільних доріг та влаштуванні благоустрою будівельною компанією „Трембіта”, ТЗОВ „Галичина”, ТЗОВ „Балмікс” та ЖБК "Уманський дім", ПВКТІ "КиївДіпротранс".

Ключові слова: конструктивно-теплоізоляційний пінобетон неавтоклавного тверднення, дисперсне армування, будівельно-технічні властивості, тріщиностійкість, теплоізоляційний шар, дорожній одяг.

ABSTRACT

Gornikovska I. B. Non-autoclave foam concrete for layers of road constructions of highways. Qualification scientific work on the manuscript.

The thesis for candidate degree of engineering science (PhD) in the specialty

05.23.05 «Building materials and products» (19 – Architecture and construction). - Institute of civil and environment engineering Lviv Politechnic National University, Lviv, 2020.

The main content of the thesis.

The dissertation is devoted to the issues of developing theoretical bases of the technology of fiber-reinforced non-autoclave foam concrete with regulated building and technical characteristics for its possible use as a heat-insulating layer of road clothing. The effective composition of foam concrete have been designed, construction and technical properties have been investigated, industrial testing has been carried out and techno-economic efficiency of their use has been calculated.

As a result of the complex theoretical and experimental studies obtained the following scientific results:

- the theoretically substantiated and experimentally confirmed the possibility of obtaining constructional-heat-insulating foam concretes of non-autoclave hardening by three-dimensional hardening of dispersed fibers and its application as a heat-insulating layer of multilayer road-clothes;

- the further development of the disperse reinforcement of foam concrete with polypropylene fibers, which, integrating into a single system, increase its complexity and microhomogeneity, promote the growth of the boundary of the section, which is the redistribution of internal stresses, ensure the ordering of submicrostructure, thereby improving resistance to fracture and increase the index of crack resistance ;

- for the first time the principles of designing road clothes with the use of as a heat-insulating layer of monolithic constructional-heat-insulating foam concrete based on the determination of the thermal resistance of the heat transfer of the road structure, prevention of frost-thawing, and proposed a technology for the application of developed design solutions;

- the values of the required heat transfer resistance of road clothing for different climatic zones of Ukraine were established and nomograms were developed for determining the required value of the insulating layer from monolithic constructional-heat-insulating foam concrete class density D600, D800 and D1000.

Scientific provisions, conclusions and recommendations expressed in this dissertation are logical, theoretically grounded and based on the considerable volume of experimental studies using the method of mathematical modeling of the experiment of modern methods nanomeditsina and design of building composites, and also confirmed by the results of industrial testing and approbation at the international exhibition, international and national conferences. The reliability of the results is confirmed using standard methods of physical and mechanical tests, physico-chemical analysis methods (X-ray diffraction, scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, determination of granulometric composition), proven methodologies, use of calibrated measuring instruments and equipment and the reproducibility of experimental results.

The results of the work were used by the State Road Research Institute of the name of MP Shulgin "DerzhdorNDI" in the development of "Recommendations on the use of road construction foam concrete" (P V.2.7-218-03450778-681-2007) and the construction of experimental sections of highways in Odessa region and implemented in construction practice in the construction of new and reconstruction of existing highways in the western region of Ukraine by the Construction Company "Trembita" and the "Galicia" Ltd.

Keywords: non-autoclave structural and heat-insulating fiber-reinforced foam concrete, dispersed reinforcement, construction and technical properties, fracture toughness, heat-insulating layer, road surface dressing.

Список публікацій здобувача:

У наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:

1. A study of fracture toughness of heavy-weight concrete and foam concrete reinforced by polypropylene fiber for road construction / S. Solodkyu, V. Kahanov, I. Hornikovska, Y. Turba // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 4/5 (76). P. 40–46. ISSN 1729-3774, Scopus.

У фахових виданнях України:

2. Каганов В.О., Горніковська І.Б. Шляхи використання безавтоклавного пінобетону в дорожньому будівництві // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». № 627. 2008. С. 116–121. ISSN 0321-0499.
3. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Дослідження фізико-механічних та експлуатаційних властивостей безавтоклавного пінобетону для дорожнього будівництва // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури. «Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва». Вип. 6(80). 2009. С. 63–69. ISSN 1814-3296.
4. Горніковська І. Б., Демчина Х. Б., Ковальчик Я. І. Дослідження фізико-механічних властивостей пінобетону, армованого фіброю // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. № 37. 2010. С. 100–112.
5. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Забезпечення морозостійкості конструкції дорожнього одягу та земляного полотна автомобільних доріг // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». № 662. – 2010. – С. 201–204. ISSN 0321-0499.
6. Каганов В. О., Горніковська І. Б., Івасів І. С. Експлуатаційні характеристики морозозахисного прошарку дорожнього одягу нежорсткого типу з монолітного безавтоклавного пінобетону // Будівельні матеріали та вироби. №3. 2010. С. 21–23.
7. Взаємний зв'язок міцнісних та деформаційних характеристик безавтоклавного пінобетону / В. Б. Верба, І. Б. Горніковська, Х. Б. Демчина, В. В. Волоцюга, П. О. Голик // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури «Сучасне промислове та цивільне будівництво». Т. 8. № 1. 2012. С. 27–35. ISSN 1819-432X.
8. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Методика розрахунку величини теплоізоляційного прошарку автомобільних доріг нежорсткого типу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». №737. 2012. С. 71–78. ISSN 0321-0499.

9. Дослідження міцності неавтоклавного пінобетону на розтяг при згині / В. В. Волоцюга, Х. Б. Демчина, І. Б. Горніковська, О. А. Гаврилко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 5(35). 2012. С. 161–165.
10. Горніковська І. Б., Каганов В. О. Деформативні характеристики безавтоклавного пінобетону для шарів дорожнього одягу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». 2013. № 755. С. 95–99. ISSN 0321-0499.
11. Горніковська І. Б., Каганов В. О. Тріщиностійкість пінобетонів для дорожнього будівництва // Збірник наукових праць "Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди". Вип. 31. Рівне: НУВГП. 2015. С. 305–312.

Тези та матеріали конференцій:

12. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Тріщиностійкість пінобетонів безавтоклавного виробництва. Збірник матеріалів VIII науково-практичного семінару "Структура, властивості та склад бетону". Вип. 26. Рівне: НУВГП. 2013. С. 179-185. ISSN 2218-1873.
13. Каганов В. О., Горніковська І. Б., Позняк О. Р. Підвищення експлуатаційних властивостей дорожніх одягів автомобільних доріг // Збірник тез доповідей Міжнародної конференції «Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій». 2018. С. 20–22.

Додатково відображають наукові результати дисертації:

14. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Новітні підходи до використання пінобетону в дорожньому будівництві // Бетон і залізобетон. 2009. №5. С. 21–24.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ	16
1.1. Існуючий стан автомобільних доріг в Україні.....	16
1.2. Аналіз дорожньо-будівельних матеріалів для влаштування теплоізоляційного шару дорожнього одягу автомобільних доріг.....	24
1.3. Сучасні методи підвищення експлуатаційних характеристик неавтоклавного пінобетону для шарів дорожнього одягу.....	35
1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза.....	48
Висновки до розділу.....	49
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
2.1. Методологія проведення та блок-схема досліджень.....	51
2.2. Характеристика матеріалів	53
2.3. Фізико-механічні випробування.....	58
2.4. Фізико-хімічні методи досліджень.....	65
Висновки до розділу.....	66
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ПІНОБЕТОНІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ БУДІВЕЛЬНО-ТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ	67
3.1. Дослідження впливу піноутворювачів на властивості портландцементу	68
3.2. Оцінка впливу технологічних факторів на фізико-механічні властивості пінобетонів	72
3.3. Фізико-хімічні особливості структуроутворення ніздрюватих бетонів, армованих дисперсними волокнами	83
3.4. Дослідження будівельно-технічних властивостей конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів	89

Висновки до розділу.....	114
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВЕЛИЧИНИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО ПРОШАРКУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ДИСПЕРСНО-АРМОВАНОГО ПІНОБЕТОНУ.....	117
4.1. Алгоритм розрахунку товщини теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу з конструктивно-теплоізоляційного пінобетону.....	117
4.2. Методика розрахунку теплоізоляційного (морозозахисного) прошарку дорожнього одягу.....	134
4.3. Технологія влаштування захисного теплоізоляційного шару з пінобетону конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу..	138
Висновки до розділу.....	140
РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ФІБРОПІНОБЕТОННИХ ПРОШАРКІВ У КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ.....	142
5.1. Промислова апробація конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів, армованих дисперсними волокнами	142
5.2. Розрахунок економічної ефективності влаштування теплоізоляційних фібропінобетонних прошарків у конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг.....	145
Висновки до розділу	148
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	153
ДОДАТКИ.....	170

ВСТУП

В умовах постійно зростаючого транспортного навантаження, збільшення інтенсивності та швидкості руху по автомагістралях підвищуються витрати на капітальні та поточні ремонти автомобільних доріг для забезпечення безпеки руху по них. Якщо порівняти довговічність дорожнього одягу на вітчизняних та закордонних об'єктах транспортної інфраструктури, то в Україні відзначається у 1,5–2,0 рази менший міжремонтний термін при практично ідентичних кліматичних умовах експлуатації. Крім того, норми розрахунку та якість виконання дорожнього одягу в Україні та країнах світу і Євросоюзу мають певні розбіжності. Типи та властивості будівельно-дорожніх матеріалів, що застосовуються в будівництві та проектуванні автомобільних доріг, також відрізняються.

Одним із шляхів зниження вартості експлуатації та витрат на утримання дорожньо-транспортної інфраструктури є впровадження в проектну та будівельну практику нових конструктивних рішень дорожнього одягу, які б забезпечували високу якість дорожнього покриття протягом нормативного експлуатаційного періоду. Цього можна досягнути за рахунок введення в конструкцію дорожнього одягу в якості протиморозного прошарку ефективного теплоізоляційного матеріалу з метою виключення ефекту морозного здимання дорожнього полотна автомобільних доріг нежорсткого типу.

Пінобетон є універсальним і ефективним теплоізоляційним матеріалом, який широко і давно використовується в цивільному і промисловому будівництві України та закордоном. Влаштування теплоізоляційного прошарку з неавтоклавного пінобетону дає змогу повністю або частково запобігти промерзанню або перегріву основи дорожнього одягу, знизити вплив періодичних температурних коливань навколишнього середовища, що забезпечує підвищення довговічності конструкції дорожнього полотна.

Методики розрахунку параметрів влаштування ефективного теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу, яка б враховувала фактичні

показники теплопровідності усіх шарів дорожнього одягу та виключала ефект морозного здимання дорожнього полотна, в практиці проектування та будівництва автодоріг на території України на даний момент відсутня. У зв'язку з цим, проблема розроблення пінобетонів з підвищеними експлуатаційними властивостями як ефективного теплоізоляційного прошарку для проектування довговічних багат шарових конструкцій дорожнього одягу є практично значимою та актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Робота виконана відповідно до Комплексної державної програми енергозбереження України та Концепції науково-технічної політики в дорожньому господарстві України, що була затверджена Державною службою автомобільних доріг України, Постанови Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2004 року № 684 «Про затвердження програм розвитку виробництва ніздрюватих бетонних виробів та їх використання на 2005-2020 роки», відповідно до пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки, які вказані в Законі України від 11 липня 2001 року № 2623-III «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки». Дисертація виконувалась в межах держбюджетної науково-дослідної роботи «Основи технології створення наномодифікованих надшвидкотверднучих портландцементів та високоміцних дисперсно-армованих композитів з підвищеною ударною в'язкістю на їх основі» (номер держреєстрації 0117U004446) згідно з тематичним планом Міністерства освіти і науки України, де автор дисертації була виконавцем.

Мета і задачі дослідження.

Розроблення конструкційно-теплоізоляційних дисперсно-армованих пінобетонів неавтоклавного тверднення для використання в протиморозних прошарках багат шарових дорожніх одягів автомобільних доріг, а також розвиток принципів раціонального проектування ефективного за теплотехнічними параметрами теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- встановити вплив технологічних факторів та дисперсного армування на міцнісні та деформаційні параметри конструкційно-теплоізоляційних фібропінобетонів неавтоклавного тверднення;
- розробити ефективні склади дисперсно-армованих конструкційно-теплоізоляційних (D600–D1000) неавтоклавних пінобетонів;
- виявити фізико-хімічні особливості гідратації розроблених пінобетонів, армованих дисперсними поліпропіленовими волокнами;
- провести експериментальні дослідження фізико-механічних та теплофізичних характеристик пінобетону неавтоклавного тверднення і дослідити їх будівельно-технічні властивості;
- запропонувати багатошарову конструкцію дорожнього одягу з використанням монолітного конструкційно-теплоізоляційного фібропінобетону для застосування в якості теплоізоляційного прошарку автомобільних доріг;
- розробити методику розрахунку величини теплоізоляційного прошарку з використанням монолітного пінобетону з метою підвищення довговічності дорожнього одягу та усунення впливу ефекту морозного здимання дорожньої основи автомобільних доріг;
- провести практичну апробацію розроблених складів неавтоклавних пінобетонів, армованих дисперсними волокнами поліпропіленової фібри, та обґрунтувати їх техніко-економічну ефективність.

Об'єкт дослідження: процеси направленої регулювання технологічних та будівельно-технічних властивостей пінобетонів неавтоклавного тверднення, дисперсно-армованих волокнами поліпропіленової фібри, для теплоізоляційних шарів дорожнього одягу.

Предмет дослідження: конструкційно-теплоізоляційні дисперсно-армовані пінобетони неавтоклавного тверднення з підвищеними експлуатаційними властивостями для використання в шарах дорожнього одягу автомобільних доріг.

Методи досліджень: Виконання експериментальних досліджень проведено із застосуванням комплексу сучасних методів фізико-хімічного

аналізу, зокрема рентгенівської дифрактометрії, растрової електронної мікроскопії та ін. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-технічних властивостей дисперсно-армованих пінобетонів здійснено згідно з діючими нормативними документами, стандартизованими і оригінальними методиками досліджень. Оптимізацію робочих складів конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів, дисперсно-армованих волокнами поліпропіленової фібри, проведено із застосуванням експериментально-статистичних методів математичного планування експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів неавтоклавного тверднення з підвищеними експлуатаційними характеристиками шляхом тривимірного зміцнення дисперсними поліпропіленовими волокнами фібри та його застосування в якості протиморозного прошарку багат шарового дорожнього одягу автомобільних доріг;

- подальший розвиток отримали закономірності дисперсного армування пінобетону поліпропіленовими волокнами, які інтегруючись в єдину систему, підвищують її мікрооднорідність та сприяють зростанню границь розділу, на яких відбувається перерозподіл внутрішніх напружень, а також забезпечують впорядкування субмікроструктури, в результаті чого в 1,5 рази підвищується опір руйнуванню та в 2,2 рази зростають показники тріщиностійкості матеріалу;

- вперше розроблені принципи проектування дорожнього одягу з використанням в якості протиморозного прошарку монолітного конструкційно-теплоізоляційного фібропінобетону, які базуються на визначенні опору теплопередачі конструктиву автодороги та виключенні ефекту морозного здимання, з пропозиціями щодо технології застосування розроблених конструктивних рішень;

- вперше встановлено розрахункові величини необхідного опору теплопередачі дорожнього одягу для природно-кліматичних районів України та розроблено номограми з метою практичного визначення оптимальних

параметрів теплоізоляційного прошарку з монолітного конструкційно-теплоізоляційного неавтоклавного фібропінобетону марок за густиною D600, D800 та D1000.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблено ефективні склади конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів неавтоклавного тверднення для теплоізоляційних шарів дорожнього одягу з метою вирішення завдань підвищення показників довговічності, скорочення виробничого циклу, інтенсифікації продуктивності праці, економії трудових та енергетичних ресурсів;

- результати роботи використані Державним дорожнім науково-дослідницьким інститутом імені М.П. Шульгіна «ДерждорНДІ» у процесі розроблення «Рекомендацій з використання в дорожньому будівництві пінобетону» (Р В.2.7-218-03450778-681-2007) та під час будівництва дослідно-промислових ділянок магістральних автомобільних доріг в Одеській обл. Результати досліджень впроваджені в будівельну практику при будівництві нових і реконструкції існуючих автомобільних доріг України будівельними компаніями «Трембіта», ТзОВ «Галичина», ТзОВ «Балмікс», ЖБК «Уманський дім» та ПВКТІ КиївДіпротрас».

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні експериментальних досліджень, обробленні одержаних даних, впровадженні результатів роботи у будівельно-дорожню практику. Усі наукові результати дослідження дисертаційної роботи отримані автором особисто. У роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1, 12, 13] – проведення досліджень тріщиностійкості пінобетону неавтоклавного тверднення, армованого та неармованого волокнами поліпропіленової фібри; [2, 4, 14] – розроблення багатошарової конструкції дорожнього одягу з використанням монолітного конструкційно-теплоізоляційного пінобетону неавтоклавного тверднення природньої вологості в якості теплоізоляційного прошарку; [3, 5, 7] – проведення експериментальних досліджень основних фізико-механічних характеристик монолітного неавтоклавного пінобетону марок за густиною D600, D800 та

D1000; [6, 9] – розроблення методики розрахунку величини теплоізоляційного прошарку з використанням монолітного пінобетону та встановлено величини необхідного опору теплопередачі конструктиву дорожнього одягу для природно-кліматичних районів України; [8, 10, 11] – встановлення математичних залежностей міцності пінобетону на центральний розтяг для зразків призм і проаналізовано отримані результати міцності та деформативності пінобетонів відповідної густини.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: Всеукраїнській Інтернет-конференції молодих учених та студентів «Проблеми сучасного будівництва» (Полтава, 2012); VIII науково-практичному семінарі «Структура, властивості та склад бетону» (Рівне, 2013); XI науково-практичному семінарі «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (Рівне, 2015); Міжнародній конференції «Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій» (Одеса, 2018) і на науково-технічних семінарах та конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету «Львівська політехніка» в період з 2008 по 2020 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з яких 10 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття в науковому періодичному виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз, 2 – у матеріалах і тезах конференцій та семінарів, 1 наукова праця, яка додатково відображає отримані наукові результати виконаної дисертації.

Структура та обсяг роботи. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 132 сторінках друкованого тексту і складається із вступу, п'яти розділів та загальних висновків. Повний обсяг дисертації становить 178 сторінок, що включає 26 таблиць, 52 рисунки, список використаних джерел із 158 найменувань на 17 сторінках та 7 додатків на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Існуючий стан автомобільних доріг в Україні

Мережа автомобільних доріг – одна із основних складових транспортної системи України, що в значній мірі задовольняє потреби суспільства в пасажирських та вантажних перевезеннях автомобільним транспортом. Поетапна інтеграція України у Європейську та світову економіку, розширення торговельно-економічних зв'язків з країнами близького та дальнього зарубіжжя, подальший розвиток галузей економіки, підвищення рівня життя населення на фоні незадовільного транспортно-експлуатаційного стану більшості автомобільних доріг спонукає до необхідності розвитку вітчизняної дорожньо-транспортної мережі.

За забезпеченістю автомобільними дорогами з розрахунку на 1000 км² території та на кожних 1000 мешканців, Україна посідає одне з останніх місць серед європейських країн. Існуюча мережа автомобільних доріг загального користування за протяжністю 169,4 тис. км та щільністю на 1000 км² території 281 км доріг на сьогоднішній день задовольняє лише базові національні потреби економіки та потреб населення у перевезеннях. При цьому існуючий низький рівень забезпеченості автомобільних доріг України загального користування практично не змінюється вже достатньо тривалий час, у зв'язку з дуже малими обсягами будівництва нових доріг. Так, за останні десять років було побудовано лише 1460 км автомобільних доріг загального користування [92]. Для забезпечення економічного та соціального розвитку України на найближчі роки необхідно забезпечити та привести транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг України у відповідність до європейських стандартів та вимог.

Згідно з концепцією розвитку транспортно-дорожнього комплексу України до 2020 року та у подальший період [54], концепцією розвитку

дорожньо-проїжджої мережі України на середньостроковий період та до 2020 року, концепцією Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування на період з 2013 до 2018 року, транспортною стратегією розвитку автомобільних доріг України на період до 2020 року [110], транспортної політики України та її наближення до норм Європейського Союзу (ЄС) [42] перспективи удосконалення і розвитку автомобільних доріг загального користування базуються на вирішенні наявних проблем транспортно-дорожнього комплексу та із здійсненням програми в напрямку їх інтеграції до Європейської транспортної мережі, яка спрямована на приведення стану автомобільних доріг до відповідних вимог Євросоюзу. У вище згаданих сучасних українських нормативних документах зазначено проблеми існуючого стану та розвитку автомобільних доріг, зокрема:

- недостатній ступінь використання геополітичного положення України та можливостей її транспортних комунікацій для забезпечення міжнародного транзиту вантажів територією України;
- незадовільний транспортно-експлуатаційний стан автодоріг;
- невідповідність технічних стандартів будівництва автомобільних доріг України стандартам ЄС за якістю покриття та ваговими навантаженнями;
- незадовільний рівень організації безпеки дорожнього руху;
- відставання розвитку автомобільних доріг загального користування від темпів процесу автомобілізації країни;
- низький рівень сервісного обслуговування автокористувачів;
- недостатній обсяг фінансування та залучення інвестицій у розбудову доріг і розвиток дорожньо-транспортної галузі.

У відповідності до закону України "Про транспорт" єдина транспортна система повинна відповідати вимогам суспільного виробництва та національної безпеки, мати розгалужену інфраструктуру для надання всього комплексу автотранспортних послуг та забезпечувати зовнішньоекономічні зв'язки України.

При дослідженні стану, проблем та перспектив розвитку транспортної інфраструктури України вітчизняні дослідники В.О. Галушко [19], Н.В. Кудрицької [59], В.П. Мікловда [69], А.М. Новікова [77], Ю.Є. Пащенко [85], Д.К. Прейгера [90], Я.В. Шевчука [116], І.Р. Юхновського [120] та ін., в своїх працях відзначають незадовільний транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг. Окрім даної першочергової проблеми науковці Н.В. Кудрицька [59], Ю.Є. Пащенко [85], Д.К. Прейгер [90], що розглядали та аналізували стан мереж автомобільних доріг України в контексті транспортно-дорожнього комплексу, зосереджують свою увагу на значну транспортну перевантаженість окремих ділянок автомобільних магістралей, низьку щільність автомобільних доріг з твердим покриттям та високу аварійність при русі автомобільного транспорту.

В.П. Мікловда [69] та Я.В. Шевчук [116] до ключових проблем інтеграції мережі автомобільних доріг України до європейської транспортної мережі відносять невідповідність технічних стандартів будівництва автомобільних доріг України стандартам ЄС за якістю та ваговими навантаженнями, незадовільний рівень організації безпеки дорожнього руху та недостатній обсяг інвестицій у розбудову доріг і розвиток автодорожньої галузі.

Найбільшу частку мережі автомобільних доріг загального користування згідно з даними бюлетеня Державного агентства автомобільних доріг України „Протяжність і характеристика автомобільних доріг загального користування на 01.01.2013 р.” [92] складають дороги IV категорії (62,4 %), тоді як на найнижчу V категорію припадає 8,4 %. Всього ж до низьких категорій можна віднести 73,3% всіх доріг в Україні, що для нормальної експлуатації зростаючого парку сучасної імпортової техніки є суттєво недостатньо. Разом з тим, тільки дороги I категорії за своїми технічними характеристиками наближені до європейських норм [41], але на сьогоднішній день частка таких доріг в Україні становить лише 1,67 %. Незадовільним є транспортно-експлуатаційний стан автодоріг: 51,1 % не відповідає вимогам за рівністю, 39,2 % - за міцністю. Через низький технічний рівень мережі автомобільних доріг, невідповідність параметрів доріг

інтенсивності дорожнього руху та складу рухомого парку, перевантаження окремих ділянок доріг, середня швидкість руху на дорогах складає 30-40 км/год, що у два рази нижче за європейські показники [42].

Недостатня експлуатаційна якість покриття автомобільних доріг зумовлює зниження експлуатаційних швидкостей транспортних засобів, підвищення витрат пально-мастильних матеріалів та збільшення частки транспортної складової у собівартості продукції. У тому, що собівартість перевезень у 1,5 рази, а витрати пального на 30 % перевищують аналогічні показники у розвинутих європейських країнах, існує значний вплив також і саме дорожньої складової. Все це разом з недостатнім розвитком інфраструктури не приваблює іноземних перевізників, стримує ріст вітчизняних транспортних перевезень та призводить до того, що транзитні перевезення автомобільними дорогами України збільшуються дуже повільно.

Автодороги нежорсткого типу в достатній степені не витримують навіть знижених міжремонтних експлуатаційних термінів служби. Відповідно до аналізу Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор), станом на сьогодні термінового ремонту потребують близько 80% загальної мережі автошляхів, а капітального ремонту та перебудови – понад 60% автодорожніх мостів, рівень зношеності штучних споруд на дорогах складає 43,7% [81, 82]. На сьогодні в Україні потребують капітального ремонту до 40 тис. км. доріг при їх загальній протяжності в 169,7 тис. км. Україна щорічно втрачає від незадовільного техніко-економічного стану доріг близько 20 млрд. грн, що є логічним результатом відсутності новітніх технологій, оптимальних методів розрахунку і впровадження сучасних дорожніх будівельних матеріалів, що з'являються на будівельному на ринку України при влаштуванні дорожніх одягів автодоріг у XXI столітті.

Рівень безпеки, показники якості та ефективності перевезень пасажирів та вантажів, енергоефективності, техногенного навантаження на довкілля не відповідають сучасним вимогам. За даними наведеними в дослідженнях [53, 85] ступінь невідповідності автомобільних доріг України європейським стандартам

стосується показників швидкості пересування, навантаження на вісь, оснащенням дорожньо-проїжджої мережі сучасними дорожніми знаками і розміткою, необхідною кількістю пунктів технічної та медичної допомоги, закладами харчування і відпочинку, пунктами заправлення паливом і мастилом, забезпеченням сталим телефонним зв'язком та ін. Практично відсутні дороги 1-ї категорії з багаторядним рухом на високих швидкостях. Значного поліпшення вимагає матеріально-технічна база дорожніх та експлуатаційних організацій, що здійснюють розвиток і обслуговування автомобільної транспортної мережі.

Спостерігається значне відставання в розвитку транспортної мережі, перш за все в розвитку автомобільних доріг загального користування від темпів загальної автомобілізації країни. Протягом останніх двадцяти років протяжність останніх практично не збільшувалася, а в той час як за цей самий період у Європі швидкими темпами створювались автомагістралі. У результаті щільність автомобільних доріг в Україні у 5,9 рази менша, ніж у Франції (відповідно 0,28 та 1,65 км доріг на 1 км² площі країни). Протяжність швидкісних доріг становить, тис. км: в Україні 0,28, у Німеччині - 10,9, у Франції – 7,1; а рівень фінансування одного кілометра автодоріг в Україні відповідно у 5,5 – 6 разів нижчий, ніж фінансування дорожньої інфраструктури у зазначених країнах [56, 59, 97].

В умовах зростаючого транспортного навантаження, збільшення інтенсивності та швидкості руху по автомагістралях та автомобільних дорогах зростають витрати на часті капітальні та поточні ремонти автомобільних доріг для забезпечення безпеки руху по них. Довговічність дорожнього одягу на вітчизняних об'єктах транспортної інфраструктури, що оцінюється міжремонтним терміном, при практично однакових кліматичних умовах експлуатації в півтора-два рази менший, ніж на закордонних [79]. Масштаб ямковості в Україні на автомобільних дорогах загального користування становить 4,2 млн м², в тому числі 2,0 млн м² на автомобільних дорогах державного значення загальною протяжністю 23 тис. км.

Незадовільним є рівень безпеки дорожнього руху зумовлений високим рівнем смертності та дорожньо-транспортного травматизму. У середньому за добу в автомобільних катастрофах гинуть понад 20 і отримують травми близько 200 учасників дорожнього руху. Кількість загиблих на 1000 автомобілів в Україні перевищує відповідний показник Польщі у 2,5 разу, Франції – у 5–6 разів, Швеції – у 10–11 разів. Тяжкість наслідків дорожньо-транспортних пригод (ДТП) в Україні є в 1,5–5 разів вища, ніж в країнах ЄС [82].

Основними причинами ДТП, що виникають через наступні дорожні дефекти: конструктивні дефекти автодоріг; слизьке та нерівне покриття; відсутність огорожі, розмітки проїжджої частини, пішохідних тротуарів та велосипедних доріжок; недостатня ширина і незадовільний стан узбіч; відсутність дорожніх знаків у всіх необхідних місцях; неналежне утримання доріг, в тому числі в зимовий період; недостатнє освітлення; звуження проїжджої частини автодорожніми механізмами та складуванням будівельних матеріалів та інше. Відповідно до статистичних даних Управління Державтоінспекції Міністерства внутрішніх справ України [82] частка ДТП, що спричинені незадовільним станом автомобільних доріг та невідповідністю дорожніх умов характеру та інтенсивності руху, становить від 20 до 30%.

Відносна кількість загиблих в Україні у 7–10 разів більша, ніж у розвинених країнах Євросоюзу. Наслідки ДТП в Україні завдають збитків у розмірі до 1,4 % загального внутрішнього валового продукту. Через кілька років кількість автомобілів, ризики аварійності та, відповідно, збитки можуть суттєво зрости. Якщо не вживати кардинальних заходів з підвищення рівня безпеки на дорогах, то будуть суттєво стримуватися інвестиції в економіку країни, по причині небезпеки в процесі пересування та транспортування вантажів вулично-дорожньою мережею України.

На транспортно-експлуатаційний стан дорожньої мережі активно впливають кліматичні умови, що пов'язано з приналежністю автомобільних доріг до відповідної дорожньо-кліматичної зони України за даними ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Сезонність в утриманні та експлуатації доріг супроводжується

істотними змінами в стані поверхні дороги та умовах автомобільно-дорожнього руху, зокрема для основної більшості регіонів України спостерігаються ускладнення в зимовий та осінньо-весінній періоди, а для регіонів з сухим та спекотним кліматом у літній період. Специфіка діяльності дорожньо-експлуатаційних організацій при цьому полягає у забезпеченні зручності та організації безпеки руху автомобільного транспорту у найбільш складні періоди року, за допомогою відповідних сучасних методів розрахунку і технологій виконання дорожніх робіт на автомобільних дорогах.

Значна територія України розташована на ґрунтах з низькою несучою здатністю. Ґрунти, переважно глинистої природи. За дорожньою класифікацією їх відносять до здимальних та дуже здимальних [103, 105]. Це ґрунти, які взимку, в зволоженому стані здимаються, а весною просідають під дією сонячної радіації. Здиманню також сприяють: високий рівень ґрунтових вод, затяжні осінні та весняні дощі, м'яка зима з повільним промерзанням ґрунту та частими відлигами, які чергуються з морозами (що є типовим для клімату західних та південних областей України), різке коливання температур весною, випадання опадів в період відтавання конструктиву дорожнього одягу автомагістралей та міських доріг і вулиць. Такі несприятливі кліматичні умови не сприяють нормативному стану автомобільних доріг на довготривалій період. В умовах міських магістралей проблема несприятливих ґрунтів ускладнюється наявністю широкої мережі інженерних комунікацій, які спричиняють негативний вплив на водно-теплові процеси в ґрунтах основи дорожніх одягів автомобільних доріг [10, 79].

Будівництво сучасних автомобільних доріг потребує використання дороговартісних матеріалів. Оскільки вимоги до довговічності та безпеки автомагістралей зростають, то спеціалісти дорожньої галузі в цілому світі вивчають і впроваджують нові технології, котрі закладають умови для поліпшення якісних характеристик та процесу економії коштів і матеріальних ресурсів.

Відповідно до концепції науково-технічної політики в дорожньому господарстві України, затвердженої Державною службою автомобільних доріг України та схваленої рішенням Науково-технічної ради Укравтодору, як напрямки науково-технічної політики виділено впровадження нових дорожньо-будівельних матеріалів і конструкцій та сучасних технологій, впровадження прогресивних розрахункових підходів та проектних рішень для забезпечення якості дорожньо-будівельних та ремонтних робіт; створення безпечних умов функціонування дорожнього комплексу. Для реалізації концепції сформовані актуальні задачі для вирішення в дорожньому будівництві, зокрема орієнтування наукових досліджень на розробку та науковий супровід нових матеріалів, конструкцій, енерго- та ресурсозберігаючих технологічних процесів на світовому рівні; створення умов та економічних і нормативно-правових механізмів щодо прискорення впровадження нових матеріалів (у т.ч. для армування дорожніх одягів та земляного полотна, емульгаторів та модифікаторів для органічних в'язучих, щебенево-мастикового асфальтобетону тощо), конструкцій та технологій, які забезпечують високу якість робіт та зростання довговічності доріг і дорожніх споруд; удосконалення методів проектування автомобільних доріг на нових принципах; розробка комплексу організаційно-технічних заходів підвищення якості будівництва, ремонту та експлуатаційного утримання автомобільних доріг та споруд на них.

Реалізація положень вищезазначеної концепції Укравтодору дозволить підвищити експлуатаційно-споживчі якості автомобільних доріг та термін їх служби; зменшити питомі витрати матеріальних, трудових та фінансових ресурсів на будівництво, реконструкцію, скоротити терміни міжремонтного циклу та затрати на експлуатаційне утримання автомобільних доріг; зменшенням кількості дорожньо-транспортних пригод по причині незадовільних дорожніх умов, зменшити загальну кількість постраждалих у них та втрат від ДТП; унеможливити негативний вплив від експлуатації автомобільних доріг та дорожньо-транспортної мережі та автомобільного транспорту на довкілля.

Оскільки, існуюча вулично-транспортна мережа автомобільних доріг характеризується значним ступенем фізичного та морального зношення та фактично не задовольняє нагальні потреби економічного розвитку та впливає на перспективу інтеграції України з ЄС, то для забезпечення зовнішньоторговельних зв'язків України та зміцнення позицій вітчизняних транспортних підприємств наряду з поетапною інтеграцією транспортно-дорожнього комплексу України в Європейську та світову транспортні системи необхідно активізувати темпи впровадження сучасних науково-технічних досягнень та новітніх технологій виконання дорожніх робіт із застосуванням новітніх будівельних матеріалів.

1.2. Аналіз сучасних дорожньо-будівельних матеріалів для влаштування теплоізоляційного шару дорожнього одягу автомобільних доріг

Автомобільні дороги принципово відрізняються від більшості будівельних споруд іншого призначення. В конструктивному відношенні вони характеризуються значною протяжністю, наближенням до фактичного рельєфу, малою матеріаломісткістю верхнього шару покриття з різними видами поверхні (асфальтобетон, цемент, бетон, ЩМА і т.д.), що контактує на значній площі в рівній степені з двома різнорідними середовищами – природним середовищем довкілля та ґрунтом основи дороги, або штучною спорудою [1,2,3].

На даний час на автомобільних дорогах України, як і в цілому світі, переважають дорожні одяги нежорсткого типу з декількома асфальтобетонними поверхневими шарами. Так, 81 % державних автодоріг України мають асфальтобетонне покриття, 8,7% – цементобетонне і 10,2 % – чорне. Асфальтобетонними є 51,1 % територіальних доріг, 23,8 % районних і 19,8 % сільських [81]. Поряд з високими технологічними та експлуатаційними

показниками згадані вище покриття нежорсткого типу характеризується суттєвими недоліками – високою чутливістю до температурно-зволожувальних коливань, безперервних змін міцності та деформативних характеристик з плином часу у зв'язку з природним старінням в'язучого, що суттєво ускладнює позитивний прогноз щодо їхньої довговічності. Такі конструкції дорожнього одягу автодоріг нежорсткого типу зазвичай під дією транспортного навантаження пришвидшено руйнуються, що потребує непланових ремонтів вже в ранньому періоді експлуатації [56, 79, 109]. Порівняння міжремонтних термінів служби вказує на тенденцію їх скорочення на протязі останніх 20 років [79]. Руйнування дорожніх одягів автомобільних доріг проявляються різною мірою в залежності від режиму їхнього режиму експлуатації та характеру навантаження, визначаються фізико-хімічними, механічними та погодно-кліматичними чинниками впливу, які в результаті спільної дії впливають на зміну якісних характеристик дорожнього покриття нежорсткого типу в процесі експлуатації.

Однією з причин погіршення стану автомобільних доріг значною мірою є невідповідність експлуатаційних характеристик дорожньо-будівельних матеріалів підвищеним транспортним навантаженням та певною недосконалістю методів розрахунку при проектуванні дорожніх одягів. В залежності від терміну служби та рівня надійності дорожній одяг нежорсткого типу поділяють на три типи: капітальний, полегшений та перехідний [103]. При виборі конструктивного типу дорожнього одягу виходять із інтенсивності руху, складу та умов інтенсивності транспортного потоку, вимог безпеки, комфортності руху, природних умов та актуальних техніко-економічних розрахунків. При проектуванні необхідно враховувати специфіку кожного кліматичного регіону, яка залежить від погодних умов, місцезнаходження та ролі даного регіону України для загальної економіки країни в цілому.

Транспортне будівництво в цілому та дорожнє будівництво, зокрема, є галуззю матеріало- та енергоємною, що накладає свій відбиток на вартість та терміни виконання ремонтно-будівельних робіт. У більшості випадків при

будівництві земляного полотна та дорожніх одягів застосовують традиційні водостійкі і морозостійкі (стабільні) щебеневі, піщані або піщано-гравійні матеріали, що зберігають достатню міцність і стійкість незалежно від інтенсивності впливу водно-теплого режиму [91]. Такі конструктиви дорожніх одягів мають суттєву вартість, і їх застосування можливо тільки після проведення відповідних техніко-економічних розрахунків.

Важливою характеристикою автомобільних доріг є багат шаровість дорожнього одягу або безпосередньо дорожнього несучого шару. При цьому пористий характер, як основного матеріалу покриття – бетону, як на органічному, так і на неорганічному в'язучому, а також і основи з підстиляючим ґрунтом, в тому числі. Разом з тим, багат шаровість конструкцій дорожнього одягу може викликати певну концентрацію температурного впливу на границі розподілу шарів одягу, тобто саме там, де має існувати ефективний зв'язок між елементами покриття [103-105].

Для підвищення довговічності дорожніх шарів на практиці досить широко застосовують як армувальні прошарки у вигляді синтетичних матеріалів, так і інші варіанти прошарків. Але ефективність їхнього застосування не підкріплено обґрунтуванням та теоретичною базою, яка б дозволяла докладно розраховувати асфальтобетонні шари дорожнього одягу з урахуванням всіх особливостей роботи армуючих синтетичних прошарків.

У відповідності до вимог чинних будівельних норм шари дорожнього одягу повинні не лише сприймати навантаження, а й також здійснювати вплив на зміну глибини промерзання земляного полотна. Глибина проникнення температури, що складає $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, у ґрунт не завжди співпадає з фактичною глибиною промерзання, тобто, зазвичай, глибина промерзання ґрунту становить меншу величину за глибину збереження в полотні температури $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під асфальто-бетонним покриттям автомобільних магістралей, місцевих автодоріг загального призначення, міських вулиць та пішохідних майданчиків глибина промерзання є значно більшою, ніж під площами з трав'яним покривом, які взимку вкриті сніговим шаром.

Температурний режим ґрунту, що знаходиться під дорожнім полотном, формується під впливом двох основних факторів – сонячної радіації, що падає на поверхню та потоком радіогенного тепла земних надр. Сезонні та добові зміни інтенсивності сонячної радіації, температури зовнішнього повітря та зміни в інтенсивності випромінювання сонячної радіації впливають на зміни в розповсюдженні температури в ґрунті. Вона, в залежності від конкретних ґрунтово-кліматично-гідрологічних умов регіону, які можуть коливатись в межах від кількох десятків сантиметрів до півтора метра вглиб ґрунту. Ґрунт на глибині нижче 10 м практично ніколи не підлягає впливу сезонного коливання температур.

На сьогоднішній день в Україні під час будівництва автодоріг нежорсткого типу з монолітними цементно-бетонним і асфальтобетонним верхнім покриттями використовують, зазвичай, морозозахисний шар з крупно- і середньозернистих пісків (до 95 %). Незважаючи на це дане конструктивне рішення дорожнього одягу не гарантує захисту від процесу здимання при промерзанні ґрунту під дорожнім одягом та від в подальшому осідання в період його відтавання навесні.

Дослідження та застосування різних теплоізоляційних матеріалів для застосування у дорожньому будівництві розпочались ще у середині ХХ ст., оскільки зазначена вище проблема зниження величини промерзання земляного полотна дорожнього одягу була завжди важливою для будівництва автомобільних доріг.

Техніко-економічний аналіз будівництва дослідно-промислових ділянок в кінці ХХ ст. та на початку ХХІ ст. засвідчив, що конструктив дорожнього одягу цих ділянок виявився в певній мірі дешевшим, ніж конструктив із застосуванням будівельного піску в якості морозозахисного шару. В цілому, слід зауважити, що дорожній одяг є найвартіснішою частиною будівництва автомобільних доріг, при цьому затрати на його влаштування можуть становити до 70 % від загальної вартості будівництва ділянки автомобільної дороги.

Вітчизняний та закордонний досвід будівництва автомобільних доріг довів ефективність застосування теплоізоляційних матеріалів в конструкції дорожнього одягу. Ідея перших експериментальних досліджень застосування ефективних теплоізоляційних конструкцій дорожнього одягу полягала у процесі зменшення глибини промерзання та, відповідно, величини теплозахисного насипу за рахунок використання ефективних дорожньо-будівельних матеріалів. Спочатку як теплоізоляційні матеріали використовували тирсу, шлак, торф, мох, деревину тощо. Закордоном були спроби використовувати скловату, деревоволокнисті плити і мінеральні волокна, а також ізоляційні матеріали на основі пінополістиролу [89, 91]. Діюча нормативна документація в галузі будівництва автомобільних доріг нежорсткого типу за кордоном [89, 91] передбачає застосування наступних теплоізоляційних матеріалів: як аглопорити або керамзит, керамзитобетон, стиропорбетон, пінополістирол та пеноплекс, які не включені в перелік дорожньо-будівельних матеріалів дозволених нормативною документацією України.

Застосування теплоізоляційного шару в конструкції дорожнього одягу дозволяє зменшити товщину насипу; обмежити або повністю запобігти промерзанню підстилаючого ґрунту земляного полотна; знизити матеріаломісткість дорожнього одягу за рахунок застосування нетрадиційних конструктивних рішень, процес зменшення витрат забезпечується за рахунок заміни традиційних будівельних матеріалів (піску, щебеню, гравію), при забезпеченні проектної морозостійкості дорожнього одягу за допомогою новітніх матеріалів; процесу запобігання втрат ресурсів при продавлюванні в м'який ґрунт або болотисту основу сипучих будівельних матеріалів; дозволяє виключити необхідність заміни у верхній частині земляного полотна ґрунтів, що піддаються ефекту спучування або мають низьку несучу здатність; створює умови для використання в земляному полотні існуючих ґрунтів та місцевих дорожньо-будівельних матеріалів.

Використання теплоізоляційних прошарків при цьому не вимагає застосування важкої вібраційної будівельної техніки для ущільнення дорожньої

основи на відміну від використання в автомобільних дорогах традиційних сипучих матеріалів для основ дорожнього одягу, при цьому забезпечується скорочення витрат на транспортування будівельних матеріалів; знижується трудовитрати при будівництві доріг та затрати на їх поточний ремонт; значно підвищується експлуатаційна надійність і термін служби дорожніх покриттів; скорочується кількість працівників та одиниць дорожньої техніки, що залучається при виконанні робіт з будівництва доріг.

Слід зазначити, що протягом останнього десятиріччя широкого застосування набули теплоізоляційні матеріали з екструдованого пінополістиролу при влаштуванні автомобільних доріг [91]. Разом з тим, використання пінополістиролу в дорожньому будівництві вимагає влаштування вирівнюючої основи з піску, а сама технологія влаштування теплоізоляційного шару є трудомісткою та вартісною, оскільки для забезпечення рівномірної роботи плит в конструкції дорожнього одягу їх слід укласти в шаховому порядку та закріпляти кожний четвертий ряд металевими анкерами в несучі шари, що створює численні містки холоду та впливає на ефективність експлуатації всього конструктиву автодороги.

У країнах Євросоюзу, де проблема експлуатації автотранспортної мережі ускладнюється дією низьких температур, значну територію займають слабкі ґрунти, особливо в районах, що межують з морем, в конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу використовують не лише пінополістироли різних марок, а й такі теплоізоляційні матеріали як ніздрюваті та легкі бетони (стиропорбетон, керамзитобетон тощо). Якщо в якості теплоізоляційного шару конструкції дорожнього одягу використовувати монолітні будівельні матеріали (стиропорбетон, керамзитобетон тощо), то зникає необхідність влаштування додаткового вирівнюючого шару та складної технології укладання та закріплення утеплювача з окремих плит.

Активне впровадження в дорожнє будівництво ніздрюватих бетонів відбувається у Польщі при ремонті мостів, будівництві доріг і паркінгів. У дорожньому будівництві країн Євросоюзу пінобетон застосовують не лише у

якості теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу, але і для будівництва доріг – підсилення слабих основ, як альтернатива щебеневих сумішей; ремонту та будівництва мостів – в місцях сполучення з підходами для покращення характеристик основи, заповнення порожнин, місць розмивів; ремонту та будівництва водопропускних труб – заповнення та ін'єктування порожнин і розмивів; ремонту та будівництва тунелів – заповнення та ін'єктування порожнин, розмивів [20]. У конструкціях дорожнього одягу пінобетон може виконувати одразу дві функціональні задачі: теплоізоляційного прошарку та елемента для розподілення навантажень в масиві дорожнього одягу [11, 107].

Пінобетон є універсальним і ефективним теплоізоляційним матеріалом, який широко і давно використовуються в цивільному і промисловому будівництві України та за її межами. Його, порівняно недавнє, застосування в дорожньому будівництві дозволяє повністю або частково запобігати ефекту промерзання земляного полотна або перегріву основи дорожнього одягу (грунту або іншого матеріалу в залежності від обраної конструкції дорожнього одягу). Конструкція дорожнього одягу з пінобетонним прошарком дозволяє ліквідувати періодичні хвилеподібні температурні впливи навколишнього середовища, чим значно підвищує довговічність даної конструкції []. Влаштування теплоізоляційного прошарку з неавтоклавного пінобетону дозволяє суттєво скоротити терміни будівництва, що досягається за рахунок економії електроенергії при стаціонарному виробництві пінобетону, зменшення кількості працівників, відсутністю необхідності застосування значної кількості будівельно-дорожньої техніки.

Особливості виготовлення констукційно-теплоізоляційного пінобетону, умови його тверднення та специфіка його виробництва при умові забезпечення прогнозованих властивостей вивчали багато вітчизняних та закордонних дослідників. До їх числа слід віднести представників школи будівельного матеріалознавства Одеської академії будівництва та архітектури під керівництвом професорів Вирового В.М. та Мартинова В.І., які наприкінці ХХ на початку ХХІ століття здійснили низку фундаментальних досліджень та

сформулювали експериментально-теоретичні основи для впровадження пінобетонів у сучасний будівельний процес [65-68]. Професором Мартиновим В.І. встановлено причинно-наслідковий зв'язок між будівельно-технічними властивостями неавтоклавно пінобетону і системою рецептурно-технологічних факторів, поетапно проаналізовано всі фази формування системи "пінобетон" з моменту приготування та забезпечення необхідної стійкості піни до етапу перемішування будівельного розчину з піною та переходом в заключну стадію формування первинної структури пінобетону [132]. У працях Мартинова В.І. обґрунтовано, як формується трифазна система з твердої (Т), газової (Г) та рідкої (Р) складових пінобетону, що на кінцевому етапі трансформується у двокомпонентну структуру (Т+Г), яка і визначає базові фізико-технічні властивості конструкційно-теплоізоляційного пінобетону густиною від 600 до 1000 кг/м³ [87, 132].

Розрахункові залежності міцнісних характеристик пінобетону від його густини, запропоновані в працях Вирового В.М. та Мартинова В.І., підтверджують їх коректність для визначення робочих складів ніздрюватих бетонів з наперед заданими властивостями та широко використовуються в дорожньо-будівельній практиці та реальному секторі виробництва будівельних матеріалів і виробів на підприємствах України.

Програма розвитку та застосування енергоощадних технологій у будівництві України дає поштовх до широкого застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів, зокрема в транспортному будівництві, при спорудженні автомобільних доріг, мостів, шляхопроводів, тунелів. Крім того, пінобетон є досить технологічним матеріалом (завдяки використанню сучасних піноутворювачів та раціонально підібраних складів), який може виконувати відразу дві функції – теплоізоляції і розподілу навантажень в масиві дорожнього одягу. При цьому його конструктивна та технологічна довговічність надає йому певні переваги над іншими матеріалами для влаштування дорожнього одягу.

Конструкційно-теплоізоляційний пінобетон природної вологості характеризується всіма необхідними перевагами та відповідає сучасним

вимогам, що стосуються теплоізоляційних будівельних матеріалів. Тому його можна назвати стратегічним матеріалом в дорожньо-транспортному будівництві, зокрема при влаштуванні автомобільних доріг нежорсткого типу. По-перше, він дозволяє ефективно забезпечити теплофізичні властивості дорожнього полотна автомобільних доріг та суттєво вплинути на ефект зимового здимання земляного полотна. По-друге, пінобетон успішно конкурує з іншими конструкційно-теплоізоляційними матеріалами, що застосовуються в якості шарів дорожнього одягу для автодоріг нежорсткого типу. По-третє, використання конструкційно-теплоізоляційного пінобетону з середньою густиною від 600 до 1000 кг/м³ в конструкції дорожнього одягу дозволяє значно зменшити експлуатаційні навантаження на ґрунт. Слід врахувати, що виготовлення неавтоклавного пінобетону може відбуватися безпосередньо на будівельному майданчику з транспортуванням на місце укладання бетононасосом і суттєво знижує затрати на транспортування в процесі виконання робіт.

Питанням дослідження властивостей неавтоклавних конструкційно-теплоізоляційних матеріалів в ХХ-ХХІ ст. присвячено праці цілого переліку українських дослідників з різних вітчизняних наукових шкіл: Рівненська школа під керівництвом проф. Л.Й. Дворкіна [27-29], Львівської школи під керівництвом професорів М.А. Саницького, Б.Г. Демчини, Я.Б. Якимечка [31, 98, 121, 126, 134, 148] і спеціалістів лабораторії ніздрюватих бетонів Придніпровської академії будівництва та архітектури, очолюваної проф. В.А. Мартиненком [8, 63, 64].

Якщо в працях Л.Й. Дворкіна та О.М. Бордюженко акцент зроблено на підбірах робочих складів різних видів неавтоклавних пінобетонів, особливостям та структурі їхньої роботи [27-29], то в працях М.А. Саницького, О.Р. Позняк, А.Я. Мельника в основному досліджувались характеристики пінобетонів безавтоклавного тверднення на основі модифікованих в'язучих композицій [88, 98, 148]. Проблематика роботи пінобетонів з дисперсним армуванням у вигляді поліпропіленової фібри під дією експлуатаційних навантажень представлена в працях Б.Г. Демчини та ін. [31, 126, 134].

Грунтовні дослідження процесу структуроутворення та реологічних властивостей пінобетонів були здійснені в працях В.А. Мартиненка, В.В. Ястребцова [8]. Саме результати проведених досліджень рядом українських науковців закладають надійне підґрунтя теоретичного обґрунтування можливості застосування фібропінобетонів як морозозахисних прошарків у дорожніх одягах автомобільних доріг нежорсткого типу.

Дослідження, які проводили в ДержДорНДІ ім. Шульгіна під керівництвом П.М. Коваля на дослідно-промислових ділянках автомагістралі I категорії Київ-Одеса в 2006-2007 рр. дають можливість констатувати про цілковиту дієвість концепції ліквідації впливу морозного здимання при застосуванні морозозахисних прошарків та створюють передумови для масового використання неавтоклавного пінобетону, дисперсно-армованого волокнами поліпропіленової фібри в якості теплоізоляційних шарів дорожніх одягів автомобільних доріг [87].

Ефективність використання неавтоклавного пінобетону обумовлена простотою експлуатації обладнання для виготовлення пінобетонних сумішей, мобільністю технологічного устаткування; можливістю варіювання властивостями пінобетону від теплоізоляційного (з маркою по середній густині D300) до конструкційного (з маркою по середній густині D1800), при мінімальному енергоспоживанні мобільних установок для виробництва пінобетону (встановлена потужність обладнання коливається від 5 до 10 кВт); та при відносно низькій матеріаломісткості теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу.

Вчені П.А. Ребіндер, А.А. Брюшков, Б.Н. Кауфман та ін. розробили технологію теплоізоляційного пінобетону природного тверднення і дослідили його фізико-технічні властивості. Річке зростання вартості енергоносіїв зумовило пропорційне збільшення енергетичної складової у собівартості дорожньо-будівельних матеріалів. У зв'язку з цим, автоклавна обробка стала суттєво енергозатратною, що підвищило практичний інтерес при впровадженні в будівництві неавтоклавних ніздоюватих бетонів як розумної альтернативи в

умовах зміни підходів до ефективного будівництва при раціональному співвідношенні вартості та довговічності (міжремонтний термін експлуатації) об'єктів будівництва.

Завдяки своїй пористій структурі пінобетон має достатньо низький коефіцієнт теплопровідності, а при застосуванні його в конструкції дорожнього одягу практично відсутні "містки холоду". Пінобетон, на відміну від пінопластів, що з плином часу втрачають свої властивості, з часом тільки покращує свої теплоізоляційні та міцнісні показники. Крім того, неавтоклавний пінобетон, також, відрізняється високою стійкістю при впливі низьких температур, що дозволяє ефективно використовувати його в дорожньому будівництві в різних кліматичних поясах та зонах.

Дорожньо-будівельні матеріали в конструкції дорожнього одягу розташовують по зменшенню міцності відповідно до епюри розподілу напружень по глибині від тимчасового експлуатаційного навантаження. Проте, критичні значення параметрів напружено-деформованого стану за критеріями механіки руйнування необхідно розраховувати і для пінобетону конкретного морозозахисного прошарку.

Важливими фізико-механічними показниками ніздрюватих бетонів, призначених для дорожнього будівництва є міцність, щільність, морозостійкість, теплопровідність, усадка та водопоглинання. В пінобетоні за допомогою поверхнево-активних речовин створюється система сферичних пор діаметром від 1 до 2 мм в неорганічній матриці цементно-пісчаних сумішей. Разом з тим, пористість матеріалу забезпечується не тільки сферичними порами, але і капілярними, що виникають при випаровуванні надлишкової води, що значно погіршують міцнісні показники. Значна капілярна пористість зумовлює суттєві усадочні деформації до 5–7 мм/м, виникнення деформацій та напружень розтягу в матеріалі, що можуть призводити до появи тріщин в конструктивних елементах споруд 88,(99). Відмінність параметрів вологостійкості зовнішнього та внутрішнього шарів пінобетонної конструкції в залежності від температурно-вологостійкого режиму експлуатації може досягати від 3 до 6 раз [139].

Традиційним недоліком неавтоклавного пінобетону є також низький опір розтягуючим зусиллям – співвідношення R_{bt}/R_n складає 0,01 – 0,1 [15, 99], і підвищена крихкість, в результаті чого відбувається погіршення експлуатаційних якостей конструкції в цілому. Експериментально встановлено [181], що перші тріщини у зразках–кільцях із ніздрюватого бетону виникають при значенні усадочних деформацій приблизно в 0,8 мм/м. Було встановлено, що вже при зміні вологості, так і при карбонізації, пінобетон природного тверднення є менш тріщиностійким, ніж автоклавний газобетон [98, 181].

1.3. Сучасні методи підвищення експлуатаційних характеристик неавтоклавного пінобетону для шарів дорожнього одягу автомобільних доріг

Процес виробництва неавтоклавного ніздрюватого бетону пройшов довгий шлях удосконалення в процесі експериментальних досліджень, завдяки чому вдалося досягти бажаних базових параметрів фізико-механічних характеристик матеріалу. Сучасний пінобетон може використовуватись, як для виготовлення бетонних конструкцій безпосередньо як на будівельному майданчику, так і для виробництва збірних елементів на полігонах та формувальних цехах, заводах залізобетонних виробів. Введення до складу пінобетону поліпропіленової фібри фіксованої довжини у встановленій розрахунком кількості покращує його фізико-механічні характеристики, що дозволяє суттєво розширити галузь застосування.

Властивості ніздрюватих бетонів мають чіткі взаємозв'язки між собою. Так, коефіцієнт теплопровідності в сухому стані залежить в основному від величини середньої густини, виду в'язучого, умов тверднення та інших факторів. Пористість матеріалу з ніздрюватою структурою складається з мікропористості та макропористості. Характер пористості ніздрюватого бетону визначається просторовим розміщенням пор (упаковкою), розподілом пор за

розмірами (співвідношенням пор різних розмірів), максимальним і середнім розміром пор, їх формою, товщиною між пористих перегородок [95]. На відміну від автоклавного, неавтоклавний пінобетон має закрито-пористу структуру, тому характеризується нижчим водопоглинанням.

Якість пінобетону значною мірою залежить не тільки від виду і витрат вихідних матеріалів, але і від способу їх змішування. Для прискорення тверднення пінобетону можна використовувати електропрогрів, швидкотверднучі цементи чи хімічні добавки-прискорювачі.

Встановлено, що з багатьох факторів, які впливають на властивості пінобетону, особливу роль, за думкою А.В. Хитрова, має хімічна природа піни [113]. Широка номенклатура синтетичних піноутворювачів дозволяє використовувати їх у технології пінобетонів на рівні з традиційними – клеєканіфольними, СДО і ін. Вони характеризуються відносно низькою вартістю, можливістю зберігання при температурі від $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і також іншими позитивними якостями. Класифікація за хімічним складом, величиною поверхневого натягу, концентрацією іонів водню дозволила підійти до наукового обґрунтування взаємозв'язку піноутворювальної властивості ПАР і їх стійкості в піномінеральних системах в залежності від речовинного складу компонентів, що змішуються.

У напрямку удосконалення технології неавтоклавних будівельних матеріалів було розроблено різновид пінобетону "неавтоклавний поробетон", який був одержаний за рахунок введення в склад суміші модифікуючих добавок, дозволяючи методом одностадійного перемішування одержати структуру матеріалу з рівномірно розподіленими повітряними порами. При цьому досягається зниження технологічної вологості, що не перевищує 10% і зниження в 1,5–2,0 рази усадочних деформацій [87].

Структура міжпорових перегородок має істотний вплив на морозостійкість. Міцність пінобетону проектного класу визначається міцністю міжпорових стінок. Співвідношення пустот (пор) і міжпорових перегородок визначає середню густину і міцність готового матеріалу. Чим більша кількість

пустот і тонші міжпорові стінки, тим менша густина і відповідно міцність матеріалу. Проте розмір, форма і рівномірність розподілу пустот, також значно впливає на міцність готового матеріалу. Процентне співвідношення пустот визначає такі важливі характеристики матеріалу, як коефіцієнт теплопровідності, водопоглинання, середня густина і зменшення їх кількості у жодному випадку не може бути рекомендоване. Найперспективнішим методом підвищення міцності матеріалу є контроль розмірів пустот і їх розподілу.

На теренах України проблемами структуроутворення ніздрюватих бетонів та теорії формування міжпорового простору піно- та газобетонів значну увагу було приділено фахівцем Одеської школи матеріалознавства, яку в свій час заснував професор д.т.н. В.А. Вознесенський, а пізніше продовжили та розвинули д.т.н. В.М. Вировой, І.В. Барабаш та В.І. Мартинов [4, 65-68]. У наукових дослідженнях спеціалістів Одеської академії будівництва та архітектури чітко прослідковується фундаментальний підхід до питань структуроутворення сучасних будівельних матеріалів, механізму побудови внутрішніх зв'язків на всіх етапах виготовлення ніздрюватих бетонів неавтоклавного тверднення.

Значне місце в теоретичному аналізі властивостей та особливостей неавтоклавних ніздрюватих бетонів займають праці представників Рівненської школи будівельного матеріалознавства Л.Й. Дворкіна, О.Л. Дворкіна та О.М. Бордюженко [27-29].

Суттєвий вклад у процес дослідження ніздрюватих індустріальних бетонів на території України внесли фахівці Придніпровської державної академії будівництва та архітектури (м. Дніпро). У лабораторії ніздрюватих бетонів при ПДАБА під керівництвом В.А. Мартиненка здійснено широкий спектр досліджень процесів автоклавного виробництва піно- та газобетонів [63, 64], а проф. М.В. Шпирько, проф. В.М. Дерев'янюк внесли вагомий вклад у вивчення особливостей формування структури ніздрюватих бетонів на різних етапах тверднення останніх [9, 33].

При виробництві неавтоклавного пінобетону на турбулентних установках, а також на установках роздільної підготовки компонентів, оснащених піногенератором, спостерігається три типи пор. Перший тип представлений сферичними пустотами правильної форми розмірами від 0,1 до 2 мм, так звані „корисні пустоти”, який в пінобетонній масі повинно бути більшість. Саме „корисні пустоти” визначають показники середньої густини, теплопровідності і міцності готового матеріалу.

До другого типу відносять хаотично розташовані капілярні пори різного діаметра і протяжності, так звані „шкідливі пустоти першого роду”, які істотно підвищують водопроникність цементного каменю, знижують його морозостійкість та міцність несучих міжпорових перегородок. Крім того, значна кількість капілярних пор за рахунок капілярного ефекту переміщує воду в сусідні блоки, які розташовані вище.

До третього типу належать дуже дрібні пори, так звані „шкідливі пустоти другого роду”, які характеризуються переважно неправильною формою і розташовані в міжпорових стінках основних „корисних” пустот. Вони не відіграють значної ролі в зниженні показників теплопровідності матеріалу і зменшенні густини, проте разом з капілярними порами, значно знижують міцність матеріалу.

Отже, міцність пінобетону насамперед визначається міцністю міжпорових перегородок. Існує декілька способів збільшення марочної міцності бетону. Збільшення частки цементу зумовлює одержання пінобетону підвищеної міцності. Разом з тим, при цьому зростає його вартість, що є економічно не вигідним.

Проблемам створення сучасних будівельних матеріалів на основі ніздрюватих бетонів неавтоклавного тверднення та питанням, пов'язаним з застосуванням нових видів зв'язного, були присвячені праці Київської наукової школи будівельного матеріалознавства, яку яскраво представляли в даній галузі наукових досліджень П.В. Кривенко, В.І. Гоц [25, 39, 58] та спеціалісти, що

займались проблематикою автоклавних комірчасних бетонів, І.Б. Удачкін, О.М. Філатов [111, 119].

Наукові дослідження науковців Національного університету «Львівська Політехніка» М.А. Саницього, Х.С. Соболя, Б.Г. Демчини, Я.Б. Якимечка, О.Р. Позняк, А.Я. Мельника щодо впливу різних видів в'язучого на властивості піно- та газобетонів автоклавного і неавтоклавного тверднення, проблем використання в конструктивних елементах різного призначення заклали основи для подальшого розвитку теорії будівельного матеріалознавства у напрямку застосування неавтоклавного пінобетону в різноманітних галузях будівництва.

Окремою групою в питаннях дослідження властивостей ніздрюватих бетонів стоять дослідження, що здійснювались представниками Харківської школи дослідників проф. д.х.м. М.О. Мчедлова-Петросяном (ХНУ ім. Карамзіна), проф. д.т.н. О.В. Ушерова-Маршаком та В.П. Сопова (ХНУБА), пов'язані з фізико-хімічними методами досліджень будівельних матеріалів та бетонів, а саме термографії та калориметрії у визначені властивостей спеціальних видів бетону [112].

Підвищення міцності досягається також за рахунок зниження водоцементного відношення (В/Ц). При В/Ц 0,5–0,6 різко знижується міцність готового пінобетону. Залежність фізико-механічних властивостей матеріалу від В/Ц пояснюється значним збільшенням об'єму капілярних пор („шкідливих пор першого виду”). Капілярні пори значно послаблюють міжпорові стінки пінобетону. Чим вище вміст води в пінобетонному розчині, тим більша кількість капілярних пор утворюється, і відповідно знижується міцність та морозостійкість отриманого пінобетону.

Наступним ефективним способом підвищення міцності готового пінобетону є використання піску зниженого модуля крупної. Для створення міцного міжпорового каркасу необхідно застосовувати пісок і його розсівання (або інший заповнювач), основний розмір яких не перевищує 0,35–0,8 мм. В іншому випадку, інертний заповнювач в матеріалі міжпорових стінок

перетворитися на включення, оточене порами, не відіграючи ніякої ролі в підвищенні міцності готового пінобетонного матеріалу.

Розробку технологічних способів удосконалення властивостей ніздрювато бетонних сумішей на основі поглибленого вивчення на міцнісні показники якісних та кількісних параметрів традиційних сировинних матеріалів за межами України були присвячені науково – дослідні роботи, що проводились під керівництвом А.П. Меркіна, А.П. Філіна [74, 75] і багатьох інших. Результати проведених в цьому напрямку досліджень показують, що при оптимізації наступних факторів, як хімічний і мінералогічний склад наповнювачів і в'язучих, їх дисперсність, температури бетонної суміші і навколишнього середовища, створюють можливості для підвищення міцності на стиск до 30%.

Пошуки ефективних параметрів теплової обробки з метою отримання високоміцних ніздрюватих бетонів за межами України знайшли відображення в роботах П.І. Баженова [3], А.П. Меркіна [74] та ін. Реалізація цих робіт привела до суттєвого розширення сировинної бази для виробництва пінобетонів при умові збереження чи підвищення міцнісних показників. Теоретичне обґрунтування зв'язку між макроструктурою пінобетонів, що характеризує їх пористість та їх міцністю пінобетону визначено А.П. Філіним. Дослідник на основі точних математичних моделей, що характеризували заповнення одиниці об'єму сферичними тілами (порожнинами) вивели закономірності, що описують ідеальну структуру ніздрювато бетону [75].

Дослідженнями в Україні та за її межами доведено, що ніздрюваті бетони густиною $400\text{--}800\text{ кг/м}^3$ неавтоклавного тверднення характеризуються дещо нижчою міцністю на стиск, ніж автоклавні. Модифікований неавтоклавний пінобетон, що складається на 5–7% із мікрокремнезему, характеризується класом міцності, що дорівнює за міцністю автоклавному ніздрювато пінобетону. Але його собівартість через високу вартість ультрадисперсних мікрокремнеземів не дає можливості широко використовувати такий пінобетон [133, 136].

Аналізу впливу хімічних добавок для удосконалення кристалізаційної структури ніздрюватого бетону і зменшенню тривалості циклу його обробки присвячені роботи А.П. Меркіна [74], Г. В. Несветаев [76], Г.І. Нудель [78].

Так Г.І. Нудель [78] запропонував підвищувати стійкість ніздрюватого бетону у вологих та слабо агресивних середовищах шляхом об'ємної гідрофобізації з допомогою бітумів і синтетичних смол. При цьому вплив добавок не розповсюджується на міцнісні властивості ніздрюватого бетону, але приводить до суттєвого зниження усадочних деформацій, показника теплопровідності і підвищенню морозостійкості, тобто покращенню експлуатаційних якостей матеріалу. Хімічні добавки дозволяють отримувати безавтоклавний швидкотверднучий золобетон пониженої щільності.

Проте всі вищенаведені напрямки не вирішують головної задачі якісного покращення властивостей ніздрюватих бетонів: збільшення показників тріщиностійкості і кардинального підвищення міцності на розтяг – основних якостей, що обумовлюють можливість використання цього матеріалу в елементах дорожніх споруд. Необхідність удосконалення деформативних якостей матеріалу відображена в роботах П.Г. Комохова [51] та ін.

За даними [35, 130], суттєве збільшення міцності на розтяг може бути отримано шляхом дисперсного армування ніздрюватих бетонів різноманітними видами фібр. Дисперсне армування пінобетону дозволяє [148, 152] покращувати в'язкість і зручність укладки сумішей; керувати швидкістю набору пластичної міцності; покращувати капілярно-пористу структуру затверділого бетону; знижувати їх щільність і теплопровідність.

Встановленню доцільності використання синтетичних волокон в якості дисперсної арматури для бетонів присвячений цілий ряд експериментально-теоретичних робіт, що проводились під керівництвом російських вчених І.А. Лобанова [61], Л.В. Моргун [6, 70-72] та ін.

В роботах, виконаних під керівництвом Х.С. Воробйова [17], встановлено, що при дисперсному армуванні ніздрюватих бетонів скловолокном, що стійке до дії лужного середовища міцність на стискання збільшується на 30–60%,

міцність на розтяг при згинанні збільшується у два рази, ударна в'язкість - в 1,5–2 рази. Дисперсне армування ніздрюватих бетонів азбестовими волокнами [148] в кількості 3–5 % по масі підвищує міцність на розтяг на 30–50%, міцність на стискання – на 20–40%, максимальний натяг – на 15–20%.

І.А. Лобановим, Ю.С. Пухаренко запропонований газобетон, дисперсно-армований синтетичним волокном в кількості 1–3% від маси твердих складників [61]. За їх даними, введення невеликої кількості синтетичних волокон до складу пористої бетонної суміші дає при незначному підвищенні міцності на стиск збільшення міцності на розтяг при згині до 3 разів.

У дослідженнях, пов'язаних з питаннями зміцнення матеріалів на основі мінеральних в'язучих, можна виділити два основних напрямки. Перший – для вирішення цього завдання пропонується використання спеціальних добавок, що організовують процеси тверднення цементного каменю і покращують його фізико–механічні показники. За даними [14], використання волокнистих кристалів гіросилікату кальцію забезпечує в бетонах підвищення міцності на згин в 2–4 рази. Направлена кристалізація новоутворень призводить до дисперсного самоармування цементного каменю за рахунок утворення в його об'ємі орієнтованих новоутворень кристалогідратів, що дозволяє суттєво підвищити якість бетону.

Другий напрям рекомендує для покращення експлуатаційних властивостей бетону використовувати армовані волокна, що відрізняються за своїм складом від матеріалу матриці і можуть в процесі роботи композиційного матеріалу сприймати більш високі напруження в тілі пінобетону порівняно з матрицею [33, 35, 60].

Методами використання дисперсного армування в ніздрюватих бетонах передбачена можливість отримання направленої і хаотичної орієнтації волокон в об'ємі пінобетону. Дисперсне армування може створюватись одним з видів фібр – хризотил азбестовою, деревною, целюлозною, скляною, сталевую, поліетиленовою, поліпропіленовою, поліамідною чи сумішшю різних фібр (різної довжини або різної суттєвої природи).

Дослідженнями встановлено [71, 93], що ефективність дисперсного армування бетонів залежить, в першу чергу, від співвідношення міцнісних і деформативних характеристик армувальних волокон (фібри) і бетонної матриці. Якщо модуль пружності фібри суттєво (в 3...10 раз) перевищує модуль пружності бетону, то слід чекати підвищення механічної міцності, тріщиностійкості та покращення інших експлуатаційних якостей дисперсно-армованого бетону. Якщо модуль пружності фібри близький до показника модуля пружності бетону, або трохи менший, то буде мати місце підвищення границі міцності матеріалу при одночасному пониженні конструкційних якостей.

Наступним фактором, що впливає на ефективність використання фібри в бетонних матеріалах, є граничний розтяг. У роботах [6, 93] рекомендується для дисперсного армування бетонів використовувати фібру, максимальна деформативність якої більше максимальної деформативності бетону. При цьому при достатній кількості об'ємного армування дисперсною арматурою, тріщиноутворення бетону під дією максимальних навантажень покаже, що наближається момент руйнування. Конструкції із таких матеріалів стають експлуатаційно безпечними, оскільки навіть при повній втраті несучої здатності матриці розподіл на частини в результаті руйнування виникає не миттєво, як це буває у крихких матеріалах, поволі, тобто в'язко [15, 70].

Швидкість розповсюдження і розмір тріщин в бетоні, на думку П.Г. Комохова [51], визначається його структурними характеристиками, які формуються властивостями і структурою вихідних матеріалів, а також технологічними методами, що забезпечують їх взаємодію та суцільність. В бетоні разом з міцною крихкою основою, мають бути пружно-в'язкі включення, які здатні гасити енергію росту тріщини, що призводить до руйнування матеріалу. Синтетична дисперсна арматура є пружно-в'язким компонентом з запасом пластичності та відтягує момент руйнування матеріалу [142], а також позитивно впливає на особливості структуроутворення в процесі виготовлення

дисперсно армованих піноsumішей за одностадійною технологією та їх структуроутворенням в період тверднення [73, 114].

Оцінка впливу дисперсного армування синтетичними волокнами на деформативні властивості бетонів в працях [124, 152, 154] довела, що введення в бетон хаотично розміщених в ньому поліамідних волокон формує структуру, робота якої при згині стає формально аналогічній схемі роботи залізобетону. При навантаженні бетонних взірців, дисперсно-армованих поліамідними волокнами, на відміну від традиційних пінобетонів, які руйнуються крихко, відмічені три основні характерні стадії зміни напружено-деформуючого стану.

Перша стадія – пружна робота матеріалу до утворення тріщин в розтягнутій зоні бетону, коли натяг менший часового спротиву бетонної матриці розтягу і розтягуючи зусилля сприймаються дисперсною арматурою і матрицею спільно. До другої стадії віднесена робота поступового накопичення тріщин в розтягнутій зоні фібропінобетону. Об'єднання первинних тріщин в магістральну починається при навантаженні в 1,6–2,0 рази більшому, ніж навантаження для першої тріщини. Третій стадії відповідає інтенсивне розкриття магістральної тріщини, пов'язане досягненням напруг в дисперсній арматурі границі її текучості, і завершується втратою несучої здатності зразка, але не призводить до роздроблення стисненої зони зразківі розділенню їх на окремі частини. Величина руйнуючого навантаження у 2,5–3,0 рази перевищує навантаження, що відповідає виникненню першої тріщини.

При дисперсному армуванні бетонів волокнами їх максимальний розтяг підвищується на 9–15% [154], а приріст міцності при згині, в залежності від технологічних і рецептурних особливостей, може досягнути 550%.

В працях Г.П. Сахарова вказано [99], що введення пористих наповнювачів приводить до зниження розміру усадочних деформацій ніздрюватих бетонів. І.А. Лобановим [61], Л.В. Моргун [70-72], Ю.В.Пухаренко [93] доведено, що дисперсне армування пінобетону дозволяє не тільки знижувати розмір усадочних деформацій, але й значно покращувати

експлуатаційні якості пінобетону неавтоклавного тверднення, завдяки суттєвому підвищенню міцності при розтягуванні.

При цьому дослідники відзначають, що виявлено ефекти підвищення показників тріщиностійкості при застосуванні дисперсного армування (фібри). Це відбувається за рахунок розподілення волокон по всій матриці бетону, забезпечуючи при цьому тривимірне зміцнення бетону порівняно з традиційною сталевією арматурою, котра забезпечує лише двомірне зміцнення. За даними, тріщиностійкість бетону при введенні 1-3% волокон фібри підвищилась в 1,2-3 рази, в'язкість – більше ніж у 30 разів [130].

Армування волокнами дозволяє використовувати нові принципи проектування та виготовлення у результаті суміщення армувальних елементів і матриці утворюється комплекс властивостей композиту, який не тільки включає початкові характеристики його компонентів, але й має якості, якими окремі компоненти не наділені. Поява нових властивостей у композитах пов'язана з гетерогенною структурою, що обумовлює наявність великої поверхні розділу між волокнами та матрицею.

Дисперсне армування бетону дозволяє змінити характер його руйнування від крихкого до пластичного [72, 86] унаслідок перерозподілу напружень між матрицею і дисперсною арматурою.

Макроструктура фібропінобетону може розглядатись як система, що складається із двох складових – бетонної матриці і армувальних волокон. Безперервним структуроутворюючим компонентом є крихка матриця. Введення армувальних волокон надає їй пластичних якостей.

Введення дисперсної арматури сприяє формуванню в бетоні оптимальної пористості, підвищує міцність і стійкість ніздрюватої бетонної структури в початковий період тверднення. Значна частина розтягувальних напружень, що виникають в процесі твердіння також сприймається синтетичною арматурою. Крім того, дисперсна арматура блокує початкові тріщини в матеріалі, що деформується [152], знижуючи ймовірність їх переростання в руйнуючий ефект і зміщує реалізацію цієї можливості в область більш високих деформацій.

Оскільки і міцнісні і деформаційні якості ніздрюватих бетонів (при інших рівних умовах) визначаються величиною їх середньої густини, то виникає необхідність визначення раціональних сфер армування конструкційних пінобетонів. Виявленню оптимального ступеня насиченості дисперсною арматурою ніздрюватих пінобетонів присвячений цілий ряд експериментальних досліджень [31, 32]. Проте, в основному ці роботи присвячені теплоізоляційним ніздрюватим бетонам.

Ефективність використання різних видів волокон в першу чергу залежить від співвідношення модулів пружності армувальних волокон і матриці (E_a/E_m): при $E_a/E > 1$ спостерігається покращення міцнісних характеристик на розтяг і підвищення тріщиностійкості матеріалу порівняно з міцнісними характеристиками вихідного бетону; при $E_a/E_m < 1$ підвищується ударна міцність і стійкість до стирання матеріалу.

І.А.Лобановим була запропонована структурно-технологічна модель дисперсно-армованого бетону [61]. Складовим елементом цієї моделі є макроструктурна пора, розміри якої співвідносні з розмірами армуючих волокон і наповнювача. У запропонованій моделі макроструктурна пора розглядається як сукупність компонентів (цементних зерен, дрібного наповнювача, дисперсної арматури), пов'язаних між собою контактами трьох видів:

- контакти між цементними зернами;
- контакти між цементним каменем і каменем наповнювачем;
- контакти між цементним каменем і дисперсною арматурою.

Дисперсна арматура, цементний камінь, наповнювач і контакти між ними займають практично весь об'єм, залишаючи різноманітні пори, які можуть містити плівкову, капілярну, і вільну воду, а також повітря. Властивостями макроструктурного елементу і визначаються властивості досліджуваного матеріалу. Основну відповідальність за властивості матеріалу – міцність, морозостійкість, тріщиностійкість і т.д. – несуть контакти, стан котрих залежить від технологічного регламенту виготовлення матеріалу.

В якості теоретичної основи для опису властивостей структурно-технологічної моделі дисперсно-армованих бетонів використовується правило сумішей, котре найбільш достовірно відображає вклад окремих компонентів і контактів між ними в процес формування якостей матеріалу, який досліджується.

Для оцінки механічних якостей композиційних матеріалів (для конструкційних фібробетонів вони є найбільш значимими) Л.В. Моргун [70-72], була використана модель, яка мала наступні критерії: армуючий компонент в композиційному матеріалі, що складався з безперервних волокон, рівномірно і в одному напрямку в об'ємі застосованої матриці бетону. Крім цього, припускається, що у волокон достатнє зчеплення з матрицею і вони мають однакову міцність. Використовуючи «правило суміші», можна вважати, що навантаження на композиційний матеріал перерозподіляється між армуючим компонентом і бетонною матрицею.

З метою ефективного використання армуючого компоненту необхідно, щоби його модуль пружності останнього був вищий від модуля пружності загальної пінобетонної матриці. Це положення справедливе для всього діапазону щільностей дисперсно армованих композиційних матеріалів.

На думку І.А. Лобанова [61], використання синтетичних волокон найбільш доцільно в ніздрюватих бетонах густиною менше 900 кг/м^3 . У цьому випадку спостерігаються якісні зміни порової структури матриці і суттєве підвищення морозостійкості. В роботах Л.В. Моргун [6, 71] знаходить підтвердження висновку про те, що підвищення ефективності дисперсного армування має екстремальний характер і максимальне значення припадає на величину середньої густини 800 кг/м^3 .

Ефективність дисперсного армування поліамідними волокнами при стиску бетонів середньої густини від 500 до 800 кг/м^3 має тенденцію до збільшення, так як бетонна матриця має незначні показники міцності. По мірі приросту міцнісних характеристик бетонної матриці і збільшення міцносних

характеристик бетонної матриці і збільшення міцності щеплення між компонентами збільшується і ефективність дисперсного армування.

При переході до пінобетонів середньої щільності більше 800 кг/м^3 , ефективність дисперсного армування дещо знижується, так як міцнісні характеристики армуючих волокон використовуються повністю (параметри поліамідних волокон мають чітко фіксовані значення – $E_v \text{ max} = 8 \dots 12 \cdot 10^3 \text{ МПа}$), а міцність матриці продовжує зростати. Відповідно співвідношення E_v/E_b починає зменшуватись.

Не зважаючи на той факт, що використання волокон в конструкційних пінобетонах середньої щільності від 900 до 1200 кг/м^3 не дає значного підвищення міцнісних характеристик матеріалу, ефективність дисперсного армування при розтягу, як було встановлено в роботі Л.В. Моргун [72], досягає 2,5-3,5 раз.

При врахуванні численних переваг неавтоклавного пінобетону, а також перспективи його використання для елементів будівельних конструкцій, розрахованих на дію згинаючих навантажень, широкомасштабного будівництва з використанням цього матеріалу в даний час, на жаль, не спостерігається. Обмежене використання неавтоклавного пінобетону обумовлено відсутністю повного комплексу нормативно-технічної документації та відсутністю досліджень, які би забезпечили процес проектування та будівництва будівель та споруд, зокрема автомобільних доріг, що відповідають сучасним вимогам.

1.4. Теоретичні передумови досліджень і наукова гіпотеза

Враховуючи концепцію науково-технічної політики в дорожньому господарстві України на період до 2020 р., затверджену Державною службою автомобільних доріг України та Державну програму розвитку виробництва виробів з ніздрюватого бетону, метою даної роботи є застосування безавтоклавного конструкційно-теплоізоляційного пінобетону для влаштування

теплоізоляційного прошарку автомобільних доріг нежорсткого типу для зниження ефекту зимового здимання та з метою покращення якості автомобільних доріг України. Узагальнюючи вище наведене, слід зазначити, що аналіз фундаментальних і прикладних розробок в області будівельного матеріалознавства дозволяє теоретично обґрунтувати той факт, що з точки зору міцності, дисперсне армування пінобетонів конструкційного призначення синтетичними волокнами повинно бути достатньо ефективним. Проведений аналіз літературних першоджерел дозволяє передбачити можливість використання дисперсно-армованих неавтоклавних пінобетонів в конструктивних елементах, розрахованих на сприйняття значних згинальних навантажень.

Сучасні методи розрахунку нежорстких дорожніх одягів базуються на результатах наукових досліджень напружено-деформованого та граничного стану конструктивних шарів, властивостей матеріалів дорожнього одягу і ґрунту земляного полотна відомих вітчизняних вчених: В.Ф. Бабкова, О.Т.Батракова, О.К. Біруля, А.М.Богуславського, А.Г. Булавка, М.І. Волкова, Л.Б. Гезенцева, Г.І. Глушкова, М.М. Дмитрієва, К.Є. Єгорова, В.К. Жданюка, В.О. Золотарьова, М.М. Іванова, Б.І Когана, М.Б. Корсунського, А.М. Кривіського, О.В. Марчука, О.Ю. Мерзликіна, С.І. Міховича, В.В. Мозгового, В.Г. Піскунова, А.К. Приварнікова, Є.Д. Прусенка, Б.С. Радовського, Р.М. Раппопорт, О.О. Рассказова, А.В. Руденського, В.Я. Савенка, А.О. Саля, С.І. Сіденка, В.С. Сіпетова, А.С. Супруна, Г.К. Сюньї, К.С. Теренецького, В.С. Титаря, К.К. Туроверова, П.І. Теляєва та ін.

Висновки до розділу

1. Аналізом стану та перспектив розвитку транспортної інфраструктури України встановлено незадовільний транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг, низьку щільність автомобільних

доріг, низьку безпеку руху по них. Одним із методів підвищення якості та довговічності автодоріг нежорсткого типу, що становлять значну частку шляхів в Україні, подовження міжремонтних експлуатаційних термінів їх служби, а також спорудження сучасних автодоріг є усунення ефекту морозного здимання за рахунок проектування теплоізоляційного шару з використанням інноваційних матеріалів.

2. Доведено, що цілий комплекс теоретично-експериментальних досліджень, проведений в Україні та за її межами, дає можливість стверджувати про доцільність використання монолітних неавтоклавних пінобетонів в якості теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу сучасних автомобільних доріг нежорсткого типу.

3. Встановлено, що ефект дисперсного армування матриці неавтоклавного пінобетону формує умови для підвищення міцності та деформативних властивостей конструкційно-теплоізоляційного пінобетону густиною від 600 до 1000 кг/м³.

4. Вивчені методики та підходи до ліквідації ефекту морозного здимання в земляному полотні основи дорожнього одягу дають можливість вибудувати алгоритм та створити розрахунковий апарат для визначення величини теплоізоляційного прошарку в процесі проектування сучасних автомобільних доріг нежорсткого типу в різних кліматичних районах України.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Методологія проведення та блок-схема досліджень

Об'єктом досліджень дисертаційної роботи є пінобетон неавтоклавного тверднення для теплоізоляційних шарів дорожнього одягу автомобільних доріг. Забезпечення у цьому випадку основного функціонального призначення пінобетонів, що працюють у складних умовах експлуатації, визначається як їх підвищеною пористістю для досягнення необхідного опору теплопередачі протиморозного шару, так і міцнісними, деформативними властивостями та показниками, що характеризують довговічність конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг. На основі проведеного аналізу літературних джерел, а також відомих закономірностей підвищення будівельно-технічних властивостей пінобетонів зроблено висновок про необхідність дисперсного армування неавтоклавних пінобетонів для конструктивних елементів, розрахованих на сприйняття згинальних навантажень.

Для досягнення поставлених завдань та мети роботи розроблено блок-схему досліджень, на основі якої визначено послідовність виконання роботи, вибрано вихідні сировинні матеріали та методи досліджень (рисунок 2.1). У блок-схемі виділено етапи досліджень, які включають розроблення наукової гіпотези, вибір вихідних матеріалів з необхідним комплексом властивостей для формування регламентованої середньої густини та кінетики набору міцності пінобетону в нормальних умовах тверднення, а також проектних експлуатаційних показників, оцінку однорідності властивостей вихідних матеріалів, вивчення впливу технологічних факторів на показники якості ніздрюватих бетонів,

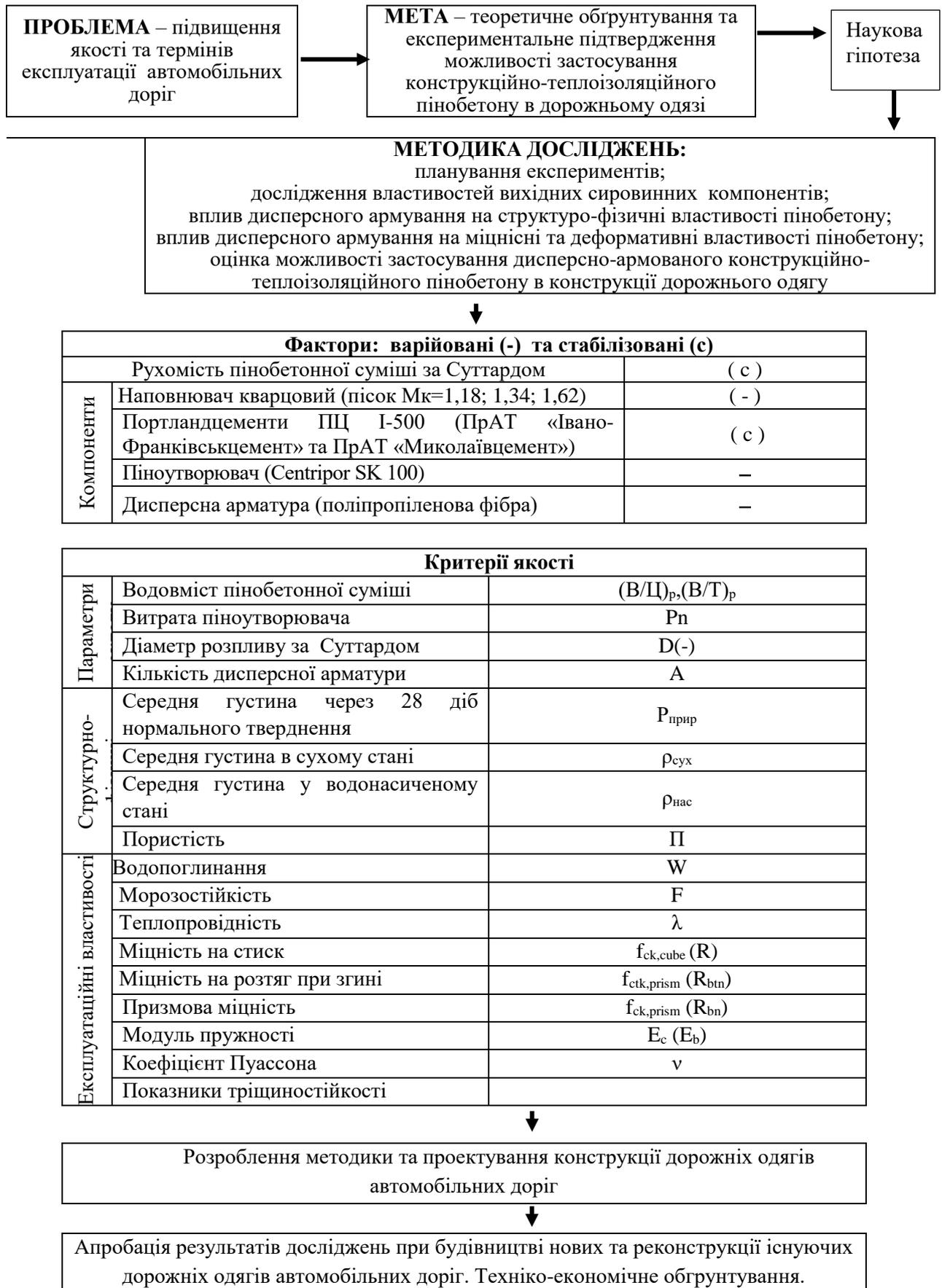


Рисунок 2.1 – Блок-схема досліджень

експериментальне визначення фізико-механічних і структурних характеристик фібропінобетону, побудова експериментально-статистичних моделей, що описують поля властивостей, для пошуку оптимальних складів конструктивно-теплоізоляційних дисперсно-армованих пінобетонів, а також їх випробування щодо теплопровідності, тріщиностійкості, усадки, морозостійкості.

Наступний етап полягав у розробленні технологічної схеми виробництва монолітного дисперсно-армованого пінобетону, базуючись на результатах експериментальних досліджень, проектуванні конструкцій дорожнього одягу з використанням розробленого конструктивно-теплоізоляційного ніздрюватого фібробетону як протиморозного шару, а також розробленні методики розрахунку товщини теплоізоляційного шару у таких конструкціях для різних кліматичних районів України.

Заключний етап включав апробацію результатів досліджень, яку проводили шляхом виготовлення дослідних партій дисперсно-армованих пінобетонів, будівництва дослідно-промислових ділянок магістральних автомобільних доріг, проведення благоустрою об'єктів будівництва, реконструкції існуючих автомобільних та залізничних доріг України. Проведено розрахунок техніко-економічної ефективності використання пінобетону, армованого поліпропіленовою фіброю, неавтоклавного тверднення як теплоізоляційного шару дорожніх одягів.

2.2. Характеристика вихідних матеріалів

Як в'язуче для приготування пінобетонних сумішей для теплоізоляційного шару дорожнього одягу використовували бездобавочні портландцементи загальнобудівельного призначення I типу ПЦ I-500-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент» та ПЦ I-500-Н ПрАТ «Миколаївцемент». Хімічний склад портландцементних клінкерів наведений в таблиці 2.1. Вміст

триккальцієвого алюмінату C_3A у досліджуваних клінкерах (5,62 та 7,69 % для клінкеру ПрАТ «Івано-Франківськцемент» та ПрАТ «Миколаївцемент» відповідно), розрахований за методом В.А. Кінда згідно з ДСТУ Б В.2.7-46:2010, не перевищує допустимих значень для клінкерів цементів для дорожніх покриттів.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад портландцементних клінкерів

Підприємство	Вміст оксидів, мас.%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	21,44	5,22	4,84	66,18	0,95	0,72	0,65
ПрАТ «Миколаївцемент»	22,98	5,84	4,59	64,15	0,85	0,81	0,78

За основними фізико-механічними властивостями (таблиця 2.2) портландцементи ПЦ І-500-Н відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 та ДСТУ Б В.2.7-45:2010, що ставляться до сировинних компонентів для приготування ніздрюватих бетонів.

Таблиця 2.2 – Основні показники портландцементів ПЦ І-500-Н

Найменування показника	ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	ПрАТ «Миколаївцемент»
Тонина помолу		
- залишок на ситі №008, мас. %	0,4	0,8
- питома поверхня, м ² /кг	360	340
Нормальна густина цементного тіста, %	31	28
Терміни тужавіння, хв:		
- початок	130	140
- кінець	210	280
Міцність на стиск, МПа, у віці, діб	2	33,8
	28	52,7
Істинна густина, г/см ³	3,1	3,1
Насипна густина, кг/м ³	934	956

Як кремнеземистий матеріал у ніздрюватих бетонах для теплоізоляційного шару дорожнього одягу використано кварцові природні піски. Пісок у пінобетонах поряд з цементним тістом утворює мезоструктуру матеріалу. Чим менша витрата піску, тим більшою буде в'язкість розчинової частини пінобетонної суміші. Однак збільшення кількості піску призводить до зниження міцності пінобетону та погіршення пористої структури композиту. До заповнювачів ставляться вимоги, що враховують особливості їх впливу на властивості пористого бетону. Найістотніший вплив на властивості бетону здійснюють зерновий склад, міцність і чистота заповнювача. Крім того, заповнювач сприймає напруження усадки і може в кілька разів зменшити усадку бетону порівняно з усадкою цементного каменю.

Як дрібний заповнювач застосовували піски кварцові Ясинецького родовища Львівської області (ПрАТ „Кар’єроуправління”) з модулем крупності $M_{кр}=1,18$ марки ПК-150-П ДСТУ Б В.2.7-131:2007; Жовківського родовища Львівської області з модулем крупності $M_{кр}=1,62$ марки ПК-250-П ДСТУ Б В.2.7-131:2007 та Славутського кар’єру Хмельницької області з модулем крупності $M_{кр}=1,34$ марки ПК-150-П ДСТУ Б В.2.7-131:2007. За комплексом показників якості використані піски кварцові задовольняють вимоги для заповнювача ніздрюватих бетонів (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Характеристика кварцових пісків

Показник	Значення для піску		
	Ясинецького	Жовківського	Славутського
Насипна густина, кг/м ³	1420	1450	1435
Модуль крупності, M_k	1,18	1,62	1,34
Прохід через сито 0,16 мм, %	8,6	4,4	7,1
Істинна густина, г/см ³	2,62	2,64	2,62
Пустотність, %	45,8	45,1	45,2
Вміст пилюватих і глинистих частинок, %	2,2	0,8	1,8
Вміст глини в грудках, %	0,02	-	-

Результати випробувань за ситовим аналізом кремнеземистих матеріалів показали (рисунок 2.2), що за зерновим складом пісок Жовківського родовища відноситься до групи дрібних, а піски Ясинецького та Славутського родовища - до групи дуже дрібних.

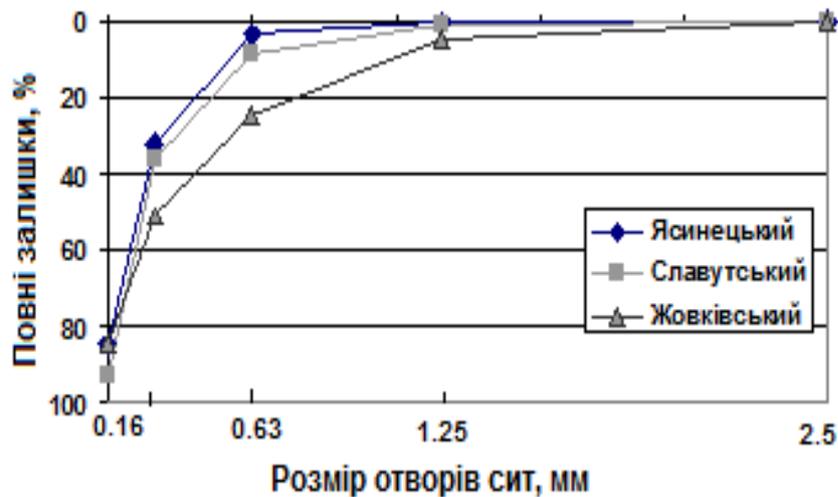


Рисунок 2.2 – Криві просіювання пісків

Для приготування пінобетонів використовували питну воду, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Вміст у ній органічних поверхнево-активних речовин, цукрів або фенолів становить 9 мг/л. Вміст розчинних солей (5000 мг/л), іонів SO_4^{2-} та сульфатів в перерахунку на іони SO_4^{2-} (2700 мг/л), Cl^- (1200 мг/л), а також завислих частинок (200 мг/л) не перевищує значень, наведених в ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Водневий показник води (рН) в межах від 4 до 12,5.

В роботі проведено дослідження фізичних властивостей технічної піни, зокрема її кратності та стійкості з використанням піноутворювачів Centripor SK-120 (МС-Vauchemie, Німеччина), Schaumbildner 285 (BASF, Німеччина), «Софір» (S-45, «Союз, ЛТД», Україна), К-1 (пожежна піна). На основі результатів випробувань цих показників для забезпечення пористої структури пінобетону використовували піноутворювальну добавку Centripor SK-120. Застосований піноутворювач сприяє отриманню стійкої піни з виходом пор (відношенням об'єму піни до маси піноутворювача) не менше 15. Технічні характеристики добавки наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики піноутворювача Centripor SK-120

Назва показника	Значення
Основа	Сульфогідрополі(окси-1,2-атан)- C ₁₀ -C ₁₆ -алкиетер
Фізичний стан добавки	Рідкий
Колір	Світло-коричневий
Густина, кг/дм ³	1,015 – 1,30
pH при 20°C	10-11
В'язкість при 20°C (згідно DIN 53211/4), с	13
Транспортування і зберігання	при температурах не нижче +5 °C і не вище + 90 °C, в герметично закритій тарі

Для підвищення міцнісних показників ніздрюватих бетонів для теплоізоляційного шару дорожнього покриття проводили дисперсне армування поліпропіленовими волокнами (рисунок 2.3). Технічні параметри волокон дозволяють забезпечити їх максимально рівномірний розподіл по всій матриці бетону. За рахунок високих дисперсійних властивостей поліпропіленових волокон у бетонній суміші вони в процесі перемішування забезпечують рівномірну систему мікроармування.



Рисунок 2.3 – Поліпропіленові волокна (фібра)

Для легких бетонів використовують фібру з довжиною волокна 18 мм (ВСМ-П–20/18), (12 мм (ВСМ-П–20/12) та 6 мм (ВСМ-П–20/6). Діаметр поліпропіленових волокон становить 18-20 мкм; насипна густина – 0,91 т/м³; модуль Юнга – 3500Н/мм²; міцність на розрив – 350 Н/мм²; температура розм'якшення 160 °С (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики поліпропіленової фібри

Показник	Значення
Матеріал	Поліпропілен
Довжина фіброволокна	6 мм, 12 мм, 18 мм
Діаметр	18-20 мкм
Міцність на розтяг (розрив)	270-400 МПа
Подовження до розриву	150-250%
Густина при 20 °С	0,91 г/см ³
Температура загорання	320 °С
Температура плавлення	160 °С

Фібра вводиться в пінобетонну суміш з розрахунку 0,6-1,2 кг/м³. Використана поліпропіленова фібра стійка до дії кислот, лугів та розчинників, що важливо при використанні її в лужному середовищі цементного каменю.

2.3. Фізико-механічні випробування

Фізико-механічні випробування портландцементів загальнобудівельного призначення проводили згідно з ДСТУ Б.В. 2.7-185:2009, ДСТУ Б В.2.7-186:2009, ДСТУ Б.В. 2.7-187:2009 та ДСТУ Б.В. 2.7-188:2009 і охоплювали визначення нормальної густоти та термінів тужавіння цементного тіста, водовідділення, границі міцності при стиску, тонини помелу. Придатність піску визначали у лабораторних умовах згідно з ДСТУ Б В.2.7-232:2010.

Розрахунки складу пінобетону виконували за формулами:

$$\rho_0 = T \quad (2.1)$$

де ρ_0 – середня густина пінобетону в сухому стані, кг/м³;

T – сумарний вміст твердих складових у пінобетоні, кг;

$$T = Ц + Н \quad (2.2)$$

де $Ц$ – витрата цементу, кг; $Н$ – витрата наповнювача, кг;

$$Ц = n \cdot T \cdot K \quad (2.3)$$

$$Н = T - Ц \quad (2.4)$$

$$В = T \cdot V/T \quad (2.5)$$

де $В$ – витрата води, л;

K – коефіцієнт, що враховує кількість хімічно зв'язаної води,

$K = 0,85-0,9$; n – частка цементу в сухих компонентах.

Приготування пінобетонних сумішей із застосуванням поліпропіленової фібри можна здійснювали у змішувачі: гравітаційного або примусового типу дії. Фіброволокно слід додавати або в процесі перемішування сухих компонентів суміші, або у вже готовий бетонний розчин з розрахунку $0,6-1,2$ кг/м³. Час перемішування бетонної суміші необхідно збільшувати на 3-5 хв. У результаті вмісту мікроармуючого волокна, суміш характеризується одноріднішою структурою, проте незначно зменшується рухомість суміші.

Приготування пінобетону було організовано за схемою, яка полягала в змішуванні стійкої піни з цементно-піщаним розчином. Частину води дозували за об'ємом, цемент і пісок – за масою для приготування цементно-піщаного розчину. Концентрат піноутворювача і частину води змішували для отримання робочого розчину піноутворювача, з якого за допомогою компресора та піногенератора одержували піну, яку подавали у бетонозмішувач до готового вже цементно-піщаного розчину. Одночасно у бетонозмішувач подавали поліпропіленову фібру. Після додавання піни до бетонозмішувача суміш ретельно перемішували ще впродовж 1–2 хв. Після цього фібропінобетонну суміш транспортували до місця укладання в форми.

Рухливість пвінобетонної суміші визначали за діаметром розтікання за віскозиметром Суттарда. Визначення середньої густини, вологості, водопоглинання дисперсно-армованого пінобетону проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Визначення середньої густини пінобетону проводили на

зразках, що зберігали в повітряно-сухому стані (температура 25 ± 10 °C і відносна вологість повітря 60 ± 10 %).

Визначення границі міцності пінобетону при стиску (згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009) проводили на зразках $10 \times 10 \times 10$ та $15 \times 15 \times 15$ см. Навантаження зразків здійснювали безперервно зі швидкістю $(0,6 \pm 0,4)$ МПа/с. Границю міцності бетону R_i в МПа при стиску обчислюють для кожного зразка за формулою (2.6):

$$R_i = \alpha \frac{F}{A} K_w \quad (2.6)$$

де F – руйнівне навантаження за шкалою преса чи манометра, H (кгс);

A – середня робоча площа перерізу зразка, $мм^2$ ($см^2$);

α – масштабний коефіцієнт, що залежить від розмірів зразка;

K_w - поправочний коефіцієнт для ніздрюватого бетону, що враховує вологість зразків у момент випробування.

Середнє значення міцності в окремій серії R_i визначали як середнє арифметичне результатів випробувань трьох зразків.

Визначення границі міцності пінобетону на розтяг при згині проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Зразки-призми $150 \times 150 \times 600$ мм встановлювали за схемою, що наведена на рисунку 2.4, і навантажували у двох третинах прольоту двома зосередженими силами до руйнування.

За руйнівне навантаження приймають максимальне зусилля F , досягнене в процесі випробування. Границю міцності бетону R_{ff} в МПа на розтяг при згині обчислювали для кожного зразка за формулою (2.7):

$$R_{ff} = \delta \frac{FL}{ab^2} K_w \quad (2.7)$$

де, F –руйнуюче навантаження, Н;

A – площа робочого перетину зразка, $мм^2$;

a , b , L – відповідно ширина, висота поперечного перетину призми і відстань між опорами при випробуванні зразків на розтягування при згині, мм;

δ – масштабний коефіцієнт для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базового розміру і форми;

K_W – поправочний коефіцієнт для ніздрювтого бетону, що враховує вологість зразків у момент випробування.

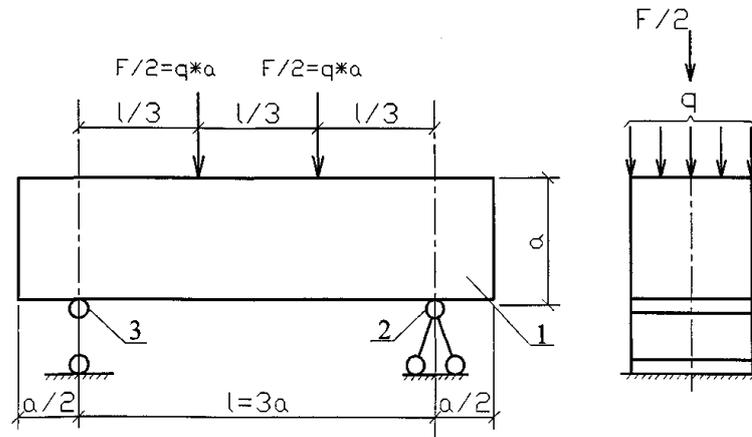


Рисунок 2.4 – Схема навантаження зразка: 1 – зразок-призма; 2 – нерухома опора; 3 – рухома опора

Модуль пружності, призмову міцність та коефіцієнт Пуассона дисперсноармованого пінобетону визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Модуль пружності обчислювали для кожного зразка при рівні навантаження, що становить 30% від руйнівного навантаження, за формулою (2.8):

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1el}} \quad (2.8)$$

де, $\sigma_1 = N_1/A$ - збільшення напруження від умовного нуля до рівня зовнішнього навантаження, яке дорівнює $(30 \pm 5)\%$ від руйнівного.

N_1 – збільшення руйнівного навантаження $(30 \pm 5)\%$ руйнівного;

ε_{1el} – збільшення пружньо-миттєвої поздовжньої деформації зразка, що відповідає рівню напруження N_1 .

Значення ε_{1el} та ε_{2el} визначають за формулами (2.9), (2.10):

$$\varepsilon_{1el} = \varepsilon_1 - \sum \varepsilon_{1c1} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{2el} = \varepsilon_2 - \sum \varepsilon_{2c1} \quad (2.10)$$

де, ε_1 та ε_2 – збільшення повних відносних поздовжніх і поперечних деформацій зразка, що відповідають рівню навантаження N_1 ;

$\sum \varepsilon_{1c1}$ та $\sum \varepsilon_{2c1}$ – збільшення відносних поздовжніх і поперечних деформацій швидкоплинної повзучості, отримані при витримках навантаження на ступенях навантаження до рівня навантаження N_1 .

Збільшення відносних поздовжніх і поперечних деформацій обчислюють як середнє арифметичне показів приладів по чотирьох гранях призми:

Відносні деформації визначають за формулами (2.11):

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (2.11)$$

де, Δl_1 та Δl_2 – абсолютні збільшення поздовжніх і поперечних деформацій зразка, викликані відповідним збільшенням напруження;

l_1 та l_2 – фіксовані бази вимірювання поздовжніх і поперечних деформацій зразка.

Значення модуля пружності E_b , МПа, обчислюють за формулою (2.12):

$$E_b = \frac{R_{bt}}{\varepsilon_{ubt}}, \quad (2.12)$$

де, R_{bt} – значення міцності на розтяг при вигині, МПа,

$$R_{bt} = \frac{M_u}{W} = \frac{F_u \cdot l}{6W} \quad (2.13)$$

де M_u – руйнівний згинальний момент, Н*м;

F_u – руйнівне навантаження, Н;

l – відстань між опорами, м;

W – момент опору поперечного перерізу зразка, м³

ε_{ubt} – гранично відносна деформація розтягу

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (2.14)$$

де b – ширина поперечного перерізу зразка, м;

h – висота поперечного перерізу зразка, м.

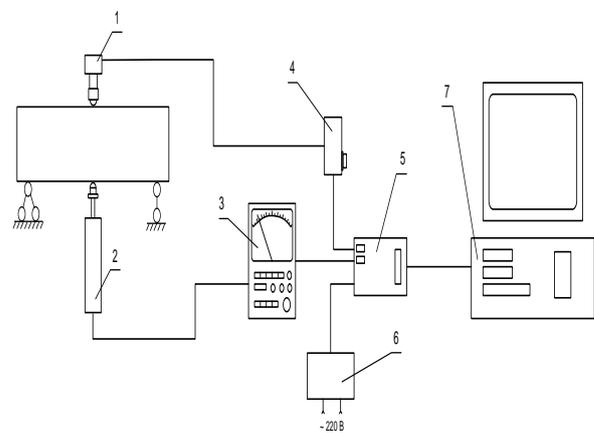
Модуль пружності пінобетону визначали як середнє арифметичне значення випробувань трьох зразків. За наявності у перерізі розриву зразка суттєвих дефектів результат його випробування при обчисленні середнього значення не враховували, при цьому проводили випробування додаткового зразка.

Оцінку тріщиностійкості розроблених складів дисперсноармованого пінобетону з метою отримання його силових та енергетичних характеристик здійснювали за методами і критеріями механіки руйнування згідно з ДСТУ Б В.2.7-227:2009. Характеристики тріщиностійкості бетонів визначались при рівноважних механічних випробуваннях призм з напередствореною тріщиною нормального відриву за схемою триточкового згину із записом повної діаграми навантаження-прогин ($F-V$) на спеціальній випробувальній установці [102, 123] у віці 2 місяці.

Загальний вигляд установки та схема вимірювальної частини установки представлено на рисунку 2.5, схема випробувань зразка-призми на згин із ініційованою тріщиною нормального відриву – на рисунку 2.6.



а



б

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд випробувальної установки для визначення характеристик тріщиностійкості (а) та схема вимірювальної частини установки (б): 1 – давач зусилля (тензومتر); 2 – давач переміщення індуктивного типу; 3 – підсилювач-перетворювач сигналу з давача переміщення; 4 – резисторний міст; 5 – інтерфейсна плата; 6 – блок живлення; 7 – комп'ютер

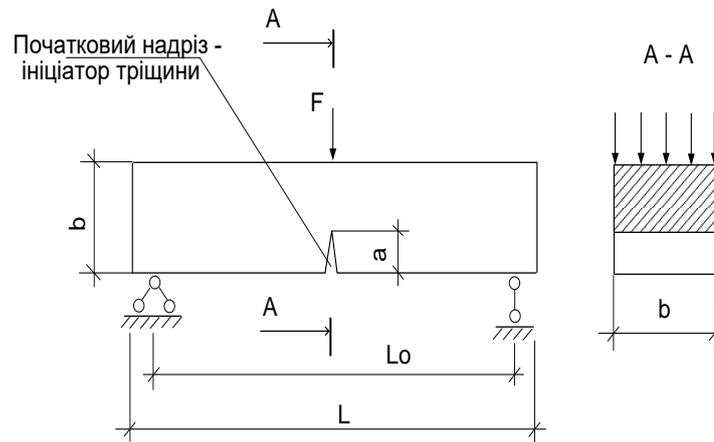


Рисунок 2.6 – Схема випробувань зразка-призми на згин з ініційованою тріщиною нормального відриву: a – довжина початкового надрізу, м; b , L , L_0 – розміри зразка, м; F – навантаження на зразок, кН

За результатами випробувань побудовано діаграми стану матеріалу та розраховано комплекс силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості пінобетонів.

Для пінобетонів характерні значні деформації усадки при твердненні в нормальних умовах, а також при висиханні, які викликають появу тріщин, що зменшує міцність, морозостійкість та довговічність виробів та конструкцій. Деформації усадки пінобетонів при висиханні від вологості 35% до 5% вимірювали за допомогою індикатора годинникового типу (ціна поділки 0,001 мм) згідно з [38].

Морозостійкість розроблених пінобетонів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-45:2010 на зразках-кубах 100x100x100 мм за кількістю циклів наперемінного заморожування та відтавання водонасичених зразків, при якій міцність бетону на стиск знижується не більше ніж на 15 %, а втрата маси зразків не перевищує 5 %.

Порівняльні випробування теплопровідності неармованого і дисперсно-армованого пінобетону проводили відповідно до ДСТУ Б В.2.7-41-95 „Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем”. Для визначення коефіцієнта теплопровідності застосовувався мікропроцесорний прилад БИ-

T021A (рисунок 2.7) з діапазоном вимірювання коефіцієнта теплопровідності 0,02–1,00 Вт/(м·К).



Рисунок 2.7 – Визначення теплопровідності дисперсноармованого пінобетону за допомогою приладу БИ-Т021А

Для оцінки впливу технологічних факторів та ефектів їх взаємодії на властивості пінобетонів проведено математичне планування експерименту. При цьому застосовували один з методів статистичної обробки результатів – метод ортогонального центрально-композиційного планування (ОЦКП) [7, 30, 62].

2.4. Фізико-хімічні дослідження

Для встановлення особливостей структуроутворення пінобетонів, дисперсно-армованих поліпропіленовою фіброю, проведені дослідження мікроструктури дослідних зразків та елементного складу продуктів гідратації каменю за допомогою скануючого електронного мікроскопа SEM FEI Quanta 250 FEG з системою енергодисперсійного мікроаналізу (EDS). Для збільшення контрасту рельєфу на поверхню свіжих сколів зразків методом вакуумного термічного випаровування наносили тонку електропровідну плівку струмопровідного металу (золота, міді) [24].

Фазовий склад продуктів гідратації портландцементів, наномодифікованих портландцементних композицій та модельних систем

визначали за допомогою методу рентгено-фазового аналізу методом порошків на дифрактометрі ДРОН-2.0 при CuK_α -випромінюванні. Дифрактометр ДРОН-2.0 – це установка, в якій для реєстрації інтенсивності рентгенівських променів використовують сцинтиляційний лічильник квантів. Показники лічильника фіксуються на діаграмній стрічці, яка рухається синхронно з обертанням лічильника. На стрічці фіксується крива залежності інтенсивності дифракційної картини від кута відбиття [24].

Висновки до розділу

1. Для вирішення поставлених у роботі завдань розроблено блок-схему досліджень, що включає послідовні етапи: розроблення наукової гіпотези, вибір вихідних матеріалів з необхідним комплексом властивостей, розроблення ніздрюватих фібробетонів та дослідження їх експлуатаційних показників, розроблення методики розрахунку теплоізоляційного шару дорожнього одягу, впровадження результатів дослідження у виробництво.

2. Як вихідні матеріали для проведення експериментальних досліджень використовували портландцементи загальнобудівельного призначення ПЦ I-500 ПрАТ «Івано-Франківськцемент» та ПрАТ «Миколаївцемент», дрібні кварцові піски, добавки-піноутворювачі та поліпропіленова фібра для дисперсного армування. За результатами випробувань усі матеріали задовольняють вимоги нормативних документів для приготування ніздрюватих бетонів.

3. Фізико-механічні, будівельно-технічні та експлуатаційні характеристики розроблених пінобетонів визначали згідно діючих стандартів та загальноприйнятих методик. Оптимізацію складів розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення за критеріями міцності проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативнокрокового методу оптимізації.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ПІНОБЕТОНІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ БУДІВЕЛЬНО-ТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

У сучасному будівництві значно розширюються обсяги виробництва та використання ніздрюватого бетону, зокрема пінобетону, що пов'язано як і з енергозбереженням в будівництві, так і з технологічними можливостями цього матеріалу, простотою і доступністю технології виготовлення виробів на його основі. При організації виробництва пінобетону важливим технологічним та економічним рішенням є не тільки вибір способу поризації, але і піноутворювача.

Однією із основних властивостей пінобетонної суміші є терміни тужавіння. Саме вони визначатимуть час витримування пінобетонного масиву в формах чи опалубці, що впливатиме на економічний ефект при виробництві виробів та бетонуванні конструкцій. Важливою характеристикою пінобетону є його міцність. Існує припущення, що саме піноутворювач призводить до сповільнення швидкості гідратації цементу, що в свою чергу зумовлює зниження міцності.

Крім цього, фундаментальною проблемою розроблення та впровадження ніздрюватих бетонів є забезпечення їх високої технологічності, що визначає якість поверхні та ущільнення при формуванні виробів та використанні пінобетонної суміші при спорудженні будівельних об'єктів, і широкого спектру функціональних можливостей та властивостей, які окреслюють енергетичну ефективність та довговічність будівельних конструкцій в різних умовах експлуатації [13, 29, 34, 52]. Забезпечення функціональних властивостей пінобетонів неавтоклавного тверднення, технологія виготовлення якого більш проста та менш енергоємна, ніж технологія автоклавного газобетону, значною мірою вирішується за рахунок дисперсного армування їх структури різними видами фібри.

3.1. Дослідження впливу піноутворювачів на властивості портландцементу

Вибір піноутворювача певною мірою обумовлює як технологію виробництва пінобетону, так і його технічні та експлуатаційні характеристики. Властивості піни по-різному впливають на структуроутворення та тверднення пінобетонної маси, що в подальшому впливає на експлуатаційні характеристики виробів і конструкцій з пінобетону [61].

При виробництві пінобетону для оцінки якості піноутворювачів (ПУ) та технічної піни застосовують техніко-економічні критерії – ціна, стабільність властивостей, гарантійний термін; санітарно-гігієнічні; виробничі - питома витрата ПУ, однокомпонентність і простота приготування розчину ПУ, кратність і стійкість піни; технологічні – стійкість піни, кратність піни, вплив ПУ на гідратацію в'язучого, стійкість поризованої суміші в часі [3].

Піни – це грубодисперсні висококонцентровані системи, в яких дисперсною фазою є бульбашки газу, а дисперсійним середовищем – рідина у вигляді тонких плівок. В роботі проведено дослідження фізичних властивостей технічної піни, зокрема її кратності та стійкості з використанням піноутворювачів Centripor, Schaumbildner 285, S-45, K-1.

Об'ємний вміст дисперсійного середовища зазвичай характеризують кратністю піни v , тобто відношенням об'єму піни до об'єму дисперсійного середовища. Кратність піни розраховували за формулою:

$$K_p = V_{\text{піни}} / V_{\text{п.у.}} = \rho_{\text{п.у.}} / \rho_{\text{піни}} \quad (3.1)$$

де $V_{\text{піни}}$, $V_{\text{п.у.}}$, $\rho_{\text{піни}}$, $\rho_{\text{п.у.}}$ – об'єм і густина піни та піноутворювача відповідно.

Стійкість піни характеризується коефіцієнтом стійкості піни в цементному тісті і розраховується за формулою:

$$C = V_{\text{п.ц.т.}} / (V_{\text{піни}} + V_{\text{ц.т.}}) \quad (3.2)$$

де $V_{\text{п.ц.т.}}$, $V_{\text{піни}}$, $V_{\text{ц.т.}}$ – об'єм поризованого цементного тіста, піни та цементного тіста відповідно.

Як показали результати досліджень (рисунок 3.1) кратність піни з використанням піноутворюючих добавок коливається в межах 12 (для К-1) до 23 (для Centripor) і класифікуються як середньократні.

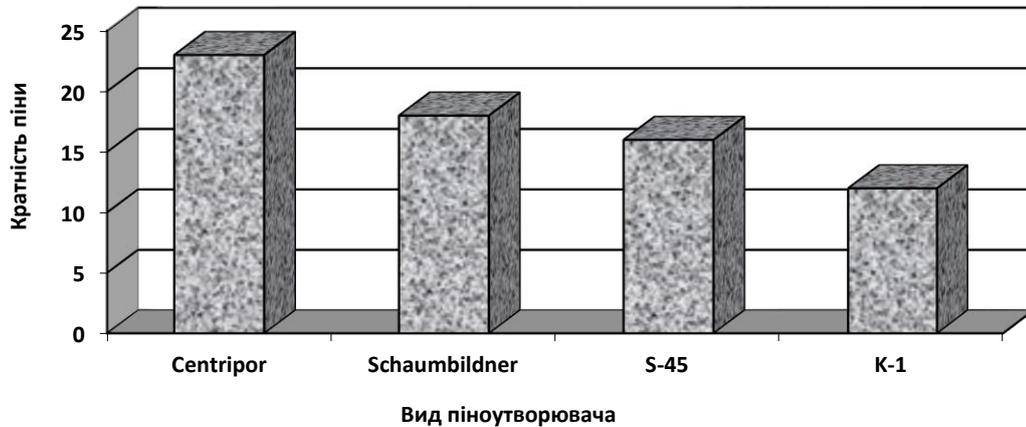


Рисунок 3.1 – Кратність технічної піни, одержаної в використанні різних піноутворювачів

Важливою характеристикою є стабільність (стійкість) піни, що характеризується здатністю зберігати загальний об'єм, дисперсність і перешкоджати витіканню рідини (синерезису). Стійкість пін залежить від природи і концентрації піноутворювача. З часом плівки, між бульбашками піни стають тоншими внаслідок стікання рідини, бульбашки лопаються, піна руйнується і, нарешті, замість піни залишається одна рідка фаза - розчин піноутворювача у воді або іншої рідини. Як показали результати випробувань піноутворювачів (рисунок 3.2), найвищою стійкістю характеризується технічна піна, одержана з використанням піноутворювача Centripor з коефіцієнтом стійкості 0,93.

Авторами показано [106], що однією з основних причин зниження міцності пінобетонів є сповільнення швидкості тужавіння та гідратації цементу в присутності пороутворюючих добавок. У зв'язку з цим досліджено вплив мінімально допустимої кількості піноутворювачів, а саме: по 0,25 мас.% Centripor, S-45, K-1 і 0,1 мас.% Schaumbildner на терміни тужавіння портландцементу ПЦ І-500.

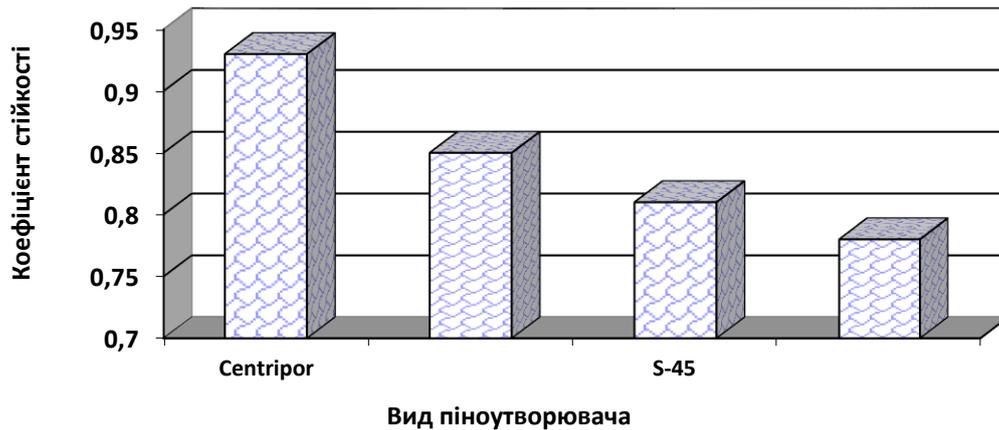


Рисунок 3.2 – Стійкість технічної піни, одержаної в використанні різних піноутворювачів

На основі експериментальних даних встановлено (рисунок 3.3), що при введенні добавок Centripor, S-45, К-1 і Schaumbildner початок тужавіння цементного тіста відтягується до 230, 470, 270, 320 хв відповідно. У той час як початок тужавіння для портландцементу без піноутворювача становить 180 хв. Кінець тужавіння портландцементу також відтягується з 300 хв до 340, 560, 410, 530 хв відповідно для Centripor, S-45, К-1 і Schaumbildner.

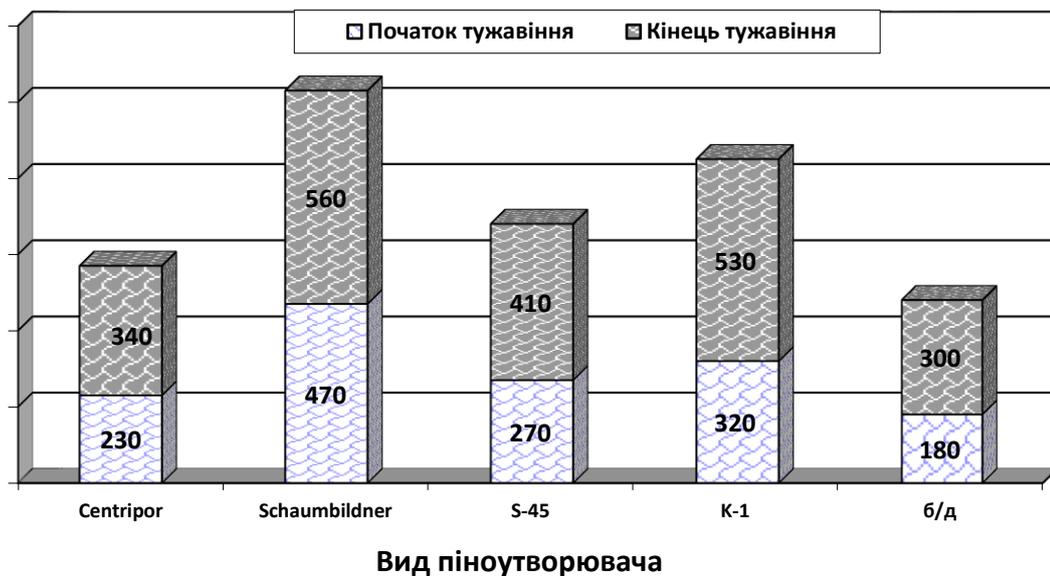


Рисунок 3.3 – Вплив піноутворювачів на терміни тужавіння портландцементу

Вивчення впливу піноутворювачів на фізико-механічні показники цементного каменю проводили на зразках 2х2х2 см, які тверднули в нормальних умовах. Як свідчать дані таблиці 3.1, введення піноутворювача призводить до зниження міцності портландцементного каменю. Так, при мінімально допустимій кількості піноутворювачів Centripor, Schaumbildner, S-45, K-1 міцність при стиску через 2 доби знижується на 50,1; 52,2; 59,3; 61,9 %, через 7 діб – на 30,9; 29,4; 48,3; 55,9 % відповідно, порівняно з портландцементом без добавок. Слід відзначити, що в подальші терміни тверднення і при збільшенні вмісту піноутворювача зниження міцності відбувається не так різко. Проте при максимально допустимому вмісті піноутворювача, міцність при стиску портландцементу на 28 добу знижується в 2,4; 3,04; 2,9; 3,8 рази.

Таблиця 3.1 – Вплив піноутворювачів на міцність цементного каменю

№ з/п	Вид піноутворювача	Вміст піноутворювача, мас. %	Границя міцності при стиску, МПа, через, діб		
			2	7	28
1	-	-	59,0	65,2	92,1
2	Centripor	0,25	29,4	45,0	46,3
3		1,0	23,8	41,1	42,9
4		2,0	19,4	37,2	38,3
5	Schaumbildner	0,1	28,2	46,0	47,9
6		0,3	26,6	33,1	35,9
7		0,5	22,5	30,0	30,3
8	S-45	0,25	24,0	33,7	39,4
9		1,0	20,9	29,0	36,3
10		2,0	18,4	20,3	31,3
11	K-1	0,25	22,5	28,7	40,3
12		1,0	21,9	24,3	28,1
13		2,0	18,7	23,7	24,5

Отже, на основі експериментальних даних встановлено, що усі види піноутворювачів, що використовувались в дослідженні, призводять до збільшення термінів тужавіння та зниження міцності портландцементного каменю. При використанні піноутворювача Centripor спостерігається найкращі параметри технічної піни, зокрема кратність піни 23 і коефіцієнт стійкості піни 0,93 та найменший негативний вплив на властивості портландцементного каменю. Тому для подальших досліджень використовували піноутворювач Centripor.

3.2. Оцінка впливу технологічних факторів на фізико-механічні властивості пінобетонів

Суттєвий вплив на характеристики пінобетону чинить якість дрібного заповнювача. Для створення міцного міжпорового каркасу необхідно застосовувати пісок або інший заповнювач, основний розмір яких не перевищує 0,35-0,8 мм. В іншому випадку, інертний заповнювач в матеріалі міжпорових стінок перетворитися на включення, оточене порами, не відіграючи ніякої ролі в підвищенні міцності готового матеріалу. У зв'язку з цим, досліджено реологічні властивості пінобетонних сумішей з використанням кварцових пісків Жовківського, Славутського та Ясинецького родовищ, які характеризуються модулем крупності 1,62, 1,34, 1,18 відповідно для одержання пінобетону з проектною маркою за середньою густиною D600. Дослідженнями впливу крупності піску на рухливість пінобетонних сумішей при сталому водотвердому відношенні ($B/T=0,55$) показано, що зі зростанням крупності заповнювача знижується рухливість суміші, що спричиняється підвищенням її жорсткості. Так, рухливість суміші з використанням піску з $M_{кр}=1,62$ становить 280 мм, у той час як використання піску з $M_{кр}=1,18$ забезпечує одержання пінобетонної суміші з рухливістю 300 мм (рисунок 3.4). Слід відзначити, що середня густина

пінобетону на дрібнодисперсному піску є меншою, порівняно з пінобетоном на крупнішому піску. Так, при використанні піску з $M_{кр}=1,18$ середня густина пінобетону становить 630 кг/м^3 і задовольняє вимоги для марки за середньою густиною D600, тоді як при використанні піску з $M_{кр}=1,62$ – 720 кг/м^3 , що відповідає марці за середньою густиною D700.

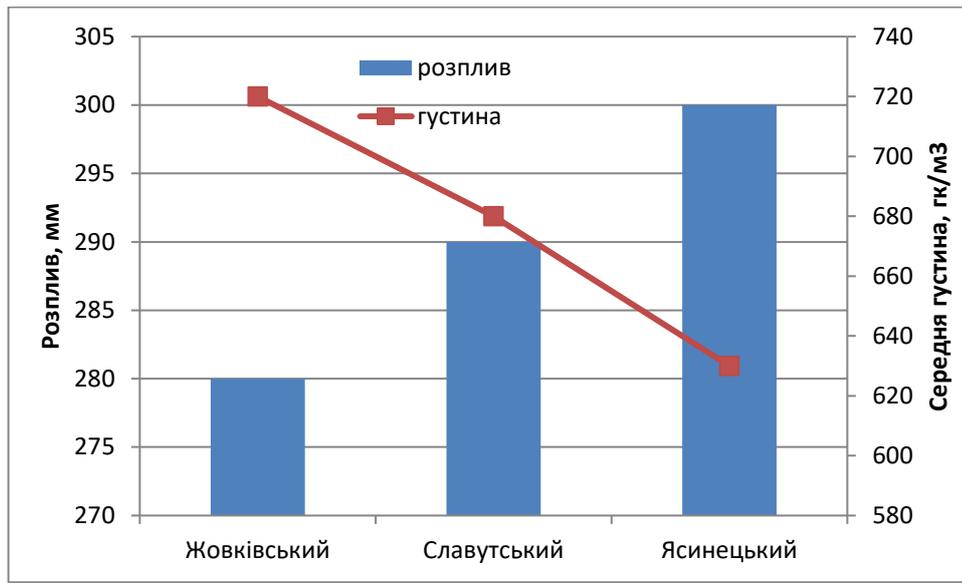


Рисунок 3.4 – Вплив крупності заповнювача на рухливість пінобетонної суміші та середню густину пінобетону

Дослідженнями фізико-механічних властивостей пінобетонів з використанням заповнювачів різної крупності показано (рисунок 3.5). Так, ніздрюватий бетон на піску Жовківського родовища з модулем крупності 1,62 через 28 діб тверднення характеризується міцністю при стиску 2,5 МПа при середній густині пінобетону 720 кг/м^3 , а міцність пінобетону на піску Ясинецького родовища з $M_{кр}=1,18$ – 1,5 МПа, що пояснюється його меншою середньою густиною. Таким чином, для забезпечення оптимальних реологічних властивостей пінобетонної суміші, середньої густини та міцності пінобетонів доцільним є використання пісків з меншим модулем крупності, зокрема Ясинецького родовища.

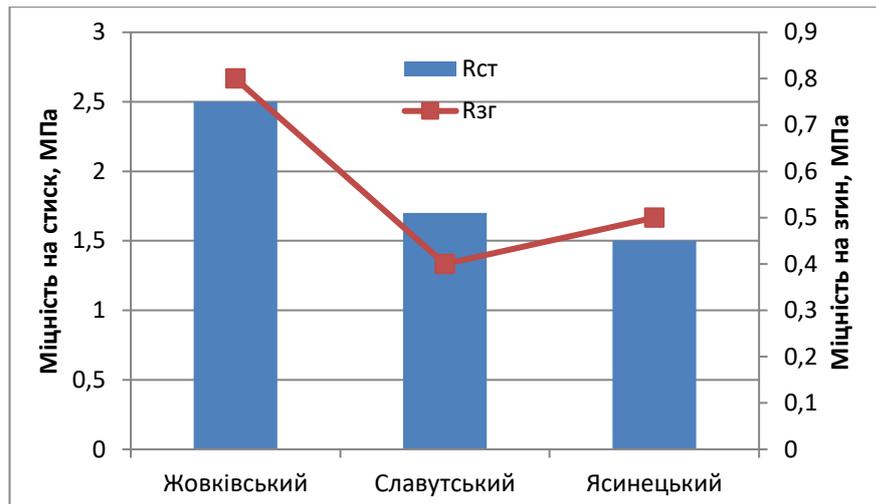


Рисунок 3.5 – Вплив крупності заповнювача на міцність пінобетону через 28 діб тверднення в нормальних умовах

Одним із ефективних способів підвищення показників міцності та деформативних характеристик пінобетонів є дисперсне армування. Використання армувальних волокон, що відрізняються за своїм складом від матеріалу матриці, обумовлено можливістю в процесі роботи композиційного матеріалу сприймати вищі порівняно з матрицею розтягуючі та згинальні навантаження. Синтетична дисперсна арматура як пружно-в'язкий компонент характеризується запасом пластичності та здатністю відтягувати момент руйнування матеріалу.

Результати досліджень впливу довжини поліпропіленової фібри на міцність цементного каменю представлено в таблиці 3.2. Так, міцність при стиску цементного каменю при введенні фібри довжиною 12 мм в кількості 0,25 мас.% зростає на 6–12% у всі терміни тверднення, у той час як міцність при згині зростає на 12 % через 2 доби та на 20,5 % через 28 діб тверднення. Введення поліпропіленової фібри довжиною 18 мм призводить до деякого зниження міцності при стиску цементного каменю, що зумовлено неоднорідністю розподілення фібри в об'ємі матеріалу. Підвищення ступеня армування композиційного матеріалу також призводить до утворення в ньому грудкуватих включень, які спричиняють створення нерівномірної структури, в результаті чого знижуються показники міцності при стиску і згині. Таким чином,

найвищими показниками міцності на стиск та згин характеризуються зразки, армовані дисперсним волокном довжиною 12 мм.

Таблиця 3.2 – Вплив довжини поліпропіленової фібри на властивості портландцементу ПЦ І-500 (тісто 1:0, НГТ=0,31)

Довжина волокон фібри, мм	Ступінь армування, %	Границя міцності при стиску/згині, МПа, через, діб,		
		2	7	28
б/д	-	36,7/7,5	56,4/9,1	70,3/11,2
6	0,15	38,9/8,6	60,2/11,6	75,3/13,5
12	0,15	41,2/9,2	61,2/15,2	77,8/18,2
18	0,15	42,1/9,8	62,6/16,2	78,9/19,6
6	0,25	43,7/10,0	79,7/12,8	84,2/16,5
12	0,25	44,5/12,4	81,9/16,4	86,4/19,1
18	0,25	38,3/10,9	71,2/16,5	82,6/19,4

Важливою характеристикою пінобетонної суміші литтєвої технології є її рухливість. Показник рухливості пінобетонної суміші визначали як середнє значення діаметру розпливу циліндра Суттарда, а умовну в'язкість – як час до розпливання 200 мм. Для проведення досліджень використовували пінобетонні суміші для одержання пінобетону з проектною маркою за середньою густиною D600. Кількість фібри у дослідженнях приймали 0,2 мас.%. Проведеними дослідженнями встановлено (рисунок 3.6), що введення волокон поліпропіленової фібри довжиною 6 мм спричиняє зниження рухливості розчинової суміші від 300 до 290 мм, збільшення довжини фібри до 12 мм зумовлює зменшення розпливу до 270 мм. Використання поліпропіленової фібри довжиною волокон 18 мм спричиняє зменшення розпливу пінобетонної суміші до 255 мм. Зниження рухливості дисперсно-армованих цементних систем пов'язано із структуруванням суміші фібровими елементами, зростанням поверхні розділу фаз та необхідністю підвищення кількості води для її

змочування, збільшенням внутрішнього тертя, обмеженим переміщенням компонентів матриці в присутності волокон.

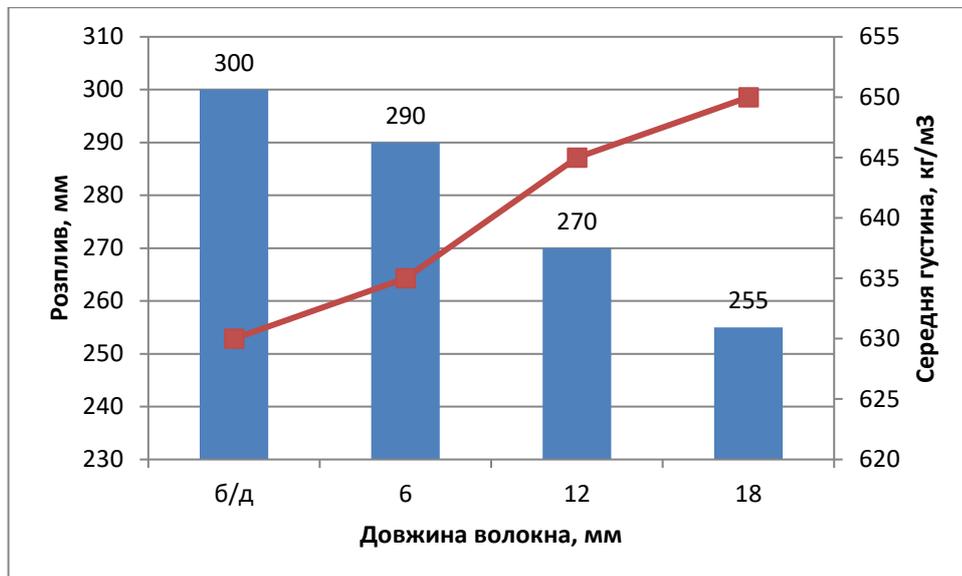


Рисунок 3.6 – Вплив довжини волокон на рухливість пінобетонної суміші та середню густину пінобетону

При дослідженні густини дисперсно-армованих пінобетонів встановлено, що збільшення довжини волокон спричиняє зростання їх середньої густини, зумовлене зменшенням стійкості піни. Так, введення 0,2 мас.% фібри довжиною 6 мм в склад пінобетонної суміші призводить до зростання густини пінобетону від 630 до 635 кг/м³, у той час, як збільшення довжини волокна до 18 мм зумовлює зростання густини до 650 кг/м³. Збільшення густини при дисперсному армуванні забезпечує зростання міцності пінобетону як на стиск, так і на згин (рисунок 3.7).

Результати впливу довжини поліпропіленової фібри на міцність пінобетону показали, що найвищими показниками міцності на стиск та згин характеризуються зразки, армовані дисперсним волокном довжиною 18 мм. Так, міцність на стиск через 28 діб тверднення при введенні даної фібри в кількості 0,2 мас.% зростає на 12%, у той час як міцність на згин зростає на 20,5 %. Введення поліпропіленової фібри довжиною 18 мм забезпечує одержання пінобетону з міцністю при стиску 2 МПа, та згині – 0,9 МПа.

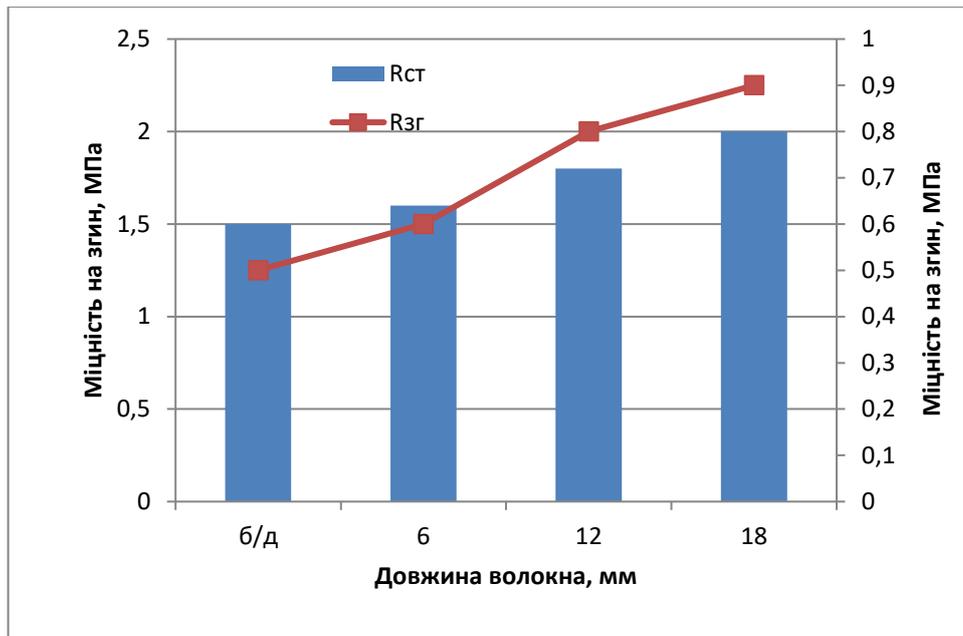


Рисунок 3.7 – Вплив довжини фібри на міцність дисперсно-армованих пінобетонів марки D600 через 28 діб тверднення

З метою оптимізації складів пінобетонів з врахуванням критерію ефективного використання портландцементу проведено моделювання впливу рецептурних факторів - співвідношення заповнювача в твердій частині пінобетону та витрати полімерної фібри на властивості ніздрюватих бетонів з використанням методу математичного планування експерименту шляхом одержання багатфакторних моделей математичних залежностей між властивостями та технологічними параметрами. Такі методи дозволяють скоротити проведення експерименту, впорядкувати пошук оптимальних умов, отримати математичну модель об'єкта дослідження. Принципові основи використання статистичних моделей у вирішенні технологічних завдань удосконалення методології проектування ніздрюватих бетонів із заданими властивостями висвітлені в роботах [7, 30, 62].

Вплив реологічних характеристик розчинової суміші пінобетону на характер розподілення твердої фази, з іншого боку, може залежати від ступеня насичення матеріалу газовими включеннями. Факторами оптимізації ніздрюватого бетону вибрано вміст наповнювача ($X_1 = 0,3; 0,5; 0,7$ частки від одиниці) та витрата поліпропіленової фібри довжиною 12 мм ($X_2 = 0; 0,75;$

1,0 кг/м³). При зміні рецептурних рівнів вибраних факторів водовміст бетонної суміші залишався постійним (В/Т=0,55). Повні відомості про змінні фактори їх рівнях і інтервалах варіювання наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Характеристика планування експерименту

Характеристика	Витрата наповнювача (X_1), частка одиниці	Витрата поліпропіленової фібри (X_2), кг/м ³
Основний рівень “0”	0,5	0,75
Нижній рівень “-1”	0,3	0
Верхній рівень “+1”	0,7	1,5
Інтервал варіювання	0,2	0,75

При плануванні експерименту були вибрані наступні контрольні параметри:

Y_1 – розплив пінобетонної суміші, Р, мм;

Y_2 – середня густина пінобетонної суміші, $\rho_{бс}$, кг/м³;

Y_3 – середня густина пінобетону, $\rho_б$, кг/м³

Y_4, Y_5 – границя міцності зразків пінобетону на стиск через 7 та 28 діб тверднення відповідно, МПа;

Y_6, Y_7 – границя міцності зразків бетону на згин через 7 та 28 діб тверднення відповідно, МПа;

Y_8 – коефіцієнт тріщиностійкості.

Метод математичного планування експерименту дає можливість отримати математичний опис процесу у вигляді рівняння регресії (3.2):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2, \quad (3.2)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії, що розраховуються за формулами (3.3-3.9):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1(i)}{\sum_{i=1}^N x_1(i)^2} \quad (3.4) \quad b_2 = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_2(i)}{\sum_{i=1}^N x_2(i)^2} \quad (3.5)$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1^*(i)}{\sum_{i=1}^N x_1^*(i)^2} \quad (3.6) \quad b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_1(i) \cdot x_2(i)}{\sum_{i=1}^N (x_1(i) \cdot x_2(i))^2} \quad (3.7)$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{i=1}^N y(i) \cdot x_2^*(i)}{\sum_{i=1}^N x_2^*(i)^2} \quad (3.8) \quad b_0^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(i) \quad (3.9)$$

Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№ п/п	Витрата матеріалів		Фактори		РЦ, мм	$\rho_{\text{сер}}$ $\rho_{\text{с}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{сер}}$, кг/м ³	Границя міцності, МПа, через, діб				$K_{\text{тр}}$
								на стиск		на згин		
								7	28	7	28	
Напов- нювач	Фібра кг/м ³	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	
1	0,7	1,5	+1	+1	150	792	680	0,57	1,1	0,3	0,35	0,3
2	0,7	0	+1	-1	170	776	670	0,31	0,6	0,11	0,14	0,23
3	0,3	1,5	-1	+1	220	895	650	1,43	2,2	0,5	0,51	0,23
4	0,3	0	-1	-1	250	870	630	1,01	1,6	0,35	0,45	0,23
5	0,7	0,75	+1	0	160	768	640	0,50	0,9	0,28	0,31	0,34
6	0,3	0,75	-1	0	230	905	675	1,20	2,0	0,41	0,49	0,25
7	0,5	0,5	0	1	170	840	670	1,10	1,6	0,37	0,41	0,26
8	0,5	0	0	-1	200	815	650	0,83	1,3	0,28	0,32	0,25
9	0,5	0,75	0	0	180	830	630	1,04	1,6	0,34	0,38	0,26

Перевірку коефіцієнтів регресії на значимість та адекватність рівнянь регресії виконували з допомогою критеріїв Стюдента та Фішера. При компромісній оптимізації для пошуку значень змінних факторів X_1 і X_2 , при яких досліджувані функції приймають максимальні значення для розпливу, міцності, коефіцієнта тріщиностійкості та мінімальних значеннях густини пінобетону використали дисоціативно-кроковий метод оптимізації. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії проведено з використанням матричного підходу до регресивного аналізу. Отримані результати коефіцієнтів рівнянь регресії наведені в табл. 3.5. Незначимі коефіцієнти прирівнюють до нуля, а відповідні члени виключають з рівнянь регресії. Розрахунками критерію Фішера встановлено, що отримані рівняння регресії адекватно описують експериментальні дані.

Таблиця 3.5 – Значення коефіцієнтів регресії

Функції відгуку	Коефіцієнт регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
Y_1	181,11	-36,67	-13,33	2,50	13,33	3,33
Y_2	830,33	-55,67	11,00	-2,25	6,00	-3,00
Y_3	643,33	5,83	8,33	-2,50	7,50	10,00
Y_4	1,02	-0,38	0,16	-0,04	-0,15	-0,04
Y_5	1,71	-0,53	0,27	-0,03	-0,17	-0,07
Y_6	0,35	-0,10	0,07	0,01	-0,01	-0,03
Y_7	0,39	-0,11	0,06	0,04	0,01	-0,03
Y_8	0,27	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03

Аналіз впливу досліджуваних факторів на рухливість пінобетону показав, що даний показник знижується при збільшенні впливу кожного фактора (коефіцієнт $b_1=-36,67$ та $b_2=-13,33$), при цьому збільшення вмісту наповнювача є визначальним. За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні поверхні та діаграми, що адекватно описують залежність розпливу циліндра та

середньої густини пінобетонної суміші, міцності при стиску та згині через 7 та 28 діб тверднення затверділого бетону від змінних параметрів (рисунок 3.8–3.10).

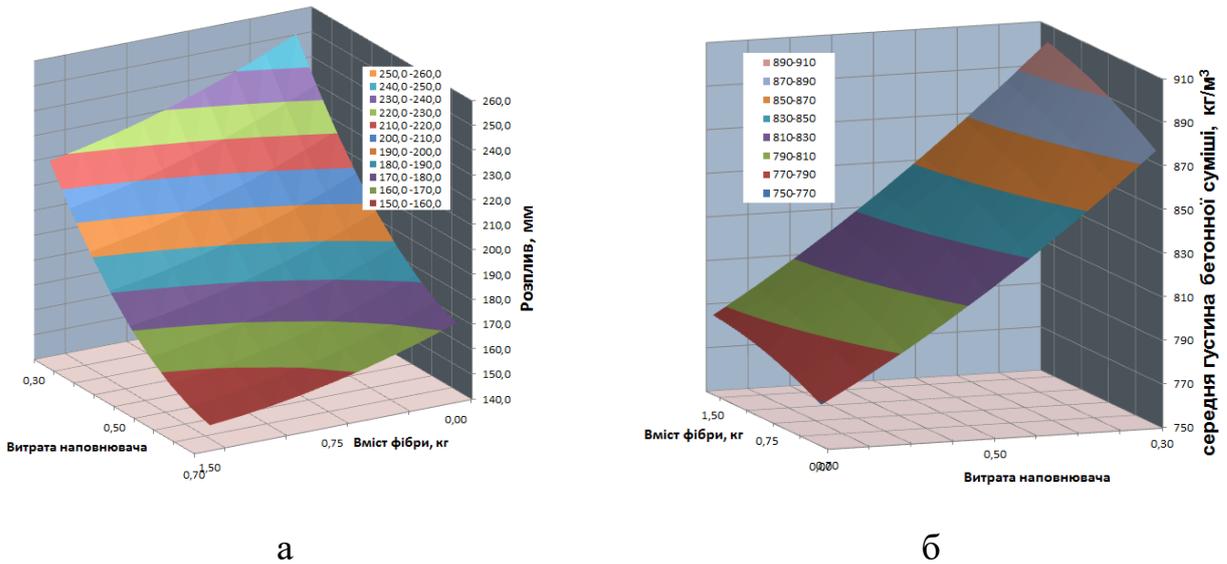


Рисунок 3.8 – Ізопараметричні поверхні рухливості (а) та середньої густини (б) пінобетонних сумішей, армованих дисперсним волокном

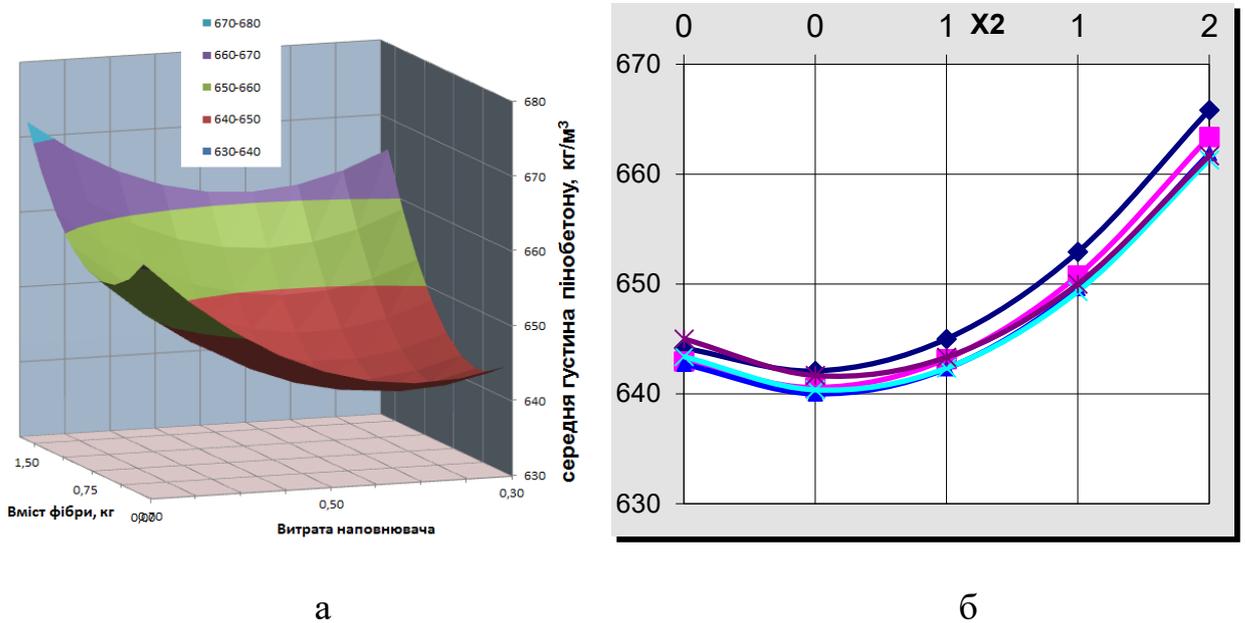
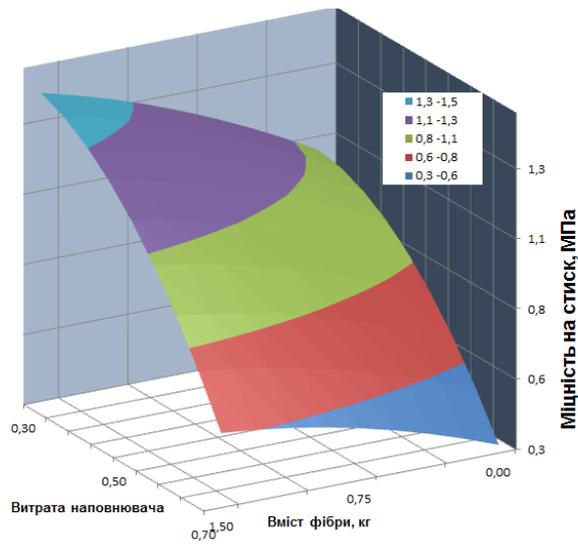
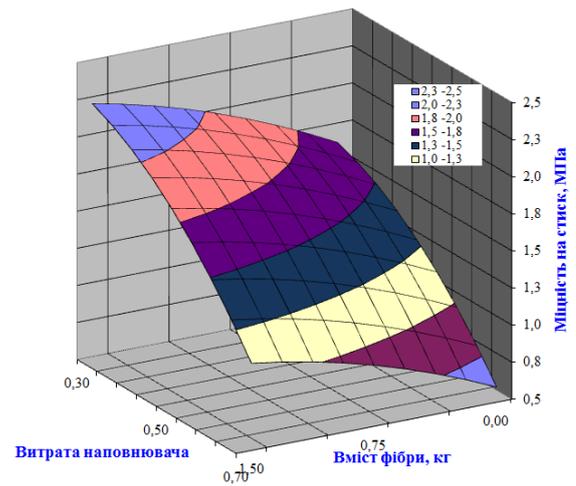


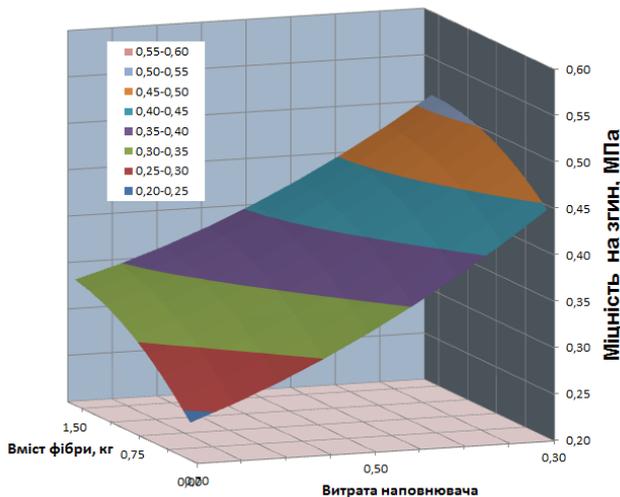
Рисунок 3.9 – Ізопараметрична поверхня (а) та ізолінії (б) середньої густини пінобетонів, армованих дисперсним волокном



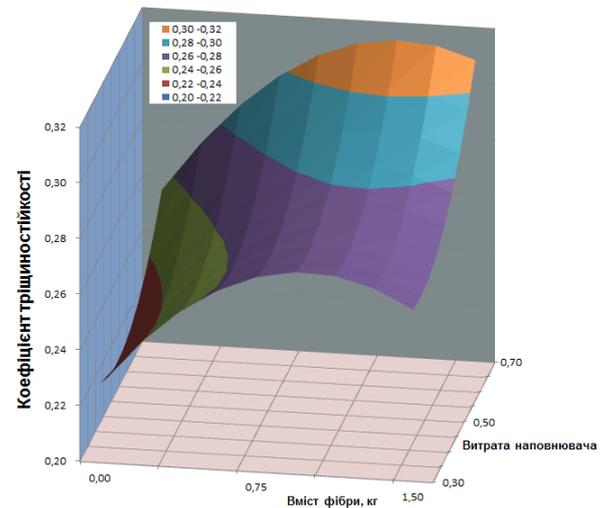
а



б



в



г

Рисунок 3.10 – Ізопараметричні поверхні міцності на стиск через 7 (а) та 28 діб (б), міцності на згин через 28 діб (в) та коефіцієнта тріщиностійкості (г) пінобетонів, армованих дисперсним волокном

Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дозволяють визначити оптимальне співвідношення рецептурних факторів для одержання необхідної рухливості пінобетонних сумішей, середньої густини та міцності дисперсно-армованих ніздрюватих конструкційно-теплоізоляційних бетонів. Так, використання 1,5 кг фібри на 1 м³ пінобетонної

суміші при відношенні заповнювача 0,5 або 0,75 кг фібри на 1 м³ пінобетонної суміші при відношенні заповнювача 0,3 забезпечує одержання екстремумів значень міцності на стиск (1,6–2,2 МПа), що задовольняє вимоги стандарту для пінобетонів неавтоклавного тверднення марки за середньою густиною D600.

3.3. Фізико-хімічні особливості структуроутворення ніздрюватих бетонів, армованих дисперсними волокнами

Використання дисперсних армувальних елементів зумовлює зміну процесів раннього структуроутворення, фазового складу, ущільнення мікроструктури й зростання міцності цементної матриці пінобетонів. Згідно даних рентгенофазового аналізу при гідратації цементного каменю на основі ПЦ І-500 через 28 діб на дифрактограмах фіксуються основні лінії гідратних фаз, зокрема еtringіту ($d/n=0,973$; 0,561 нм та ін.) та $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n=0,493$; 0,263 нм та ін.), при цьому зменшується інтенсивність ліній негідратованого цементу ($d/n=0,302$; 0,277; 0,275; 0,218 нм) (рисунок 3.11).

На дифрактограмах цементуючої матриці пінобетону через 28 діб тверднення спостерігаються лінії $\text{Ca}(\text{OH})_2$ меншої інтенсивності, а інтенсивність ліній негідратованого цементу є сильнішою порівняно з каменем на основі ПЦ І-500, що свідчить про деяке сповільнення процесів гідратації в присутності піноутворювача на основі високомолекулярних поверхнево-активних речовин. Слід відзначити, що введення поліпропеленової фібри не впливає на механізм процесу гідратації і на дифрактограмі дисперсно-армованого каменю спостерігаються лінії основних гідратних фаз, зокрема еtringіту ($d/n=0,973$; 0,561 нм та ін.), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n=0,493$; 0,263 нм та ін.), проте зростання міжфазної поверхні при введенні фібри, на якій можуть кристалізуватись гідратні новоутворення, забезпечує деяке зростання ступеня гідратації портландцементу.

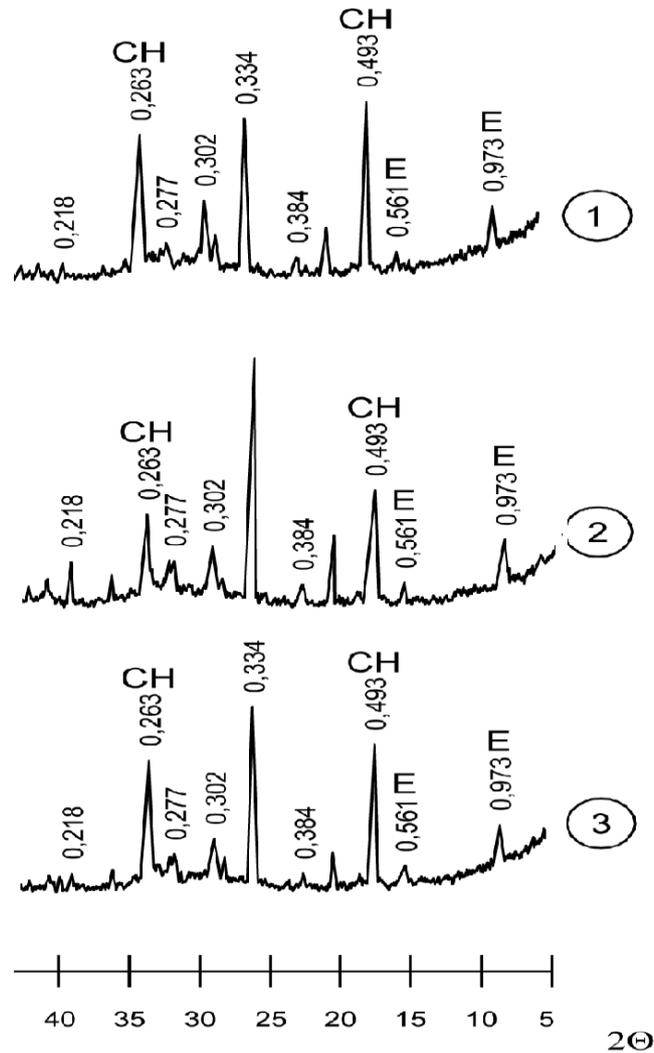


Рисунок 3.11 – Дифрактограми каменю на основі: 1 – ПЦ I-500; 2 – цементуючої матриці пінобетону; 3 – дисперсно-армованої цементуючої матриці пінобетону, гідратованих 28 діб у нормальних умовах

Вивчення генезису мікроструктури цементного каменю пінобетонної матриці має істотне значення і дозволяє оцінити вплив гідратних новоутворень на формування стабільного кристалічного каркасу та міцності цементного каменю міжпорових перегородок. Важливою умовою для отримання ніздрюватого бетону із заданими структурно-механічними властивостями є управління процесом структуроутворення на початковому етапі. Особливість процесів гідратації пінобетонної матриці полягає в тому, що формування основних гідратних новоутворень відбувається в умовах високих значень

водотвердих відношень та наявності в складі добавки-піноутворювача, яка дозволяє одержати мікроструктуру каменю з великою кількістю рівномірно розподілених замкнутих пор розміром 0,5-2 мм з формуванням щільної мікроструктури міжпорових перегородок (рисунок 3.12).

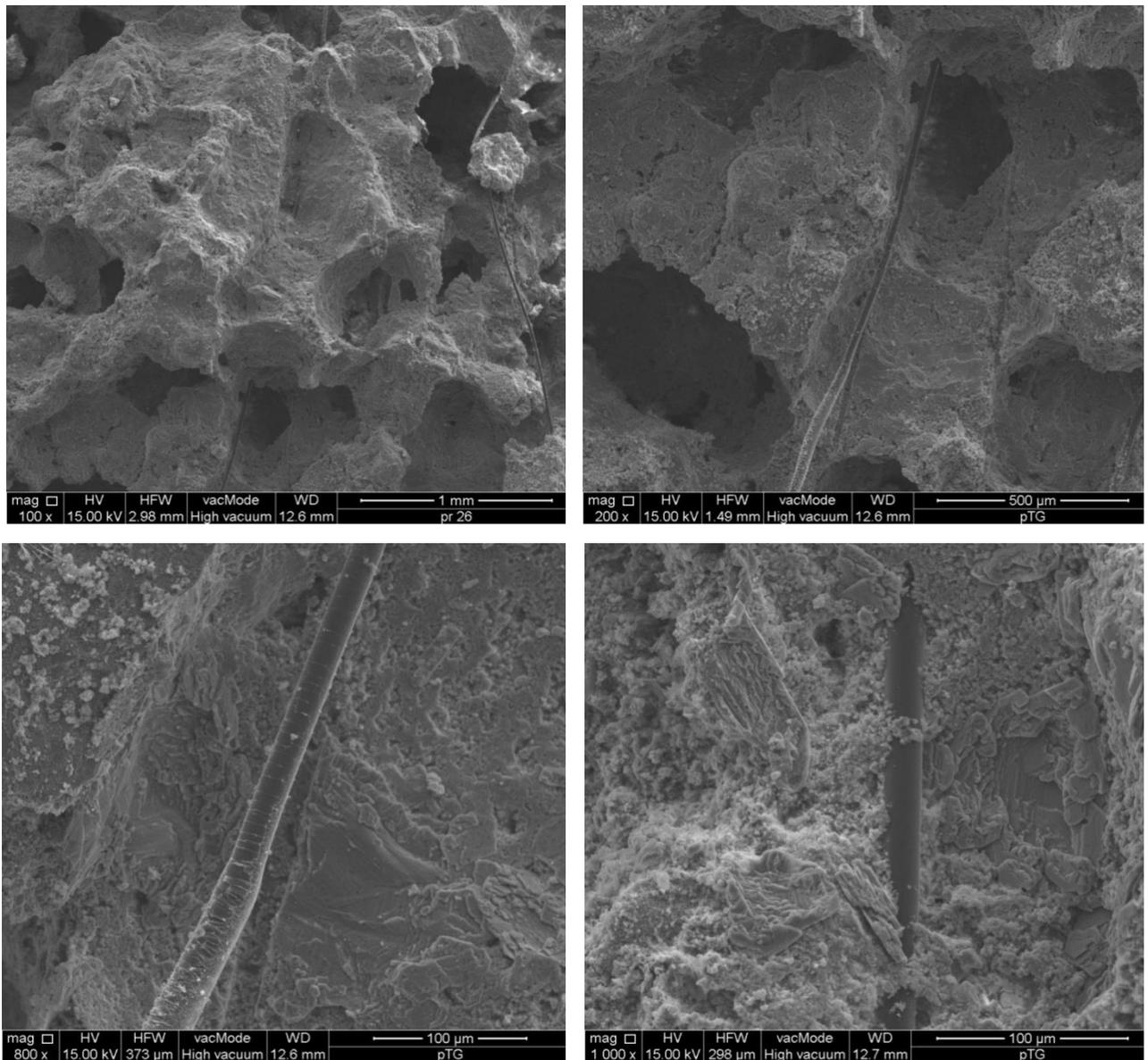


Рисунок 3.12 – Структура цементного каменю пінобетонної матриці

Метод растрової електронної мікроскопії доповнює дані про формування структури дисперсно-армованої цементної матриці пінобетону. Міжпорова перегородка бетону утворена однорідною малопористою цементуючою матрицею. Для підвищення конструктивних показників якості ніздрюватого бетону використано поліпропіленову фібру. Як видно з рисунку 3.12 невеликі

волокна фібри армують у всіх напрямках цементний камінь та підвищують міцність на розтяг при згині.

Мікроструктура каменю, гідратованого 28 діб, представлена значною кількістю гідратних фаз (рисунок 3.13). Спостерігаються гексагональні пластини, які згідно з даними мікрозондового аналізу, відносяться до кальцію гідроксиду та волокнистоподібні кристали гідросилікатів кальцію (рисунок 3.13). Деякі кристали вже добре оформленні, інші ще тільки формуються. Це сприяє ступінчастому росту шарів гідратних утворень, які зростаючись утворюють кристалоагрегати зернистої структури.

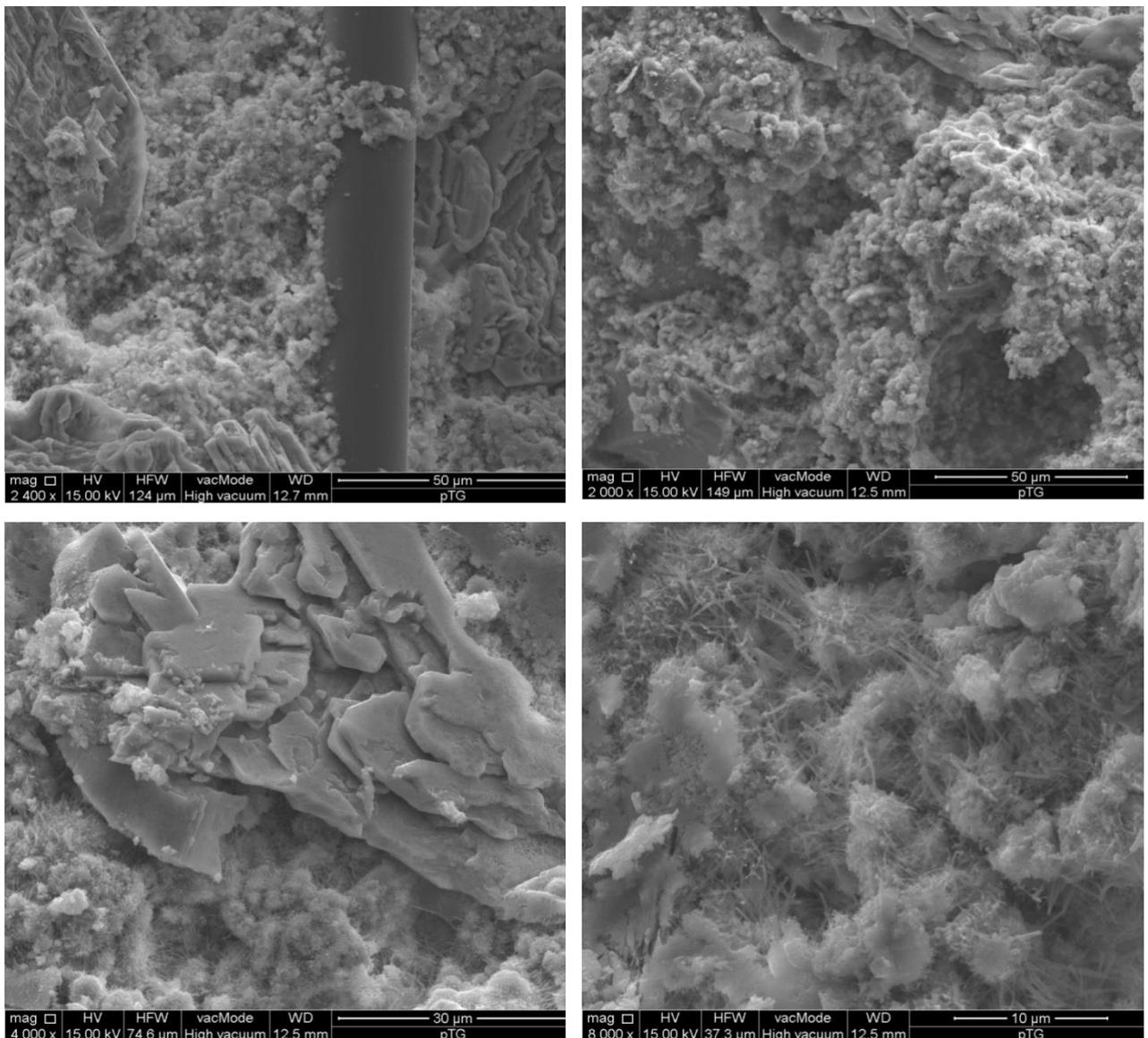


Рисунок 3.13 – Мікроструктура каменю ніздрюватого бетону, гідратованого 28 діб

Як видно з рисунку 3.14, мікроструктура пінобетонної цементної матриці характеризується широкою різноманітністю кристалічних форм – від слабокристалічних AF_m -фаз та AF_t -фаз, котрі є структурно-активними компонентами цементного каменю і забезпечують разом з дисперсними поліпропіленовими волокнами більш стабільні будівельно-технічні властивості пінобетону. Згідно даними мікрозондового аналізу округлі блоки кристалів відносяться до гідроксиду кальцію, така форма кристалів, очевидно, зумовлена наявністю піноутворювача.

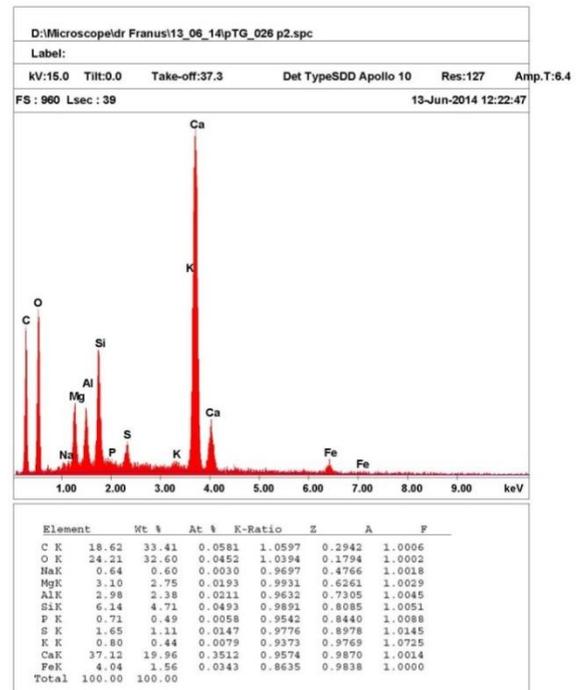
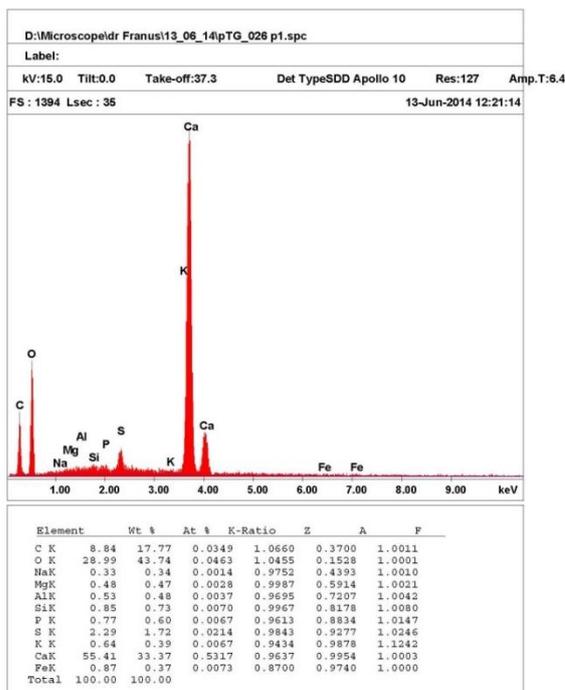
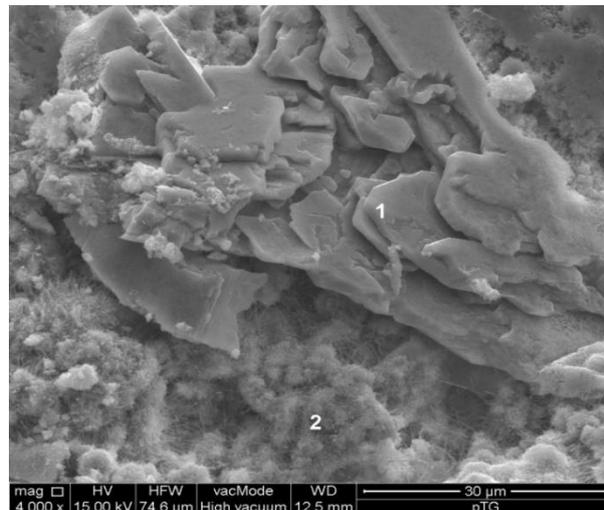


Рисунок 3.14 – Мікроструктура та результати мікрозондового аналізу портландцементного каменю пінобетонної матриці, гідратованої 28 діб

Сполучною ланкою міжкристалічного простору цементуючої матриці міжпорових перегородок є гідросилікатна фаза (рисунок 3.15). Наявність в композиційному матеріалі дисперсних волокон також створює основу, на якій формується міцний та щільний шар новоутворень в основному за рахунок гідросилікатів кальцію – контактна зона.

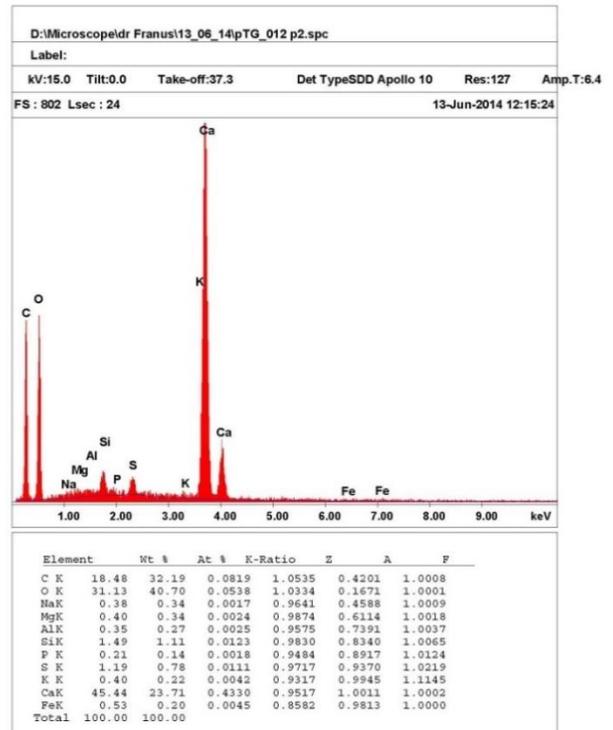
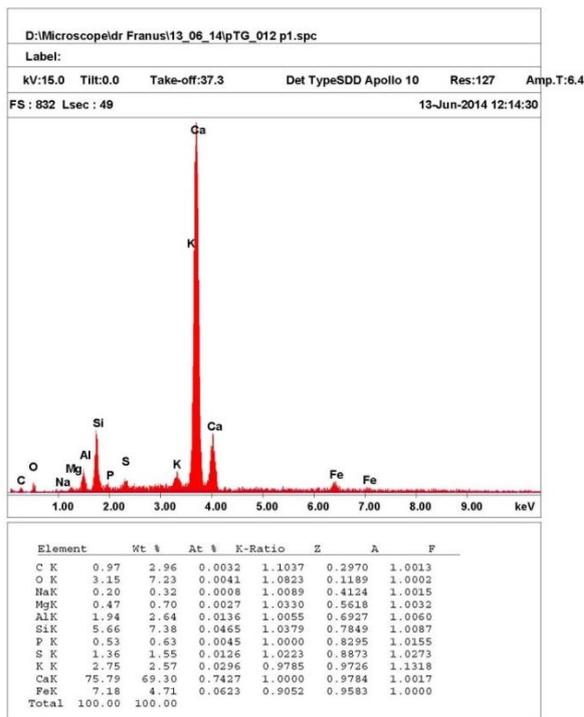
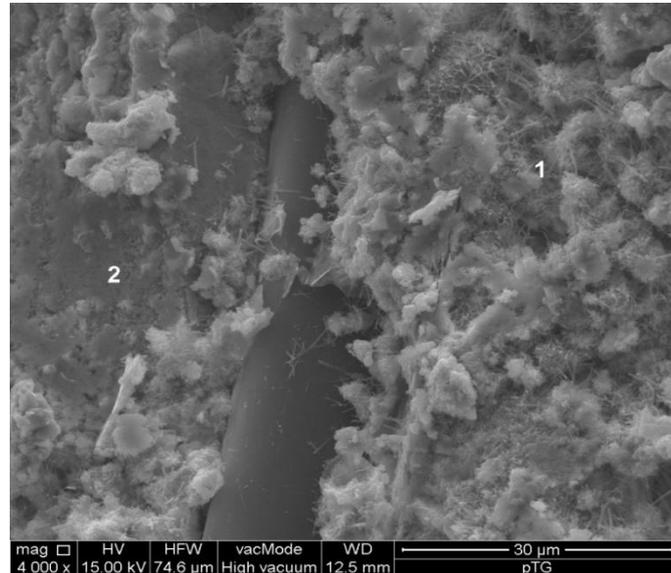


Рисунок 3.15 – Мікроструктура та результати мікрозондового аналізу цементного каменю пінобетонної матриці з поліпропіленовими волокнами, гідратованої 28 діб

Утворення контактної зони забезпечує підвищення зчеплення фібри з цементною матрицею, спільну роботу компонентів дисперсно-армованої матриці і значною мірою визначає будівельно-технічні властивості каменю на її основі.

Отже, високі показники міцності на стиск та згин дисперсно-армованих ніздрюватих бетонів забезпечуються за рахунок направленою формування мікроструктури цементуючої матриці з утворенням гідратних новоутворень, ущільнення цементного каменю внаслідок кольматації пор гідросилікатами і гідроалюмінатами кальцію, а також спільної ефективної роботи поліпропіленової фібри та цементної матриці.

3.4. Дослідження будівельно-технічних властивостей конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів

Можливість використання розроблених конструктивно-теплоізоляційних дисперсно-армованих пінобетонів як теплоізоляційного шару дорожнього полотна визначається будівельно-технічними властивостями. До матеріалів такого типу пред'являється ряд вимог нормованих ДСТУ Б В.2.7-45:2010 Бетони ніздрюваті [6]. До нормованих показників фізико-технічних властивостей ніздрюватих конструкційно-теплоізоляційних бетонів відноситься марка бетону за середньою густиною, клас за міцністю на стиск, марка за морозостійкістю, коефіцієнт теплопровідності, деформації усадки, сорбційна вологість бетону. Досліджено також показники пористості, що є визначальним для решти показників.

3.4.1. Середня густина, пористість, водопоглинання. Основні експлуатаційні характеристики будівельних матеріалів безпосередньо пов'язані з структурою і є її функцією [3, 18, 25]. До основних структурно-фізичних властивостей відносять густина та пористість. ДСТУ Б В 2.7-170:2008 передбачає визначення середньої густини в нормованих станах вологості, зокрема в сухому, повітряно-сухому та водонасиченому стані. Як показали

результати випробувань (таблиця 3.6), середня густина пінобетонів становить 606, 791 та 955 кг/м³, що відповідає вимогам для марок за густиною D600, D800 D1000 ніздрюватих бетонів. Слід відзначити, що середня густина пінобетону при введенні поліпропіленової фібри дещо підвищується порівняно з неармованими, але відповідає вищевказаним маркам.

Густина пінобетонів у сухому стані відрізняється від густини в повітряно-сухому стані на 2–5 %, тоді як різниця між середньою густиною в повітряно-сухому та водонасиченому станах є значнішою і залежить від густини, що зумовлюється переважанням відкритих капілярних пор, які заповнюються при водонасиченні. Так, для пінобетонів марки D600 ця різниця становить 53,3–55,3 %, тоді як пінобетони з маркою D1000 характеризуються різницею 11,6–18,3 %.

Таблиця 3.6 – Структурно-фізичні властивості та вод пінобетонів

Показник		Неармований			Дисперсно-армований		
		D600	D800	D1000	D600	D800	D1000
Середня густина в стані, кг/м ³ :							
сухому		606	782	955	605	791	990
повітряно-сухому		621	814	1025	630	825	1037
водонасиченому		952	1032	1144	969	1035	1227
Водопоглинання	масове, мас. %	57,1	30,5	19,8	59,3	35,8	24,9
	об'ємне, об. %	34,6	23,9	18,9	35,9	28,3	24,7
Пористість, %							
загальна, Пп		76,7	69,6	63,5	76,0	68,5	62,2
відкрита, По		34,6	23,9	18,9	35,9	28,3	24,7
закрита, Пз		42,1	45,7	44,6	40,1	40,2	37,5

Аналіз показників пористості розроблених пінобетонів показав, що із зростанням середньої густини пінобетонів зменшується їх загальна пористість

При цьому при майже незмінній закритій пористості неармованих бетонів (40,1–42,9%) суттєво знижується відкрита. Так, показники відкритої пористості знижуються в 1,8 раз при переході від марки за густиною D600 до D1000. Для пінобетонів, армованих поліпропіленовими волокнами, відкрита пористість у цьому випадку знижується в 1,4 рази.

3.4.2. Міцнісні показники. Структура бетону визначається наявністю пор. З точки зору твердих тіл пори є дефектами структури. Характер пористості визначає основні властивості матеріалу – міцність, стійкість до зовнішніх впливів та довговічність матеріалів. Випробування дослідних зразків розроблених пінобетонів на міцність при стиску проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Випробування зразків пінобетону на міцність при стиску

Як видно з рисунку 3.17, інтенсивний набір міцності пінобетонів відбувається у перші 7 діб, при цьому приріст міцності становить 48–55% міцності у проектному віці. При цьому неармовані пінобетони з маркою за густиною D600 характеризуються міцністю через 28 діб 1,3 МПа у стані природної вологості (15,2 %), з врахуванням коефіцієнта, що враховує вологість, міцність при стиску становить 1,4 МПа, що відповідає класу за міцністю C1.

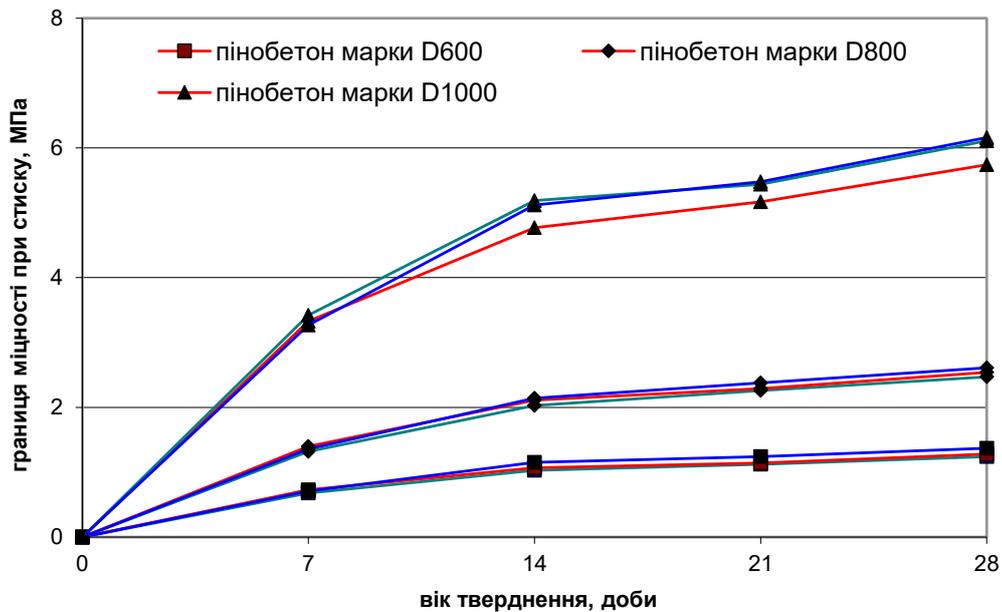


Рисунок 3.17 – Кінетика набору міцності при стиску пінобетону в нормальних умовах

Міцність на стиск пінобетону марки за густиною D800 через 28 діб тверднення та з рахуванням вологості становить 2,6 МПа, що задовольняє вимоги для класу за міцністю С2. Як свідчать результати випробувань, міцність на стиск бетонів марки за густиною D1000 суттєво зростає порівняно з ніздрюватими бетонами марок D600 та D800. Так, міцність на стиск через 28 діб пінобетонів D1000 становить 6,0 МПа і відповідає класу за міцністю С3,5.

Аналіз результатів випробувань пінобетонів, армованих поліпропіленою фіброю, свідчить, що характер кінетики набору їх міцності протягом 28 діб не змінюється порівняно з неармованими пінобетонами (риунок 3.18). Разом з тим, показники міцності дисперсно-армованих пінобетонів перевищують значення міцності неармованих на 10-12% у всі терміни тверднення та для всіх марок за густиною. Введення поліпропіленої фібри забезпечує підвищення міцності на стиск пінобетонів у проектному віці та досягнення показників для класів за міцністю С1,5; С2,0 та С5 для пінобетонів марок за густиною D600, D800 та D1000 відповідно.

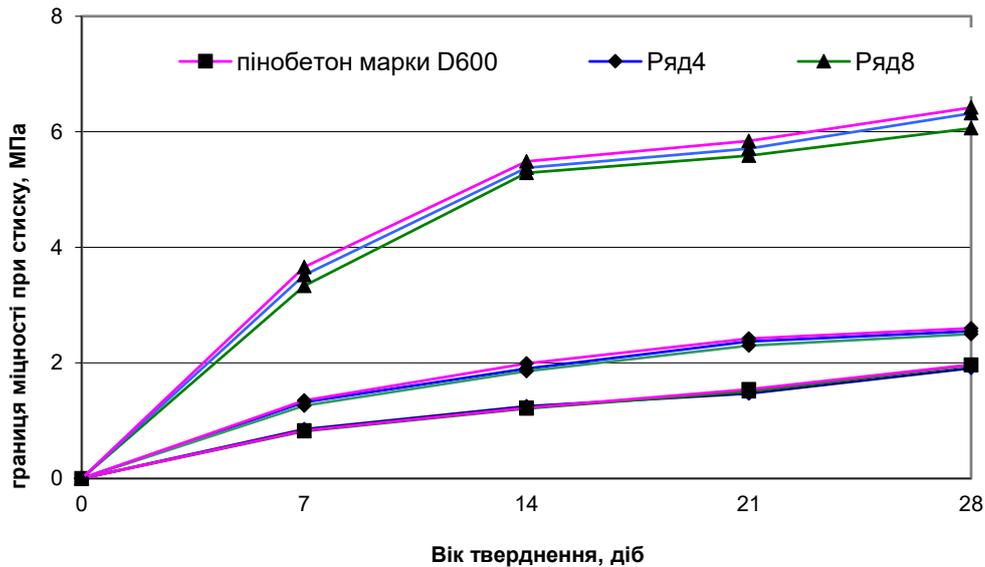


Рисунок 3.18 – Кінетика набору міцності при стиску пінобетону, армованого поліпропіленою фіброю

За результатами проведених досліджень пінобетонів побудовано графічні залежності міцності на стиск від густини ($\rho - f_{c,cube}$) для пінобетонів, армованих та неармованих фіброю, а на рисунку 3.19 наведено порівняння отриманих результатів міцності при стиску зразків з фіброволокнами та без них для досліджуваних марок неавтоклавного пінобетону.

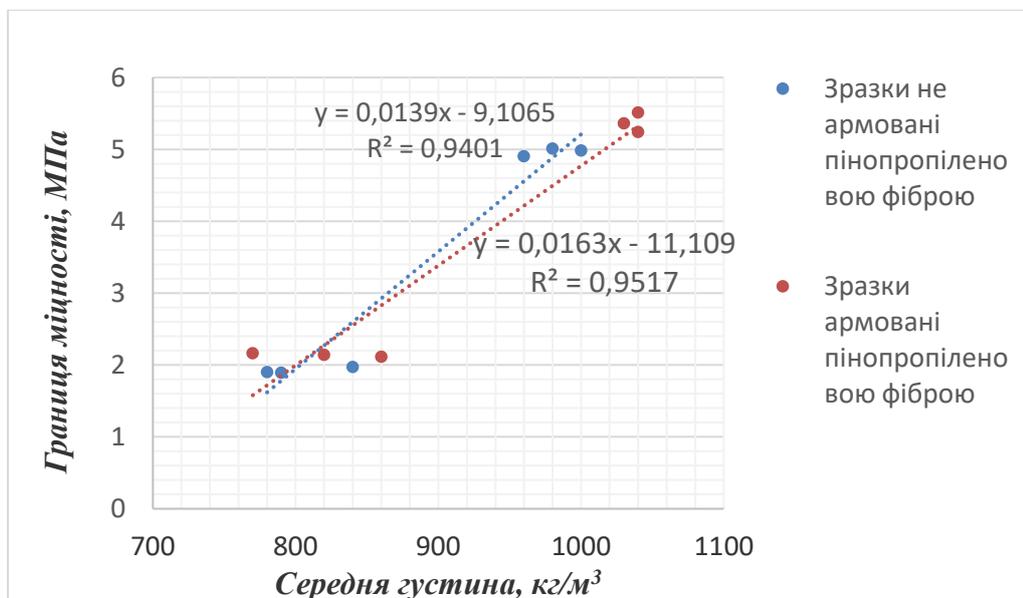


Рисунок 3.19 – Залежність граничної міцності на стиск від середньої густини пінобетону для марок D800 та D1000

Міцність пінобетону зростає по мірі збільшення густини пінобетону. Використовуючи програмний комплекс «Microsoft Excel», проведено апроксимацію за допомогою лінійного ряду. Лінія для армованих зразків проходить вище неармованих, що свідчить про те, що армування неавтоклавного пінобетону поліпропіленовою фіброю дає ефект збільшення міцності на стиск такого пінобетону до 11%. Середньоквадратичне відхилення апроксимації є прийнятним, враховуючи схильність до варіації даних для розглядуваного матеріалу.

Слід відзначити, що при проведенні апроксимації графічні залежності міцності пінобетону, армованого та неармованого поліпропіленовою фіброю, від густини ($\rho - f_{c,cube}$) для марок D600, D800 та D1000 мають вигляд функції степеневого ряду (рисунок 3.20). Середньо квадратичне відхилення апроксимації є прийнятним, враховуючи схильність до варіації даних для розглядуваного матеріалу. При введенні дисперсних волокон спостерігається закономірність більшого приросту міцності для зразків з нижчими значеннями середньої густини. По мірі зростання густини зразків спостерігається зниження ефекту від введення до його складу поліпропіленової фібри [16, 21, 43].

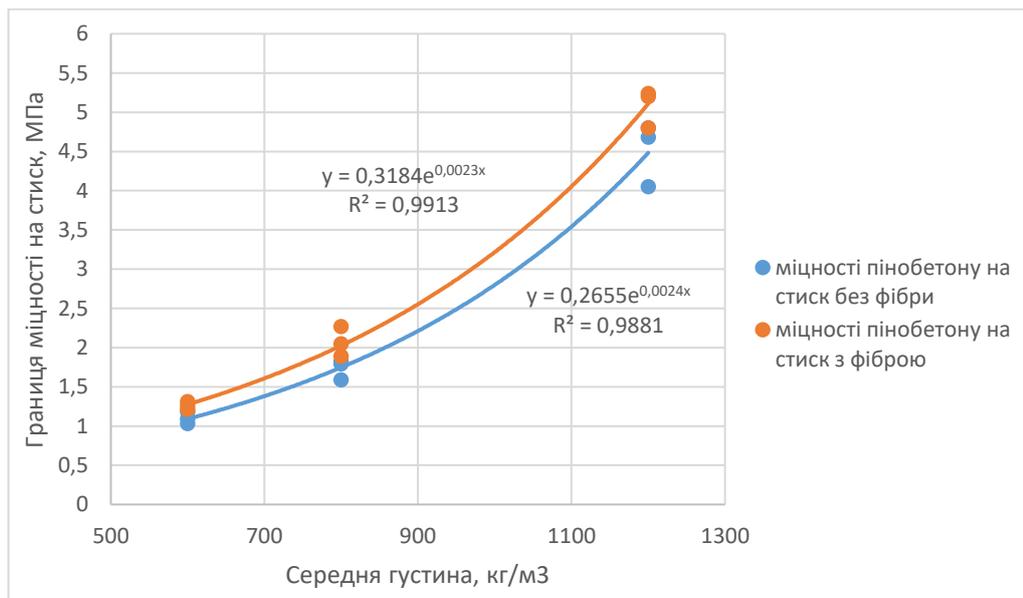


Рисунок 3.20 – Залежність границі міцності на стиск від середньої густини пінобетону для марок D600, D800 та D1000

Як видно з результатів проведених дослідів, введення до складу пінобетонних сумішей волокон поліпропіленової фібри призводить до збільшення міцності дослідних зразків. При цьому змінюється характер їх руйнування для зразків неармованих фіброю характерне крихке руйнування, а для зразків армованих волокнами фібри притаманний пружньо-пластичний характер руйнування.

Для матеріалів дорожнього одягу важливою характеристикою є міцність на розтяг при згині. Для визначення цієї характеристики заформовано серії дослідних зразків-призм пінобетонів з розмірами $150 \times 150 \times 600$ мм. До випробування виконували замірювання геометричних розмірів призм та зважували їх для встановлення їх густини. Руйнівне навантаження фіксували за шкалою преса (рисунок 3.21). Випробування проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009.



Рисунок 3.21 – Випробування зразків на розтяг при згині

Результати випробувань на міцність на розтяг при згині свідчать, що для пінобетонів у перші 7 діб показники міцності досягають 52-53% міцності у віці 28 діб (рисунок 3.22). Пінобетон марки за густиною D600 досягає міцності на розтяг при згині у проектному віці 0,52 МПа. При збільшенні густини пінобетону для марки D800 міцність на розтяг при згині через 28 діб зростає на 26,9%, а при досягненні густини для марки D1000 – на 64,2% порівняно з пінобетоном марки D600.

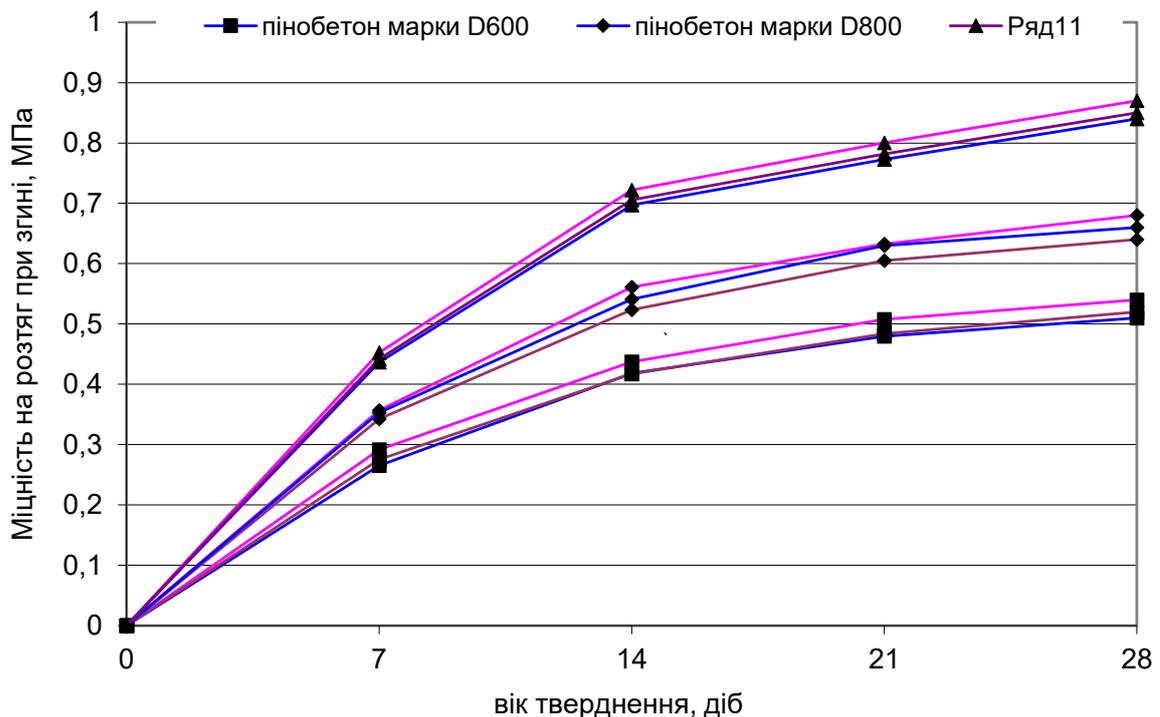


Рисунок 3.22 – Кінетика набору міцності на розтяг при згині пінобетону в нормальних умовах

При дисперсному армуванні поліпропіленою фіброю спостерігається значне зростання міцність на розтяг при згині (рисунок 3.23). Так, для дисперсно-армованого пінобетону марки за густиною D600 міцність зростає в 1,3 рази порівняно з неармованим. Введення дисперсних волокон до складу пінобетону марки за густиною D800 зумовлює зростання міцності на розтяг при згині в 1,6 рази. Пінобетон, армований полвіпропіленою фіброю, марки за густиною D1000 характеризуються зростанням міцності на розтяг при згині в 1,5 рази порівняно з неармованим.

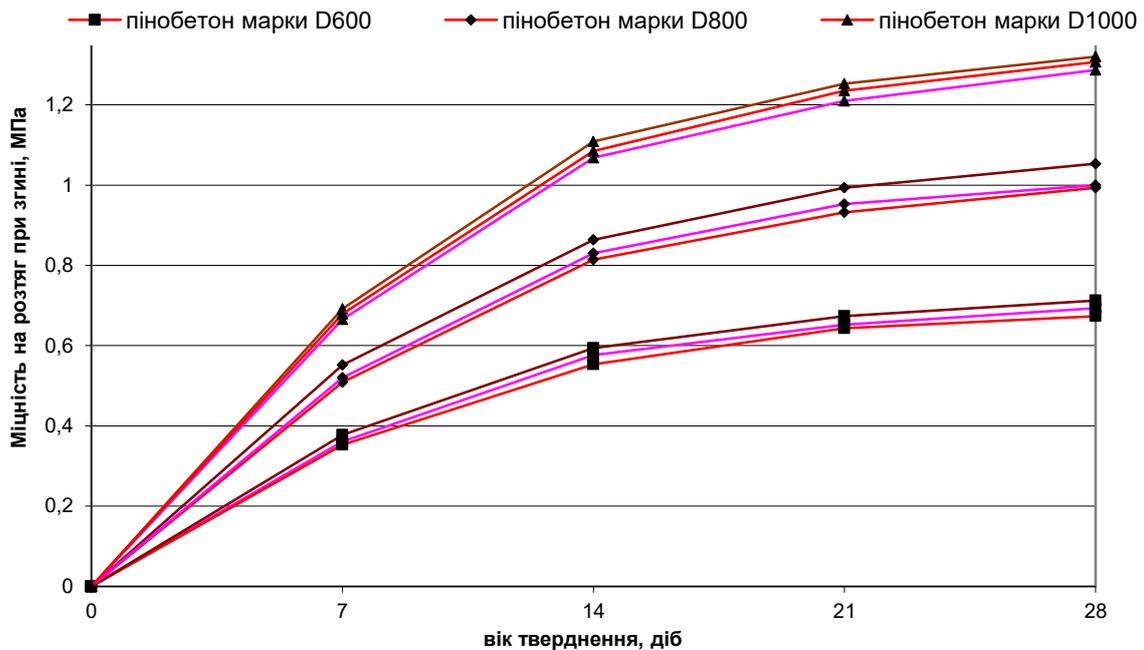


Рисунок 3.23 – Кінетика набору міцності на розтяг при згині пінобетону, армованого поліпропіленою фіброю

За результатами проведених досліджень зразків-призм побудовано графічні залежності міцності пінобетону на розтяг при згині від густини ($\rho - f_{c,tf}$) для зразків армованих та неармованих фіброю (рисунок 3.24). Міцність пінобетону на розтяг при згині зростає по мірі збільшення густини пінобетонних зразків. Використовуючи програмний комплекс «Microsoft Excel», проведено апроксимацію за допомогою степеневого ряду. Лінія для армованих зразків проходить вище неармованих, що свідчить про те, що армування неавтоклавного пінобетону поліпропіленою фіброю дає ефект збільшення міцності на розтяг при згині такого пінобетону. Як видно з результатів випробувань, при введенні до складу пінобетону поліпропіленої фібри міцність на розтяг при згині зростає до 22%. При цьому більший приріст міцності спостерігається у зразків з більшим значеннями середньої густини. Середньо квадратичне відхилення апроксимації є прийнятним, враховуючи схильність до варіації даних для розглядуваного матеріалу [16, 37].

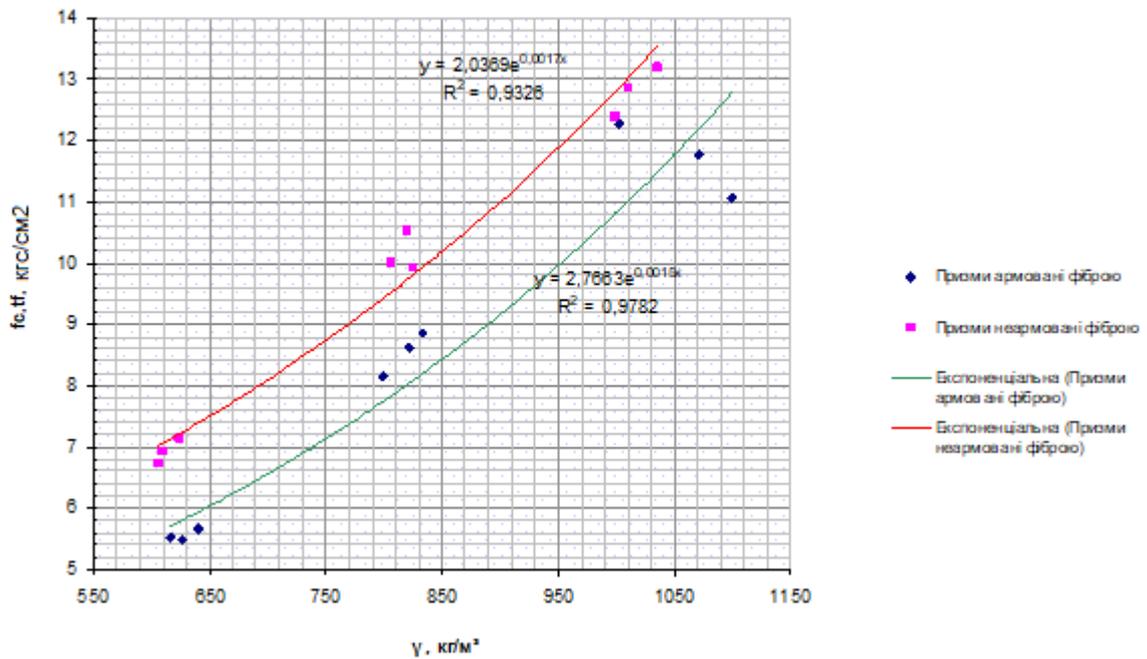


Рисунок 3.24 – Міцність на розтяг при згині пінобетону залежно від густини

Для матеріалів, що працюють в шарах дорожнього одягу суттєве значення має їх водопоглинання. Пінобетони з густиною, що відповідає марці D600, характеризуються водопоглинанням за масою 59,28–57,08 %; тоді як для пінобетонів маркою за густиною D1000 водопоглинання становить 24,99–19,75 мас.%.

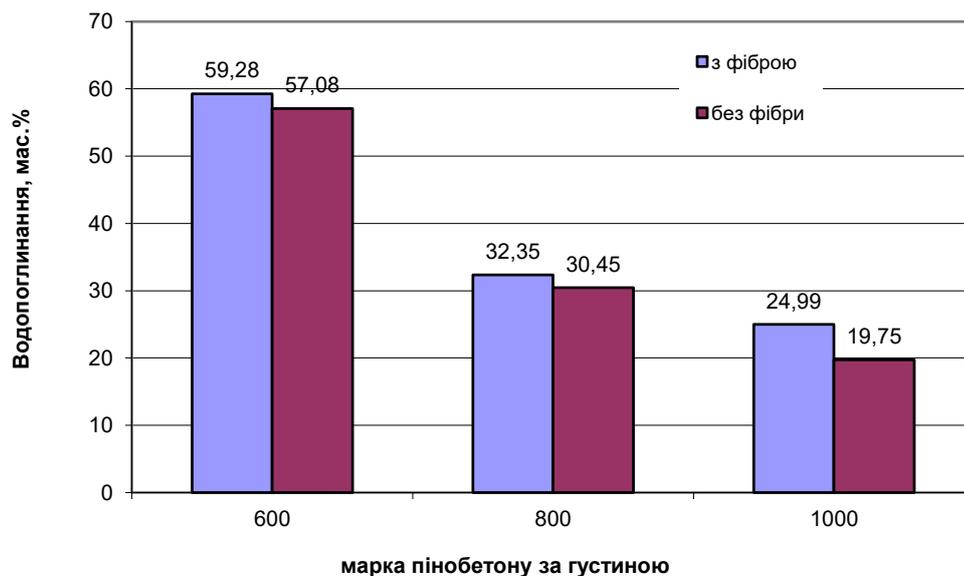


Рисунок 3.25 – Водопоглинання пінобетонів

Підвищені показники пористості та водопоглинання суттєво впливають на міцність пінобетонів. У зв'язку з цим, у роботі проводили випробування міцності водонасичених зразків та встановлення водостійкості розроблених пінобетонів за значеннями коефіцієнтів зниження міцності при насиченні водою (коефіцієнт розм'якшення), що є важливими показниками для матеріалів у конструкціях дорожнього одягу.

Зростання середньої густини пінобетону, армованого дисперсними волокнами, від 600 до 1000 кг/м³ зумовлює підвищення коефіцієнта розм'якшення на 9,9%, що зумовлено зменшенням відкритої пористості та показників водопоглинання на 58,5 %, а також (рисунок 3.26). Так, коефіцієнт розм'якшення для дисперсно-армованих пінобетонів марок за середньою густиною D600, D800 та D1000 становить 0,81; 0,82 та 0,89 відповідно. Як свідчать результати випробувань, введення поліпропіленових волокон до складу розроблених пінобетонів забезпечують допустиму втрату міцності на стиск при повному водонасиченні, що зумовлено тривимірним армуванням структури пористого матеріалу поліпропіленовими волокнами, і класифікуються як водостійкі.

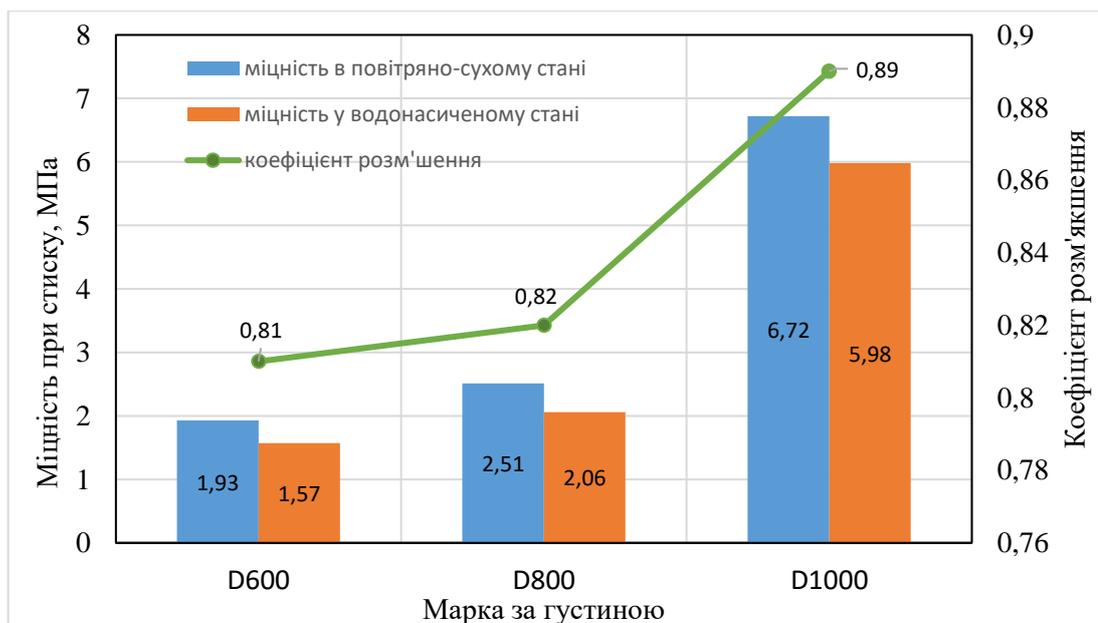


Рисунок 3.26 – Міцність та коефіцієнти розм'якшення дисперсно-армованих пінобетонів

Як показали результати випробувань (рисунок 3.27), міцність на розтяг при згині є чутливішою характеристикою при зміні вологості пористого матеріалу. Так, при зростанні водовмісту матеріалу внаслідок повного водонасичення на 57,1 % для неармованого пінобетону марки за густиною D600 міцність на згин знижується на 25%. У той же час, дисперсне армування поліпропіленою фіброю зумовлює зростання міцності на розтяг при згині як в сухому стані, так і після водонасичення порівняно з неармованим ніздрюватим бетоном. У цьому випадку спостерігається зниження міцності на 20%. Слід відзначити, що зі зростанням густини бетону підвищується його стійкість в умовах, пов'язаних з водонасиченням.

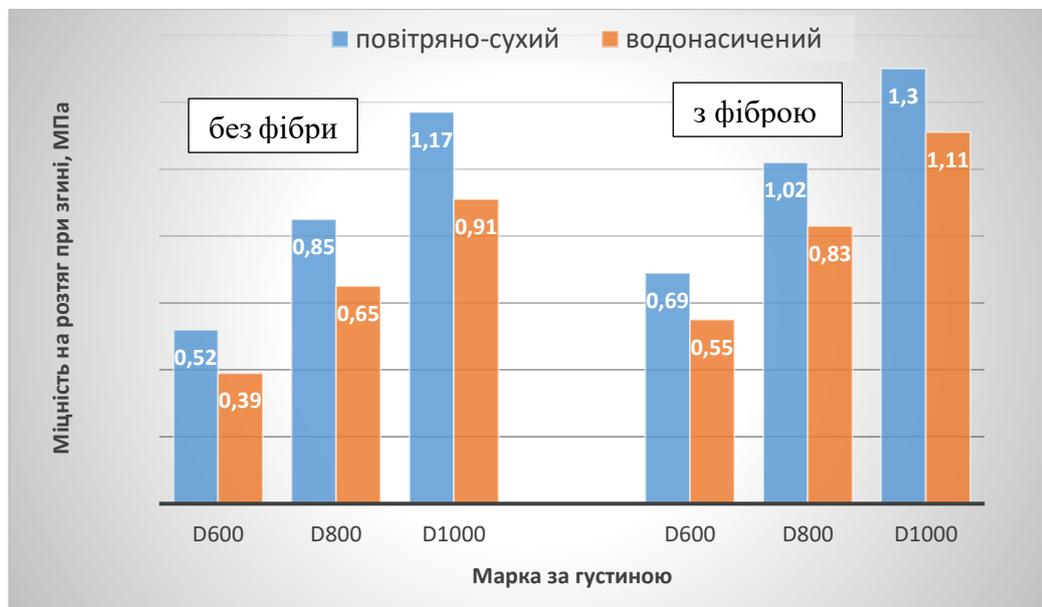


Рисунок 3.27 – Міцність на розтяг при згині від густини пінобетону

За показниками міцності на розтяг при згині розраховано коефіцієнти розм'якшення розроблених пінобетонів (рисунок 3.28). Як свідчать результати випробувань, введення поліпропіленої фібри забезпечує тривимірне зміцнення ніздрюватих бетонів та підвищує його стійкість до дії згинальних навантажень як в нормальних умовах, так і в стані повного водонасичення. Так, для неармованого пінобетону марок за густиною D600 D800 та D1000 коефіцієнт розм'якшення становить 0,75; 0,77 та 0,78 відповідно. При дисперсному

армуванні досягається зростання коефіцієнтів розм'якшення до 0,80; 0,81 та 0,89 відповідно для пінобетонів марок за густиною D600 D800 та D1000.

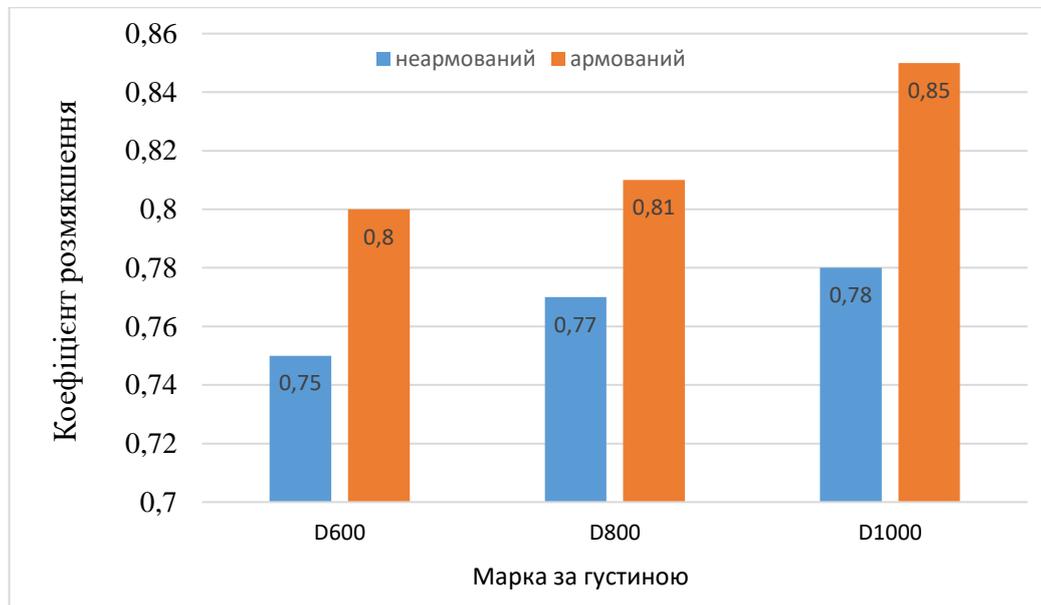


Рисунок 3.28 – Коефіцієнт розм'якшення пінобетонів за результатами випробувань на міцність на розтяг при згині

Розроблені дисперсно-армовані пінобетони характеризуються допустимими показниками зниження міцності при водонасиченні матеріалу порівняно з неармованим ніздрюватим бетоном. Проте з метою забезпечення довговічності та необхідних теплофізичних характеристик фібропінобетонів при їх використанні в якості теплоізоляційного шару дорожніх одягів, рекомендується проведення їх гідроізоляції.

3.4.3. Теплопровідність. Основною теплофізичною характеристикою ефективних конструктивно-теплоізоляційних бетонів є теплопровідність, яка пов'язана з густиною і визначається структурою матеріалу. Основою більшості властивостей таких матеріалів є характеристики матеріалу матриці (каркасу) і пористої структури. Для визначення величини коефіцієнта теплопровідності заформовано серії дослідних зразків пінобетону розмірами 200×200×40 мм. Результати випробувань зразків конструкційно-теплоізоляційного пінобетону на теплопровідність наведено на рисунку 3.29.

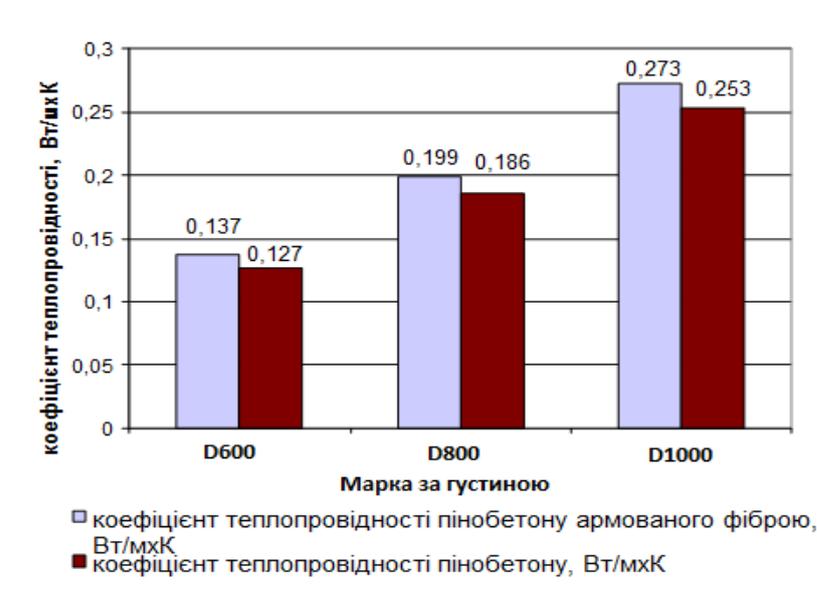


Рисунок 3.29 – Коефіцієнт теплопровідності пінобетонів

Як видно з вище наведеного графіку, при введенні до складу пінобетону поліпропіленової фібри коефіцієнт теплопровідності пінобетонів зростає в середньому на 7%. Незважаючи на незначне підвищення показника теплопровідності, він відповідає допустимим значенням, встановлених ДСТУ Б В.2.7-45-2010 для пінобетонів заданих марок за середньою густиною, і дає змогу використовувати розроблені фібропінобетони для теплоізоляційних шарів дорожніх одягів автомобільних доріг.

3.4.4. Деформативні властивості

3.4.4.1. Деформативні властивості пінобетону без навантаження.

Пінобетони характеризуються значною пористістю та розвиненою міжфазною поверхнею «тверде-повітря», на якій відбувається вологообмін з навколишнім середовищем, в результаті цього вологовіддача проходить інтенсивніше, що зумовлює виникнення деформацій матеріалу при зміні його вологості та може призводити до утворення усадочних тріщин, зниження міцності та експлуатаційних властивостей бетону. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-45:2010 передбачено визначення усадки ніздрюватих бетонів при висиханні (при зниженні його вологості від 35 % до 5 % за масою) з нормуванням для неавтоклавних бетонів 3,0 мм/м. У зв'язку з цим, досліджено деформації усадки

та зміну маси розроблених дисперсно-армованих пінобетонів при висиханні (рисунок 3.30).

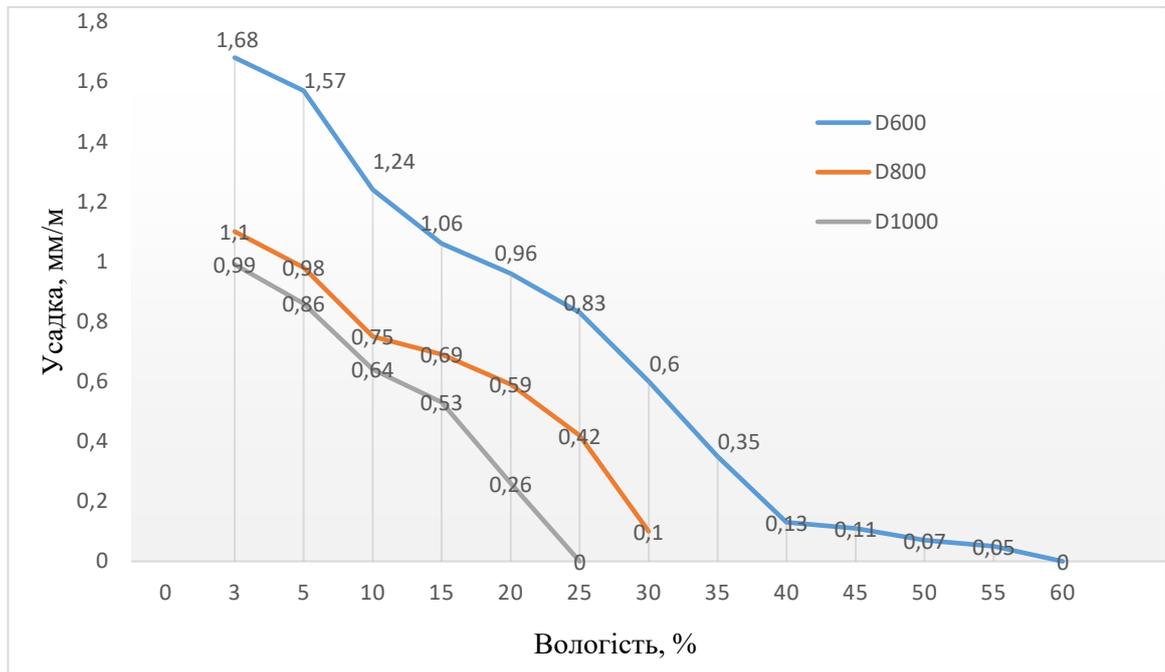


Рисунок 3.30 – Усадка при висиханні дисперсно-армованих пінобетонів

Криві усадочних деформацій при висиханні фібропінобетонів дають змогу встановити величину їх усадки, що відповідає значенням 0,9 мм/м для пінобетону марки D1000; 1,0 мм/м – для D800 і 1,2 мм/м – для D600.

3.4.4.2. Деформативні властивості пінобетону під навантаженням.

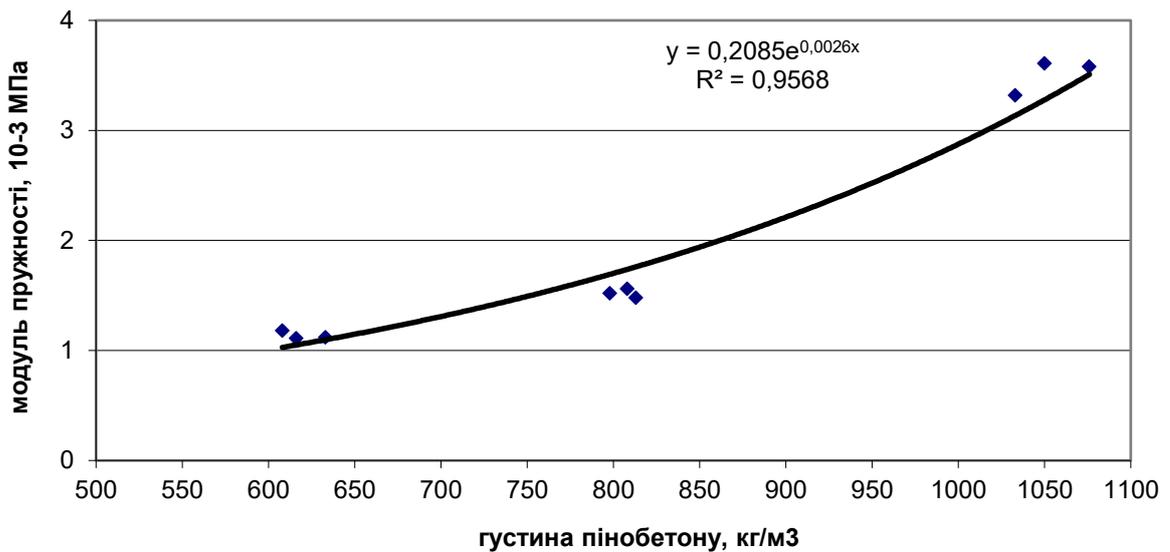
Важливою характеристикою дорожніх будівельних матеріалів є модуль пружності, призмova міцність та коефіцієнт Пуассона. Для визначення модуля пружності заформовано серії дослідних зразків-призм з розмірами 150x150x600 мм. До початку випробувань проведено замірювання геометричних розмірів призм та їх зважування для встановлення фактичної середньої густини. Загальний вигляд процесу випробування наведено на рисунку 3.30.

За результатами випробувань дослідних зразків побудовано графічні залежності модуля пружності пінобетону від густини ($\rho - E_{ст}$) для зразків армованих та неармованих фіброю рисунок 3.31, а також наведено порівняння отриманих результатів модуля пружності зразків з фіброволокнами та без них для досліджуваних марок за густиною неавтоклавного пінобетону.

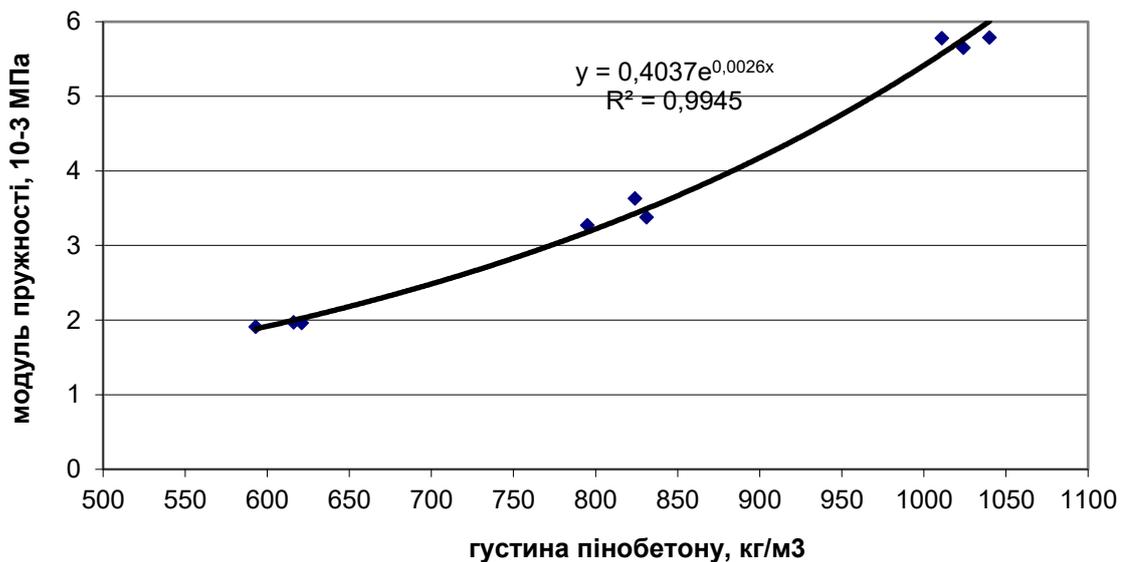


Рисунок 3.31 – Випробування зразків для визначення модуля пружності, призмової міцності та коефіцієнта Пуассона

Модуль пружності пінобетону зростає по мірі збільшення густини пінобетонних зразків. Використовуючи програмний комплекс «Microsoft Excel», проведено апроксимацію за допомогою степеневого ряду. Лінія для армованих зразків проходить вище неармованих, що свідчить про те, що армування неавтоклавного пінобетону волокнами поліпропіленовою фіброю дає ефект збільшення модуля пружності такого пінобетону. Середньоквадратичне відхилення апроксимації є прийнятним, враховуючи схильність до варіації даних для розглядуваного матеріалу. Як видно з результатів випробувань, при введенні до складу дослідних зразків поліпропіленової фібри зростає модуль пружності зростає в 1,6 рази для пінобетону марки за густиною D1000 (рисунок 3.32). Для пінобетонів марки D800 дисперсне армування дозволяє підвищити модуль пружності у 2,3 рази. Введення поліпропіленових волокон до пінобетону марки D600 дає змогу підвищити модуль пружності в 1,7 рази. Значення коефіцієнтів Пуассона становили 0,16; 0,20 та 0,27 відповідно для дисперсно-армованих пінобетонів марок за густиною D600, D800 та D800.



а



б

Рисунок 3.32 – Залежність модуля пружності пінобетону від його густини неармованого (а) та армованого поліпропіленовою фіброю (б)

Модуль пружності дослідних зразків визначали за методикою, що базується на рівності значень модуля пружності бетону при стисканні і розтягу з використанням діаграми залежності «навантаження-деформація». Провівши порівняння отриманих значень модуля пружності за даною методикою та стандартною методикою встановлено, що розбіжність отриманих результатів не перевищує 12%.

За отриманими результатами випробувань дослідних зразків розраховано призову міцність дослідних зразків пінобетону та графічні залежності призової міцності пінобетону від густини ($\rho - f_{c.prism}$) для зразків армованих та неармованих фіброю рисунок 3.33, а також наведено порівняння отриманих результатів призової міцності зразків з фіброволокнами та без них для досліджуваних марок неавтоклавного пінобетону. Як показали результати досліджень, призова міцність дисперсно-армованих пінобетонів через 28 діб досягає 40-60% кубикової. При введенні до складу дослідних зразків поліпропіленової фібри зростає призова міцності на 8-11%.

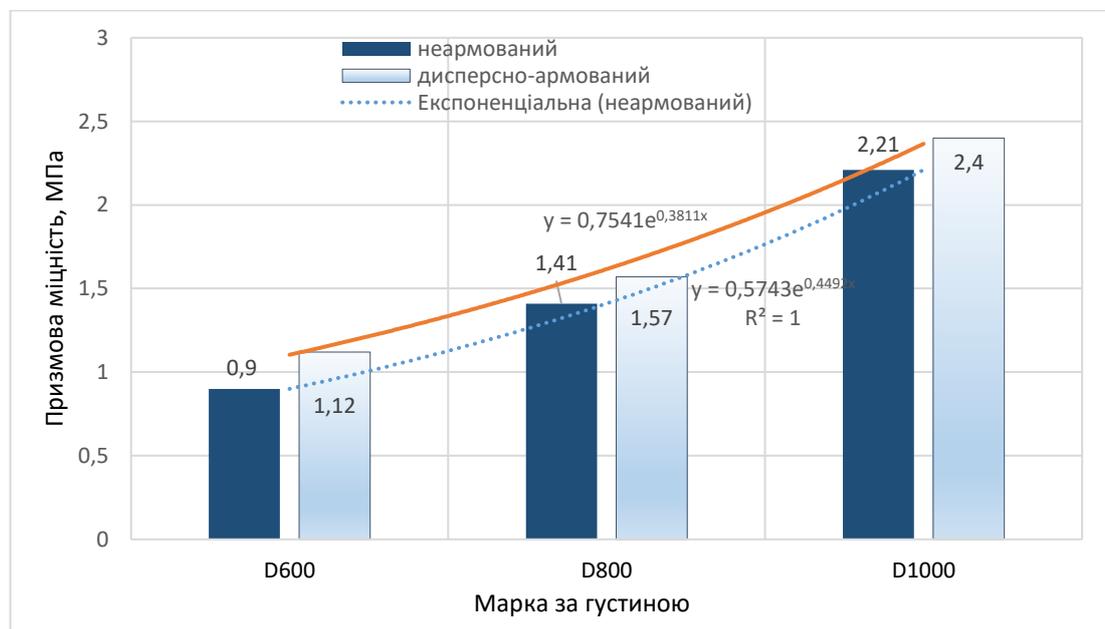
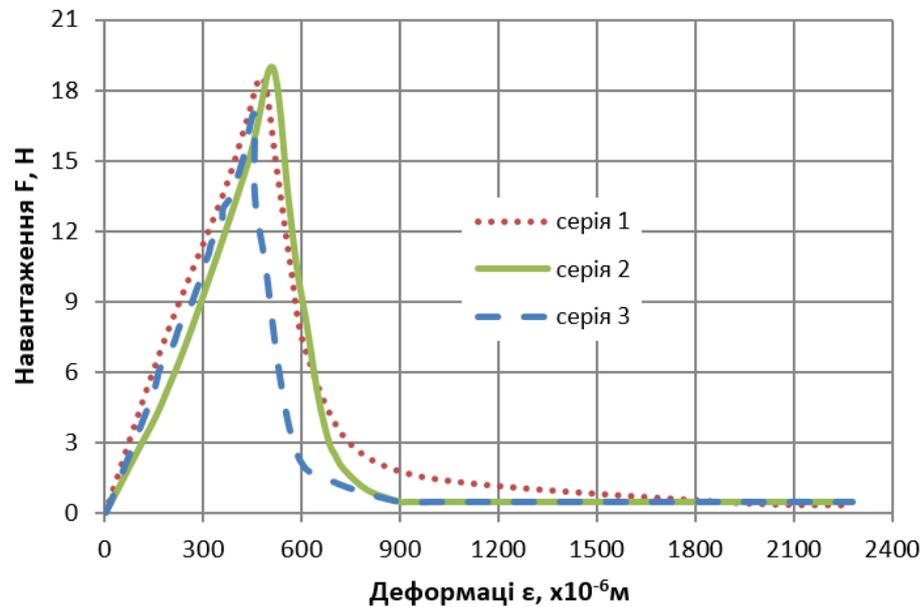


Рисунок 3.33 – Залежність призової міцності пінобетону $f_{c.prism}$ від середньої густини

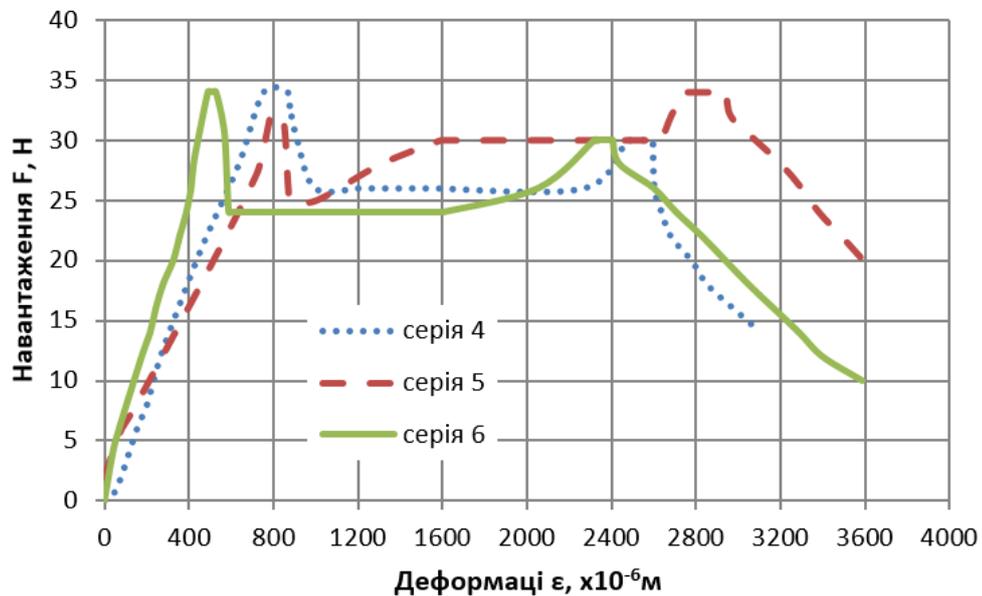
Проведено апроксимацію за допомогою степеневого ряду. Лінія для армованих зразків проходить вище неармованих, що свідчить про те, що армування безавтоклавного пінобетону волокнами поліпропіленовою фіброю дає ефект збільшення призової міцності такого пінобетону. Середньоквадратичне відхилення апроксимації є прийнятним, враховуючи схильність до варіації даних для розглядуваного матеріалу.

За результатами випробувань дослідних зразків пінобетонів марки за густиною D800 побудовано діаграми «навантаження-деформація» розтягнутої

поверхні при визначенні модуля пружності пінобетону. Як видно з кривих (рисунок 3.34, а), величина деформацій до настання критичної точки руйнування коливаються в межах $(430 \div 650) \cdot 10^{-6}$ мм/м.



а



б

Рисунок 3.34 – Діаграма «навантаження-деформація» розтягнутої поверхні пінобетону марки за середньою густиною D800 неармованого (а) та армованого волокнами поліпропіленової фібри (б)

Висхідна крива деформацій, при цьому, має прямолінійну залежність від величини прикладеного навантаження. При досягненні граничного значення прикладеного навантаження спостерігається спад навантаження. При цьому спадна вітка графіка має такий самий характер і прямопропорційну залежність від величини навантаження, як і висхідна вітка.

Характер деформацій зразків пінобетону, армованих волокнами поліпропіленової фібри, відрізняється від дослідних зразків, у складі яких не використовувались волокна фібри. Максимальна величина деформацій до настання критичної точки руйнування коливаються в межах 1600÷2940 мм/м і настає на другому піку навантаження (рисунок 3.34, б). Спадна вітка графіку при цьому не має прямо пропорційної залежності від величини прикладеного навантаження. В цілому, величина граничних деформацій дослідних зразків пінобетону армованого волокнами поліпропіленової фібри в 3,7–4,5 рази вища, порівняно з деформаціями зразків без волокон фібри.

3.4.5. Випробування тріщиностійкості пінобетонів. Випробування тріщиностійкості розроблених пінобетонів проводили згідно з методикою згідно з ДСТУ Б В.2.7-227:2009 через 28 діб тверднення за схемою триточкового згину призм з початковим надрізом (тріщиною нормального відриву висотою 40 мм та шириною 2 мм) з контрольованим режимом їх руйнування [23, 45, 48, 49, 123].

Характеристики тріщиностійкості пінобетонів визначали при рівноважних механічних випробуваннях із записом повної діаграми навантаження–прогин ($F-V$). Повністю рівноважні діаграми деформування дослідних зразків пінобетонів з середньою густиною, що відповідає маркам D600, D 800 та D1000, наведено на рисунках 3.35–3.37.

Значення силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості дослідних зразків пінобетону наведено в таблиці 3.7. Як видно з повністю рівноважних діаграм деформування пінобетону, граничні навантаження, при яких відбувається руйнування зразків, вищі при введенні до складу пінобетону волокон фібри. Зокрема для пінобетону марки D600 ці значення в 1,53 рази вищі,

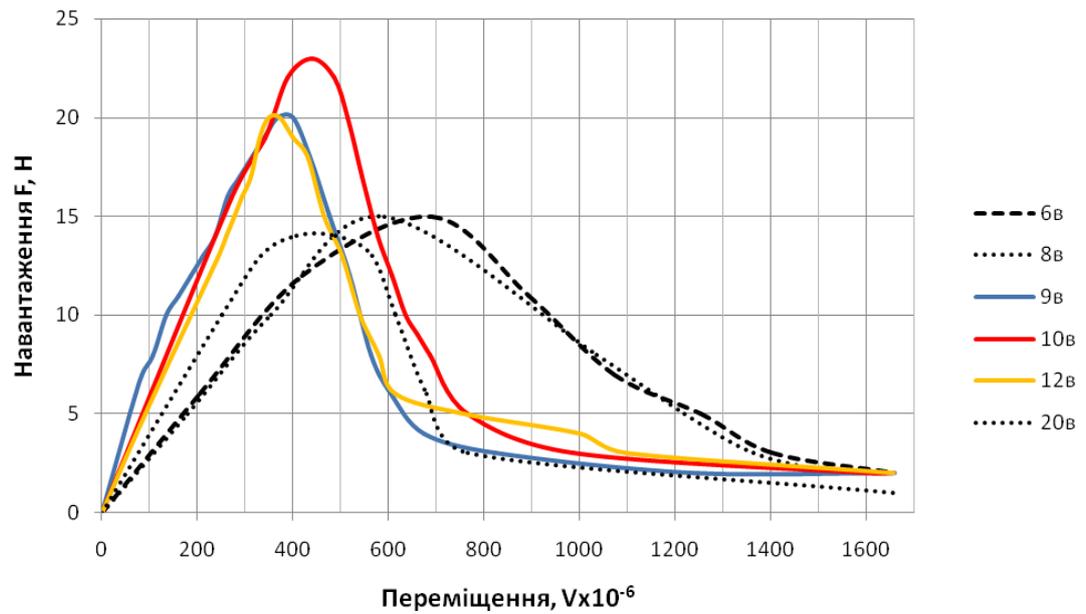


Рисунок 3.35 – Діаграма деформування пінобетону марки D600:
6в, 8в, 20в – пінобетон без фібри; 9в, 10в, 12в – пінобетон, армований фіброю

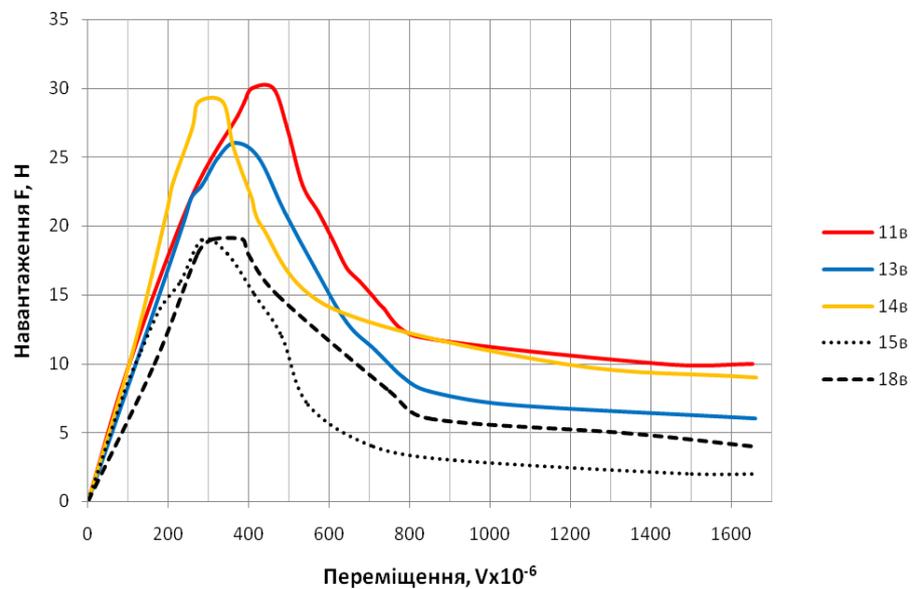


Рисунок 3.36 – Діаграма деформування пінобетону марки D800:
15в, 18в – пінобетон без фібри; 11в, 13в, 14в – пінобетон, армований фіброю

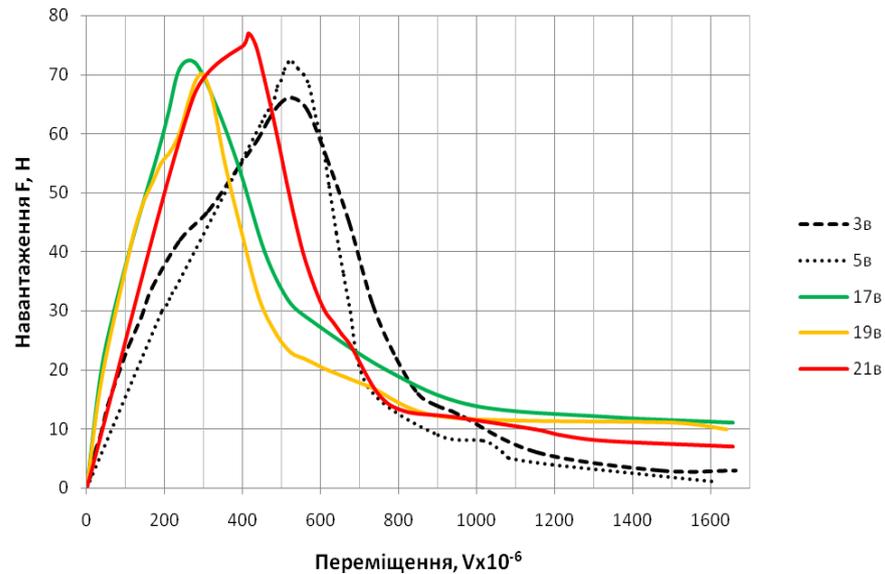


Рисунок 3.37 – Діаграма деформування пінобетону марки D1000:

3в, 5в – пінобетон без фібри; 17в, 19в, 21в – пінобетон, армований фіброю

для пінобетону марки D800 ці значення в 1,58 рази вищі, а для пінобетону марки D1000 – в 1,17 рази вищі. Граничні деформації, при яких відбувається дефрагментація зразків перевищують 1600×10^{-6} м та приблизно однакові для усіх зразків.

Аналіз докритичної та закритичної стадій руйнування пінобетону показав перевагу пінобетону, армованого фіброю. Так, значення енерговитрат на пружне деформування (W_e) та загальних енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (W_i) в середньому у 1,39 рази перевищують показники неармованого пінобетону (таблиця 3.7). Позитивний та головний армувальний ефект від введення поліпропіленової фібри спостерігався в закритичній стадії руйнування [12, 22, 23].

При цьому фібра стримує процес руйнування зразків з моменту розвитку магістральної тріщини (моменту, коли вже прикладено максимальне руйнівне навантаження) і до повної його дефрагментації. Показник, що характеризує даний ефект, – питомі енерговитрати на статичне руйнування, G_F є вищим у всіх серіях з дисперсним армуванням, на відмінну від неармованих пінобетонів.

Таблиця 3.7 – Силлові та енергетичні характеристики тріщиностійкості пінобетонів

Позначення зразка	$W_m \cdot 10^{-2}$, Н·м	$W_e \cdot 10^{-2}$, Н·м	$W_i \cdot 10^{-2}$, Н·м	$W_L \cdot 10^{-2}$, Н·м	$W_{ш} \cdot 10^{-2}$, Н·м	$W_{CE} \cdot 10^{-2}$, Н·м	G_i , Дж/м ²	G_F , Дж/м ²	G_{CE} , Дж/м ²	J_i , Дж/м ²	K_i , МПа·м ^{1/2}	K_c , МПа·м ^{1/2}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Пінобетон марки D1000</i>												
неармований	4,26	13,66	17,93	17,60	6,77	1,61	29,87	52,11	2,68	18,6	0,12	0,04
армований	10,25	6,42	16,77	25,62	3,18	7,25	27,78	53,40	12,08	22,48	0,18	0,11
<i>Пінобетон марки D800</i>												
неармований	1,20	3,62	3,72	9,84	1,43	1,07	6,21	21,22	1,78	3,82	0,03	0,02
армований	1,08	13,38	14,46	15,32	6,63	0,00	24,10	33,25	0,00	13,05	0,03	0,03
<i>Пінобетон марки D600</i>												
неармований	1,25	2,53	3,78	4,84	1,25	0,76	6,30	12,29	1,27	4,21	0,03	0,01
армований	4,55	4,01	8,56	6,29	1,99	0,00	14,26	16,75	0,00	10,95	0,03	0,01

Найефективніше це проявляється у ніздрюватих бетонах з густиною 800 кг/м³, для яких питомі енерговитрати на статичне руйнування в 1,8 рази вищі на відміну від неармованих бетонів. Для дисперсно-армованих пінобетонів марок за густиною D600 та D1000 ці показники також мають вищі значення порівняно з неармованими пінобетонами, але відмінність у значеннях є дещо меншою.

Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, який характеризує в'язкість руйнування, K_i , для дисперсно-армованих бетонів марок за густиною D600, D800 та D1000 характеризується вищими показниками за аналогічні показники неармованих пінобетонів відповідно в 1,7, 1,5 та 1,04 рази.

Армування пінобетону волокнами поліпропіленової фібри сприяє підвищенню тріщиностійкості, зростанню статичних критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень, що дає змогу витримувати вищі навантаження до моменту поширення макротріщини, підвищує ефективність роботи пінобетону в закритичній стадії руйнування та є важливим фактором при застосуванні розроблених бетонів як шарів дорожнього одягу автомобільних доріг.

3.4.6. Морозостійкість. Морозостійкість пінобетонів є мірою їх довговічності. Необхідна довговічність бетонів забезпечується проектуванням оптимальної структури, складу та технології виготовлення [3]. З метою визначення морозостійкості проведено дослідження впливу поперемінного заморожування та відтавання на міцність розроблених дисперсно-армованих бетонів за методикою згідно з ДСТУ Б В.2.7-45:2010. Для встановлення марки за морозостійкістю випробування міцності проводили через проміжну та задану кількість циклів (таблиця 3.8).

Для дисперсно-армованих пінобетонів марки за густиною D600 міцність на стиск через 10 циклів поперемінного заморожування та відтавання знижується на 5,9%. При продовженні випробувань через 15 циклів зниження міцності становить 11,7%, а через 25 – 23,5%, що відповідає марці за морозостійкістю F15.

Таблиця 3.8 – Морозостійкість пінобетонів, армовані дисперсними волокнами

Марка за густиною	Міцність на стиск зразків, МПа/втрата міцності, %					Марка за морозостійкістю
	Основних	Контрольних після циклів заморожування-відтавання				
		10	15	25	35	
D600	1,7	1,6/5,9	1,5/11,7	1,3/23,5	–	F15
D800	2,9	2,8/3,4	2,7/6,9	2,5/13,8	–	F25
D1000	6,1	–	5,9/3,3	5,5/9,8	5,3/13,1	F35

При випробуванні контрольних зразків пінобетонів марки D800 після 15 циклів їх міцність зменшується на 6,9%, тоді як після 25 циклів – на 13,8% і задовольняє вимоги для марки за морозостійкістю F25. Результати випробувань пінобетонів, армованих поліпропіленовими волокнами, марки за густиною D1000 свідчать про підвищення їх стійкості щодо поперемінного заморожування-відтавання, і допустиме зниження міцності спостерігається після 25 циклів, що задовольняє вимоги для марки F35.

Висновки до розділу

1. Результати впливу довжини поліпропіленової фібри на міцність цементного тіста показали, що найвищими показниками міцності на стиск та згин характеризуються зразки, армовані дисперсним волокном довжиною 12 мм (міцність на стиск зростає на 6–12% у всі терміни тверднення, міцність на згин зростає на 12,0–20,5 %). Введення поліпропіленової фібри довжиною 18 мм призводить до деякого зниження міцності при стиску цементного каменю, що зумовлено неоднорідністю розподілення фібри в об'ємі матеріалу. Підвищення ступеня армування до 0,3 мас.% матеріалу також призводить до утворення в

ньому комкуватих включень, які спричиняють створення нерівномірної структури, в результаті чого знижуються показники міцності на стиск і згин.

2. Дослідженнями рухливості, що введення волокон поліпропіленової фібри довжиною 6 мм спричиняє зниження рухливості розчинової суміші від 300 до 290 мм, збільшення довжини фібри до 18 мм спричиняє зменшення розпливу до 270 мм, використання фібри довжиною волокон 18 мм зумовлює зменшення розпливу до 255 мм. При дослідженні густини дисперсно-армованих бетонів показано, що зростання вмісту волокон спричиняє збільшення їх середньої густини, що зумовлено зменшенням стійкості піни при зростанні вмісту дисперсної фази. Так, введення 0,2 мас.% фібри довжиною 6 мм в склад пінобетонної суміші спричиняє зростання густини від 630 до 635 кг/м³, у той час, як збільшення довжини волокна до 18 мм зумовлює зростання густини до 650 кг/м³. Збільшення густини та дисперсне армування призводить до зростання міцності як на стиск, так і на згин пінобетонів.

3. Показано, що з зростанням крупності заповнювача знижується рухливість, що спричиняється підвищенням жорсткості суміші. Так, суміш з використанням жовківського піску ($M_{кр}=1,8$) становить 280 мм, у той час як використання ясинецького піску забезпечує одержання пінобетонної суміші з рухливістю 300 мм. При цьому середня густина бетону становить 630 кг/м³. Ніздрюватий бетон на основі жовківського піску характеризується підвищенням середньої густини до 720 кг/м³, що відповідає класу за середньою густиною D700.

4. Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дозволяють визначити оптимальне співвідношення рецептурних факторів для одержання необхідної рухливості дисперсно-армованих ніздрюватих конструкційно-теплоізоляційних бетонів з необхідною міцністю на згин та стиск, а також середньої густини. Так, використання 1,5 кг фібри на 1 м³ пінобетонної суміші при відношенні заповнювача 0,5 або 0,75 кг фібри на 1 м³ пінобетонної суміші при відношенні заповнювача 0,3 забезпечує одержання

екстремумів значень міцності на стиск (1,6–2,2 МПа), що задовольняє вимоги стандарту для густини D600.

5. Методами фізико-хімічного аналізу встановлено, що високі показники міцності на стиск та згин дисперсно-армованих ніздрюватих бетонів забезпечуються за рахунок направленою формування мікроструктури цементуючої матриці з утворенням гідратних новоутворень, ущільнення цементного каменю внаслідок кольматації пор гідросилікатами і гідроалюмінатами кальцію, а також спільної ефективної роботи поліпропіленової фібри та цементної матриці.

6. На основі експериментально-статистичних моделей запроєктовано ефективні склади дисперсно-армованих конструктивно-теплоізоляційних пінобетонів за критеріями рухливості, середньої густини, міцності на стиск та згин. Отримані ніздрюваті бетони характеризуються середньою густиною для марок D600, D800 та D1000 та класом за міцністю C1,5; C2 та C5 відповідно. Міцність на розтяг при згині при дисперсному армуванні пінобетонів зростає у 1,3–1,6 рази порівняно з нермованими.

7. Розроблені фібропінобетони марок за густиною D600, D800 та D1000 характеризуються водопоглинанням 59,3–25,0 мас.%, при цьому коефіцієнт розм'якшення становить 0,81–0,89 при випробуванні міцності на стиск та 0,80–0,85 при випробуванні міцності на розтяг при згині. Дисперсне армування пінобетонів забезпечує досягнення деформацій усадки при висиханні на рівні 0,9–1,2 мм/м, що відповідає допустимим значенням для неавтоклавних ніздрюватих бетонів.

8. Дослідженнями деформативних властивостей розроблених пінобетонів під навантаженням встановлено, що модуль пружності фібропінобетону зростає від 1,2–3,4 ГПа до 1,7–6,0 ГПа, порівняно із неармованим пінобетоном залежно від густини. Призмova міцність пінобетонів при введенні поліпропіленової фібри зростає на 8–11% і досягає 40-60% кубикової. Встановлено, що дисперсне армування забезпечує зростання напруження σ при сталому значенні відносних деформацій дисперсно-армованих ніздрюватих бетонів. Так, при введенні

0,2 мас.% поліпропіленової фібри при значенні відносних деформацій $\varepsilon=(2-3)\cdot 10^{-5}$ м забезпечується збільшення напруження σ на 7,3–10,1% порівняно з бетонами без фібри.

9. Аналізом силових та енергетичних показників тріщиностійкості за методами і критеріями механіки руйнування встановлено, що за показниками енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (W_L) та питомих ефективних витрат енергії на статичне руйнування (G_F) дисперсно-армовані пінобетони перевищують аналогічні показники для неармованих бетонів у 1,5–1,8 рази. Аналіз докритичної та закритичної стадій руйнування пінобетону показує перевагу пінобетону армованого фіброю: значення енерговитрат на пружне деформування (W_e) та загальних енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (W_i) у 1,39 рази перевищують показники неармованого пінобетону.

10. Проведено оцінку морозостійкості розроблених дисперсно-армованих пінобетонів марок за густиною D600, D800 та D1000. Показано, що за показниками допустимого зниження міцності (не більше 15%) розроблені ніздрюваті бетони характеризуються марками за морозостійкістю F15, F25 та F35 відповідно для марок за густиною D600, D800 та D1000.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВЕЛИЧИНИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО ПРОШАРКУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ З ДИСПЕРСНО-АРМОВАНОГО ПІНОБЕТОНУ

4.1. Алгоритм розрахунку товщини теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу з конструктивно-теплоізоляційного пінобетону

На основі аналізу стандартних методик та розрахункових способів визначення товщини теплоізоляційного шару дорожнього одягу слід констатувати факт, що це громіздкий алгоритм, який чисельно сформулювати однозначно важко. На сьогоднішній день існує кілька основних методик розрахунку товщини теплоізоляційних прошарків дорожніх одягів:

- методика проф. В.І. Рувінського базується на визначенні термічного опору конструктиву дорожнього одягу (застосовується при розрахунку дорожньої конструкції в країнах СНД);
- методика проф. І.А. Золотаря ґрунтується на використанні в якості характеристики ґрунту коефіцієнту вологопровідності, який визначається експериментально-дослідним шляхом (допускається застосовувати при розрахунку конструкцій дорожнього одягу в країнах СНД та Україні);
- методика Н.А. Пузакова і М.Б. Корсунського, в основі якої закладені кліматичні характеристики конкретного регіону країни (критерії зимового вологонакопичення під дорожнім одягом і зимового морозного здимання) рекомендована до використання в Україні нормативним документом ВБН В.2.3.-218-186-2004). Дана методика в своєму початковому вигляді вимагає значної кількості додаткових розрахунків, тому для полегшення механізму розрахунку нормами рекомендовано використовувати номограму М.Б. Корсунського;

- методика В.М. Сіденка заснована на розрахунку дорожнього одягу за термічним опором з врахуванням розрахункової температури повітря та глибини нульових амплітуд температур (дана методика не знайшла широкого застосування, оскільки вимагає значної кількості спеціальних параметрів, які не завжди наведені в достатній кількості у нормативній літературі);
- методика Н.В. Орнатовського, яка заснована на врахуванні глибини промерзання ґрунту та емпірично визначених коефіцієнтах. Суть цієї методики полягає у вирівнюванні границь промерзання земляного полотна під проїжджою частиною дорожнього одягу і тротуаром (узбіччям).

Наведений в діючих будівельних нормах України розрахунок конструкції дорожнього одягу на морозостійкість має на меті забезпечення ефекту необхідної витривалості дорожнього покриття проти порушення стійкості при нерівномірному набуханні ґрунтів земляного полотна, тобто недопущення появи деформацій від морозного здимання, які можуть перевищувати гранично допустимі розрахункові параметри. Але даний алгоритм розрахунку не враховує фактичних теплотехнічних характеристик використовуваних будівельних матеріалів, що застосовуються в конструкції дорожнього одягу. Натомість, при цьому методикою рекомендується застосовувати в розрахунку еквівалент теплотехнічних властивостей матеріалів дорожнього одягу. Такий метод розрахунку є морально застарілим та малоефективним тому, що не відображає реальних теплофізичних характеристик новітніх будівельно-дорожніх матеріалів, які можуть бути застосовані для влаштування теплоізоляційного шару дорожнього одягу в сучасних проектних рішеннях автомобільних доріг. Тому більш доцільно використовувати при розрахунку дорожнього одягу на морозостійкість методику, запропоновану проф. В.І. Рувінським.

Дана методика вимагає дані приведенного розрахункового чи фактичного термічного опору теплопередачі ґрунтів для кожної конкретної місцевості.

Для запровадження даної методики розрахунку конструкції дорожнього одягу у проектну практику проектування автомобільних доріг в Україні

необхідно, в першу чергу, визначити необхідні показники термічного опору для кожного з кліматичних районів по регіонах України. Для визначення даного розрахункового параметру необхідно взяти за основу базові закони тепломасообміну в диференціальному та аналітичному (з метою отримання конкретних значень) вигляді.

В загальному, ефект промерзання конструкції дорожнього одягу та земляного полотна під ним характеризується закономірностями (рівняння теплопровідності Фур'є – рівняння, що визначає закон зміни температури з часом при теплопередачі через теплопровідність)

$$c \frac{dT(r)}{dt} = -\nabla q(r) + S(r), \quad (4.1)$$

де c — питома теплоємність, q — тепловий потік, S — джерело тепла.

У випадку, коли тепловий потік пропорційний градієнту температури (закон Фур'є) має наступний вигляд:

$$q = -k\nabla T, \quad (4.2)$$

де q - потік тепла, T - температура, а k - певний коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт теплопередачі).

Таким чином, закон теплопровідності набирає форми:

$$c \frac{dT}{dt} = k\nabla^2 T + S \quad (4.3)$$

Звідси теплопровідність є функцією від часу t , температури T і коефіцієнту пропорційності k :

$$q = f(t, T, K) \quad (4.4)$$

Коефіцієнт пропорційності k або коефіцієнт теплопередачі рівний

$$k = \frac{\lambda F}{\delta}, \quad (4.5)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності,

F – площа, через яку проходить тепловий потік,

δ – товщина матеріалу, через який проходить тепловий потік.

Тоді диференційне рівняння теплопровідності матиме такий аналітичний вигляд:

$$Q = \frac{\lambda F}{\delta} \times \Delta t = \frac{\lambda F}{\delta} (t_m - t_x), \quad (4.6)$$

де Δt – різниця температур,

t_r – температура теплої зони (поверхні),

t_x – температура холодної зони(поверхні).

У випадку дорожнього одягу за різницю температур необхідно брати різницю між температурою найхолоднішої п'ятиденки для даного регіону і температурою під конструкцією дорожнього одягу.

Якщо термічний опір R визначати як величину обернену до коефіцієнта теплопередачі k , тобто $R = 1/k$, а площу передачі тепла прийняти рівною 1 м^2 , то рівняння для теплового потоку можна записати наступним чином:

$$q = k(t_m - t_x) = \frac{t_m - t_x}{R}, \quad (4.7)$$

В свою чергу, термічний опір для одношарової конструкції визначається за формулою:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (4.8)$$

Оскільки конструкція дорожнього одягу – це багатошарова конструкція, то термічний опір слід визначати за такою формулою:

$$R = \frac{1}{\alpha} + \sum R_i = \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \dots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.9)$$

Таким чином, загальний вираз для теплового потоку, що проходить через конструкцію площею F за одиницю часу τ можна представити у вигляді:

$$q = \frac{t_m - t_x}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \dots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (4.10)$$

Якщо розглядати конструкцію дорожнього одягу в умовах експлуатації, то його термічний опір слід розглядати як функцію від товщини матеріалу δ , вологості W , температури матеріалу t і густини матеріалу ρ , тобто:

$$R = f(\delta, \lambda) = f(\delta, W, t, \rho), \quad (4.11)$$

Оскільки рівняння теплопровідності виведене на основі загальних законів фізики, то воно описує теплопровідність в загальному вигляді. Тому для

отримання математичного результату необхідно з загальної кількості процесів виділити необхідний (характерний для конструкції дорожнього одягу). Для цього застосуємо умови однозначності (граничні умови).

Рівняння теплового потоку в загальному вигляді має вигляд:

$$q = k(t_m - t_x) = \frac{t_m - t_x}{R}, \quad (4.12)$$

Розглянемо дві схеми дорожнього одягу (рисунок 4.1). Перша схема дорожнього одягу характеризується певною кількістю шарів (три) і має термічний опір теплопередачі R_1 . Друга схема дорожнього одягу складається з інших матеріалів та має іншу кількість шарів (чотири) і для неї характерний опір теплопередачі R_2 . При цьому для обох конструкцій дорожнього одягу температура зовнішнього повітря становить t_x , а температура під дорожньою конструкцією становить t_r .

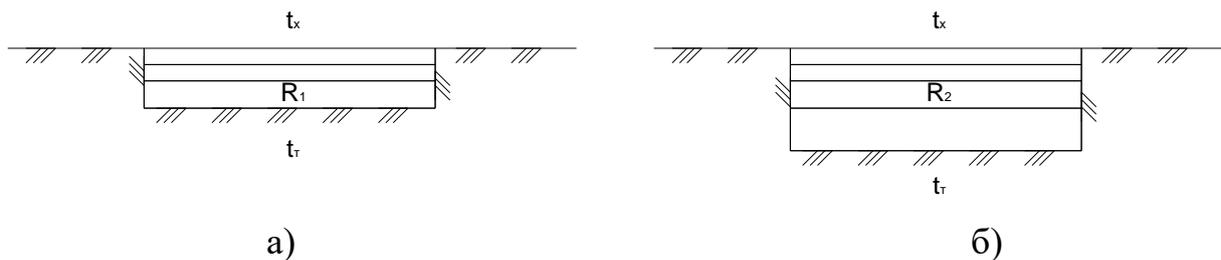


Рисунок 4.1 – Схема двох конструкцій дорожнього одягу з однаковими значеннями температур на поверхні кожного з конструктивів та різними значеннями опору теплопередачі конструктиву (а, б)

Отже, тепловий потік, що проходить через ці конструкції становить:

$$q_1 = \frac{t_m - t_x}{R_1}, \quad (4.13)$$

$$q_2 = \frac{t_m - t_x}{R_2}, \quad (4.14)$$

Провівши прості математичні перетворення отримаємо наступний вигляд:

$$q_1 R_1 = t_m - t_x, \quad (4.15)$$

$$q_2 R_2 = t_m - t_x, \quad (4.16)$$

Таким чином:

$$t_m - t_x = q_1 R_1 = q_2 R_2, \quad (4.17)$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (4.18)$$

Отже, теплові потоки, які проходять через різні конструкції при однаковій різниці температур обернено пропорційні термічному опору теплопередачі цих конструкцій.

Якщо різні конструкції дорожнього одягу мають однаковий опір теплопередачі та однакову зовнішню температуру, а температура від дорожнім одягом різна (рисунок 4.2), то отримаємо:

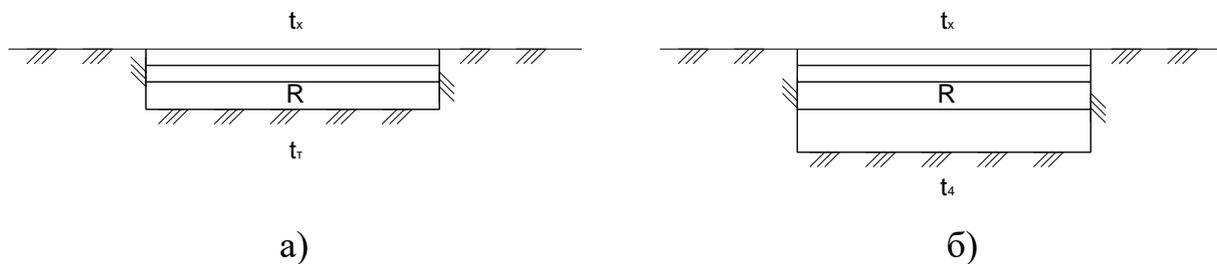


Рисунок 4.2 – Схема двох конструкцій дорожнього одягу з різними значеннями температур на поверхні кожного з конструктивів та різними значеннями опору теплопередачі конструктиву (а, б)

при умові $R = \text{const}$

$$q_1 = \frac{t_m - t_x}{\text{const}}, \quad (4.19)$$

$$q_2 = \frac{t_4 - t_x}{\text{const}}, \quad (4.20)$$

$$\text{const} = \frac{t_m - t_x}{q_1}, \quad (4.21)$$

$$\text{const} = \frac{t_4 - t_x}{q_2}, \quad (4.22)$$

Отже:

$$\frac{t_m - t_x}{q_1} = \frac{t_4 - t_x}{q_2}, \quad (4.23)$$

$$\frac{t_m - t_x}{t_4 - t_x} = \frac{q_1}{q_2}, \quad (4.24)$$

Прирівнявши отримані співвідношення, отримаємо:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{t_m - t_x}{t_4 - t_x}, \quad (4.25)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{t_m - t_x}{t_4 - t_x}, \quad (4.26)$$

Таким чином, співвідношення опорів теплопередачі різних дорожніх конструкцій є обернено пропорційним до різниці температур на зовнішній і внутрішній поверхні цих конструкцій, тобто до різниці температур на поверхні дорожнього одягу – температура повітря найхолоднішої п'ятиденки для даного регіону і температури земляного полотна дорожнього одягу.

Якщо різниця температур на зовнішніх поверхнях конструкції змінюється, то ця зміна приводить до збільшення (зменшення) теплового потоку, що проходить через цю конструкцію, оскільки величина теплового потоку прямо пропорційна різниці температур.

Для забезпечення умови $q = \text{const}$ в різних конструкціях з різними термічним пором необхідно:

$$q_1 = \text{const} = \frac{t_m - t_x}{R_1}, \quad (4.27)$$

$$q_2 = q_1 = \text{const} = \frac{t_4 - t_x}{R_1} - x, \quad (4.28)$$

де x – коефіцієнт пропорційності, який являє собою додатковий тепловий потік, тобто:

$$x = f(t, R), \quad (4.29)$$

В аналітичному значенні це можна представити наступним чином:

$$x = \frac{\Delta t}{R_1} = \frac{t_4 - t_m}{R_1}, \quad (4.30)$$

Для отримання числових значень розглянемо не конструкцію дорожнього одягу, а ґрунт, що залягає масивом. Процес морозного здимання ґрунту земляного полотна дорожнього одягу відбувається тоді, коли його температура опускається нижче нуля. Додатня температура ґрунту, зазвичай, знаходиться в шарі, що залягає нижче глибини промерзання ґрунту.

Тоді термічний опір масиву ґрунту до глибини його залягання можна представити наступним чином:

$$R_{zp} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{H_{мпз}}{\lambda_{zp}}, \quad (4.31)$$

де $H_{мпз}$ – нормативна глибина промерзання з урахуванням поправки (ВБН В.2.3.-218-186-2004),

$\lambda_{гр}$ – теплопровідність ґрунту (приймаємо середнє значення теплопровідності замерзлого ґрунту при мінімальній і максимальній вологості за методичними рекомендаціями з розрахунку водно-теплового режиму для розробки оптимальної конструкції земляного полотна автомобільних доріг).

Такий аналітичний вираз в повній мірі відображає те, що

$$R = f(\delta, \lambda) = f(\delta, W, t, \rho), \quad (4.32)$$

Оскільки глибина промерзання встановлена на основі багаторічних спостережень у регіонах, для яких характерні певні природно-кліматичні характеристики (температура та відносна вологість повітря взимку тощо) та властивості ґрунтів (вологість, щільність, швидкість поширення температури).

Протягом останнього десятиліття в зарубіжних країнах (США, Канада, Німеччина, Фінляндія, Швейцарія та ін.) з метою зниження товщини морозозахисних шарів в дорожніх конструкціях застосовують прошарки з теплоізоляційних матеріалів, товщину яких вибирають таким чином, щоб при появі максимально критичного морозного періоду взимку нижня межа промерзання не досягла морозочутливих шарів (ґрунтової основи конструктиву автомобільної дороги).

З метою усунення ефекту зимового здимання в конструкції дорожнього одягу необхідно забезпечити в основі ґрунту земляного полотна дорожнього одягу стабільні умови, що забезпечують додатню температуру. Даний спосіб гарантує захист від замерзання води в ґрунті і утворення кристалів льоду, які збільшуючись в об'ємі, спричиняють зимове здимання дорожнього одягу. Така конструкція дорожнього одягу буде залишатись рівною протягом цілого року, що суттєво покращить якість дорожнього покриття, особливо в автомобільних

дорогах нежорсткого типу (асфальтобетон, покриття з бетонних дрібноштучних елементів).

Температура ґрунту нижче рівня температури щорічних її коливань становить $+4^{\circ}\text{C}$. Забезпечення даної температури в основі земляного полотна дорожнього одягу створить умови для сприятливого водно-теплого режиму експлуатації дорожнього полотна.

З метою захисту конструкції дорожнього одягу від зимового здимання, тепловий потік, що проходить через дану дорожню конструкцію повинен бути рівним або меншим за тепловий потік, який проходить через масив ґрунту до зони на рівні глибини промерзання, тобто:

$$q_{zp} = \frac{\Delta t}{R_{zp}} = \frac{t_m - t_x}{R_{zp}}, \quad (4.33)$$

$$q_2 = q_{zp} = \frac{\Delta t}{R_2} = \frac{t_4 - t_x}{R_2}, \quad (4.34)$$

звідки

$$R_2 q_{zp} = t_4 - t_x, \quad (4.35)$$

$$R_2 = \frac{t_4 - t_x}{q_{zp}} = \frac{t_4 - t_x}{\frac{t_m - t_x}{R_{zp}}} = \frac{R_{zp} \times (t_4 - t_x)}{t_m - t_x} = \frac{H_{\text{мрз}} \times (t_4 - t_x)}{t_m - t_x}, \quad (4.36)$$

де t_r – температура найхолоднішої п'ятиденки даної місцевості,

t_x – температура ґрунту нижче рівня промерзання (0°C),

t_4 – рекомендована температура ґрунту в основі земляного полотна дорожнього одягу ($+4^{\circ}\text{C}$),

$H_{\text{мрз}}$ – нормативна глибина промерзання з урахуванням поправки,

$\lambda_{\text{гр}}$ – теплопровідність ґрунту земляного полотна під конструкцією дорожнього одягу.

Для подальших розрахунків територію України слід розділити на температурні зони відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» (рисунок 4.3). За температуру холодної п'ятиденки приймали усереднені розрахункові значення температур найхолоднішої п'ятиденки для

міст, що розташовані в цих районах (вихідні дані з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 ґрунтуються на даних багаторічних спостережень).

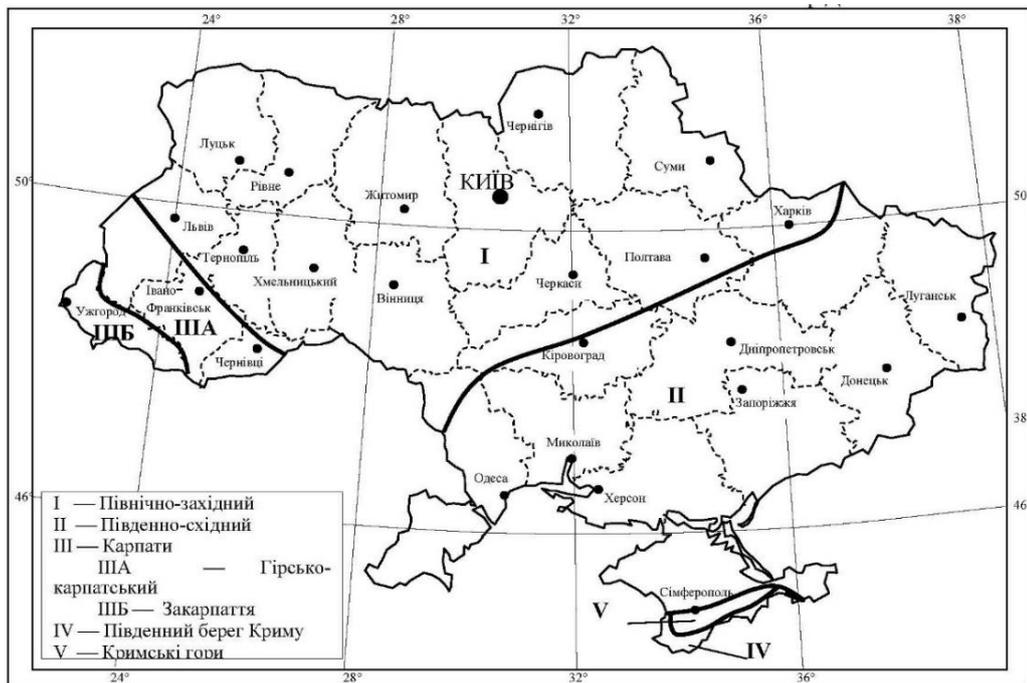


Рисунок 4.3 – Архітектурно-будівельне кліматичне районування регіонів на території України

Розрахункові усереднені значення температур найхолоднішої п'ятиденки у кожному районі наведені в таблиці 4.1. У використану формулу доцільно підставляти (з метою уніфікації) середнє значення опору теплопередачі мерзлого ґрунту у станах максимальної та мінімальної вологості .

Таблиця 4.1 – Температура найхолоднішої п'ятиденки для кліматичних районів

Кліматичний район, підрайон		Розрахункова температура холодної п'ятиденки, t_x
I – Північно-західний		-22
II – Південно-східний		-20
III – Українські Карпати	IIIA – Гірсько-карпатський	-18
	IIIB – Закарпатський	-16
IV – Південний берег Криму		-15
V – Кримські гори		-12

У результаті аналізу математичних обчислень на основі одержаної залежності та виведених усереднених розрахункових значень, виходячи з глибини промерзання ґрунту, $H_{\text{мрз}}$, отримано величини необхідного термічного опору теплопередачі для дорожніх одягів автомобільних доріг ($R_{\text{необ}}$), що розташовуються на ґрунтах різного типу (пісок, супісок, суглинок та глина) в певному кліматичному районі (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Необхідна величина термічного опору конструкції дорожнього одягу

Кліматичний район	Глибина промерзання ґрунту, $H_{\text{мрз}}$, см	Мінімальне необхідне значення опору теплопередачі дорожньої конструкції $R_{\text{необ}}$, що розташовується на основі, $\text{м}^2\text{К/Вт}$		
		пісок	супісок	суглинок і глина
I	165	1,054	1,455	1,598
	150	0,958	1,323	1,453
II	130	0,843	1,164	1,279
	110	0,714	0,985	1,082
IIА	95	0,628	0,867	0,952
	80	0,529	0,730	0,801
IIБ	95	0,642	0,886	0,973
	80	0,541	0,746	0,820
IV	95	0,650	0,898	0,986
	80	0,548	0,756	0,831
IV	95	0,685	0,945	1,038
	80	0,577	0,796	0,874

Для моделювання впливу середньої густини пінобетону та мінімально необхідного значення опору теплопередачі дорожнього одягу на товщину

теплоізоляційного прошарку з пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, для різних типів ґрунтів у роботі виконано розрахунок відповідно до плану двофакторного трирівневого експерименту. В якості змінних факторів вибрано мінімально необхідне значення опору теплопередачі дорожньої конструкції залежно від типу ґрунту: для піску ($X_1=1,054; 0,984; 0,914 \text{ м}^2\text{К/Вт}$), для супіску ($X_1=1,455; 1,355; 1,255 \text{ м}^2\text{К/Вт}$), для глини та суглинку ($X_1=1,598; 1,488; 1,378 \text{ м}^2\text{К/Вт}$) та середню густину пінобетону ($X_2=600; 800; 1000 \text{ кг/м}^3$).

Перевірку значень коефіцієнтів регресії на адекватність рівнянь регресії виконували за критеріями Стьюдента та Фішера.

Основні характеристики плану експерименту, матриця планування та результати експерименту залежно від типу ґрунту наведені в таблиці 4.3 – таблиці 4.8. При плануванні експерименту було вибрано наступний контрольний параметр:

Y – необхідна товщина теплоізоляційного прошарку з пінобетону в конструкції дорожнього одягу.

Таблиця 4.3 – Характеристика плану експерименту (тип ґрунту – пісок)

Характеристика	Фактори	
	Опір теплопередачі, $\text{м}^2\text{К/Вт}$, (X_1)	Густина пінобетону, кг/м^3 , (X_2)
основний рівень “0”	0,984	800
нижній рівень “-1”	0,914	600
верхній рівень “+1”	1,054	1000
Інтервал варіювання	0,07	200

Таблиця 4.4 – Матриця планування та результати повного двофакторного експерименту (тип ґрунту – пісок)

п/п	В нормалізованих факторах		В натуральних факторах		Товщина пінобетону, м
	X_1	X_2	Опір теплопередачі, $R_{необ}$, $m^2K/Вт$	Густина пінобетону, $кг/м^3$	Y
1.	1	-1	1,054	600	0,12
2.	0	-1	0,984	600	0,11
3.	-1	-1	0,914	600	0,10
4.	1	0	1,054	800	0,17
5.	0	0	0,984	800	0,16
6.	-1	0	0,914	800	0,14
7.	1	1	1,054	1000	0,23
8.	0	1	0,984	1000	0,21
9.	-1	1	0,914	1000	0,19

Таблиця 4.5 – Характеристика плану експерименту (тип ґрунту – супісок)

Характеристика	Фактори	
	Опір теплопередачі, $m^2K/Вт$, (X_1)	Густина пінобетону, $кг/м^3$, (X_2)
основний рівень “0”	1,355	800
нижній рівень “-1”	1,255	600
верхній рівень “+1”	1,455	1000
Інтервал варіювання	0,1	200

Таблиця 4.6 – Матриця планування та результати повного двофакторного експерименту (тип ґрунту – супісок)

п/п	В нормалізованих факторах		В натуральних факторах		Товщина пінобетону, м Y
	X ₁	X ₂	Опір теплопередачі, R _{необ} , м ² К/Вт	Густина пінобетону, кг/м ³	
1.	1	-1	1,455	600	0,17
2.	0	-1	1,355	600	0,16
3.	-1	-1	1,255	600	0,14
4.	1	0	1,455	800	0,25
5.	0	0	1,355	800	0,23
6.	-1	0	1,255	800	0,21
7.	1	1	1,455	1000	0,34
8.	0	1	1,355	1000	0,32
9.	-1	1	1,255	1000	0,29

Таблиця 4.7 – Характеристика плану експерименту (тип ґрунту – глина та суглинок)

Характеристика	Фактори	
	Опір теплопередачі, м ² К/Вт, (X ₁)	Густина пінобетону, кг/м ³ , (X ₂)
основний рівень “0”	1,488	800
нижній рівень “-1”	1,378	600
верхній рівень “+1”	1,598	1000
Інтервал варіювання	0,11	200

Таблиця 4.8 – Матриця планування та результати повного двофакторного експерименту (тип ґрунту – глина та суглинок)

п/п	В нормалізованих факторах		В натуральних факторах		Товщина пінобетону, м
	X ₁	X ₂	Опір теплопередачі, R _{необ} , м ² К/Вт	Густина пінобетону, кг/м ³	Y
1.	1	-1	1,598	600	0,19
2.	0	-1	1,488	600	0,18
3.	-1	-1	1,378	600	0,16
4.	1	0	1,598	800	0,28
5.	0	0	1,488	800	0,26
6.	-1	0	1,378	800	0,23
7.	1	1	1,598	1000	0,38
8.	0	1	1,488	1000	0,35
9.	-1	1	1,378	1000	0,32

Обчислення коефіцієнтів рівнянь регресії виконано з застосуванням матричного підходу до регресивного аналізу. Результати коефіцієнтів рівнянь регресії показано в таблиці 4.9. Обчисленнями критерія Фішера показано, що отримані рівняння регресії адекватно описують експериментальні дані.

Таблиця 4.9 – Коефіцієнти рівнянь регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	B ₀	B ₁	B ₂	B ₁₂	B ₁₁	B ₂₂
тип ґрунту : пісок						
Y	0,158	0,015	0,050	0,005	-0,002	0,003
тип ґрунту : супісок						
Y	0,232	0,020	0,080	0,005	-0,003	0,007
тип ґрунту : глина та суглинок						
Y	0,259	0,023	0,087	0,008	-0,003	0,007

Аналізом отриманих коефіцієнтів поліноміальних регресійних рівнянь (таблиця 4.9) і експериментально-статистичних моделей дорожньої конструкції встановлено, що при зростанні середньої густини пінобетону для забезпечення мінімально необхідного значення опору теплопередачі дорожньої конструкції необхідно збільшувати товщину конструкції.

За даними рівняннями регресії отримано ізопараметричні поверхні та діаграми, які адекватно описують вплив середньої густини пінобетону та мінімально необхідного значення опору теплопередачі дорожньої конструкції на товщину теплоізоляційного прошарку з пінобетону для різних типів ґрунтів (рисунок 4.4).

При застосуванні в конструкції дорожнього одягу теплоізоляційного прошарку з монолітного пінобетону необхідно виконати розрахунок необхідної товщини цього прошарку. Для цього слід виконати наступний розрахунок:

$$R_{мен} = R_{необ} - R_{од}, \quad (4.44)$$

де, $R_{теп}$ – опір теплопередачі теплоізоляційного прошарку, $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$,

$R_{необ}$ – необхідний опір теплопередачі дорожньої конструкції, $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$,

$R_{од}$ – опір теплопередачі дорожньої конструкції, розрахованої з умов міцності, $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$.

$$R_{од} = \frac{1}{\alpha} + \sum R_i = \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.45)$$

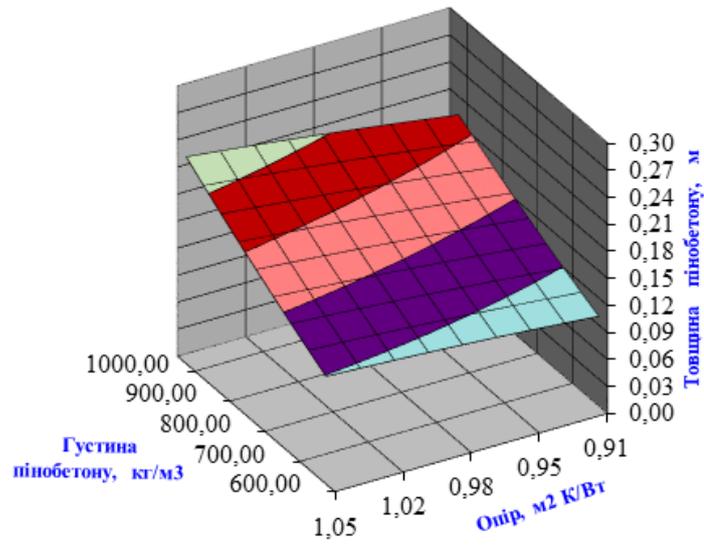
де, α – коефіцієнт теплообміну (експериментально встановлено, що $1/\alpha = 0,04 \text{ м}^2\text{К}/\text{Вт}$);

δ_i – товщина і-го шару конструкції дорожнього одягу, м;

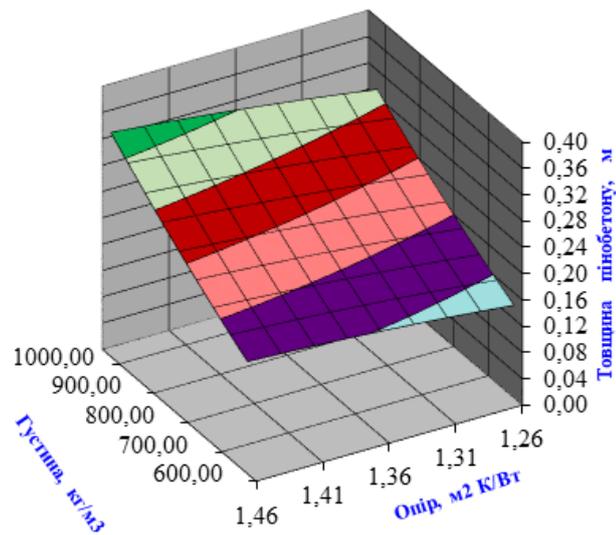
λ_i – коефіцієнт теплопровідності і-го шару конструкції дорожнього одягу, $\text{Вт}/(\text{мК})$.

$$h_{мен} = R_{мен} \times \lambda_{мен}, \quad (4.46)$$

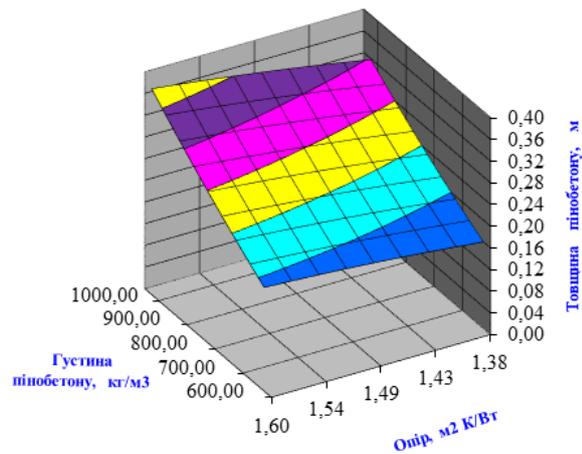
де $\lambda_{теп}$ – теплопровідність пінобетону, $\text{Вт}/(\text{м К})$.



а



б



в

Рисунок 4.4 – Ізопараметричні поверхні зміни товщину теплоізоляційного прошарку з пінобетону для дорожнього одягу на основі піску (а); супіску (б); глини і суглинку

4.2. Методика розрахунку теплоізоляційного (морозозахисного) прошарку дорожнього одягу

За розробленим алгоритмом методика, що пропонується для розрахунку дорожнього одягу ґрунтується на основних положеннях, запропонованих проф. В.І. Рувінським з урахуванням вдосконалень, представлених в розділі 4 підрозділі 4.1 для основних природно-кліматичних зон регіонів України згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010.

Алгоритм методики розрахунку має наступний вигляд:

Конструкція дорожнього одягу приймається гарантовано морозостійкою, якщо виконується умова:

$$l_{здим} \leq l_{здим}^{доп}, \quad (4.47)$$

де $l_{здим}$ - розрахункова величина морозного здимання дорожнього одягу, см;

$l_{здим}^{доп}$ - допустима величина морозного здимання конструкції дорожнього одягу (таблиця 4.10).

Таблиця 4.10 – Допустима величина морозного здимання дорожнього одягу

Тип дорожнього одягу	Вид покриття	Допустима величина морозного здимання, $l_{здим}^{доп}$, см
Капітальний	асфальтобетонне	0
Полегшений	асфальтобетонне	4
Перехідний	перехідне	6

При визначенні нормативної глибини промерзання багат шарового дорожнього одягу $H_{мрз}$ до отриманого значення нормативної глибини промерзання ґрунту Z_{max}^H вводиться коригуюча поправка Δ (таблиця 4.11), яка збільшує глибину промерзання.

$$H_{\text{мрз}} = Z_{\text{max}}^H + \Delta, \quad (4.48)$$

Таблиця 4.11 – Глибина промерзання ґрунту та відповідна величина поправки

Z_{max}^H , см	70	80	90	100	110	120
Поправка Δ , см	10	15	20	30	40	45

Величину термічного опору конструкції дорожнього одягу розрахованого з умов міцності (без теплоізоляційного прошарку) визначають зазвичай за формулою

$$R_{od} = \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.49)$$

де α – коефіцієнт теплообміну (експериментально встановлено, що $1/\alpha = 0,04 \text{ м}^2\text{К/Вт}$);

δ_i – товщина i -го шару конструкції дорожнього одягу, м;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару конструкції дорожнього одягу, Вт/(мК).

Якщо розрахунок здійснюється при умові, що величина допустимого морозного здимання дорожнього полотна $l_{\text{здим}}^{\text{дон}} = 0$, то розрахунок величини морозозахисного (теплоізоляційного) шару виконують за формулою:

$$h_{\text{мен}} = R_{\text{мен}} \times \lambda_{\text{мен}}, \quad (4.50)$$

де $R_{\text{мен}}$ – величина необхідного опору теплопередачі теплоізоляційного прошарку, $\text{м}^2\text{К/Вт}$;

$\lambda_{\text{теп}}$ – теплопровідність пінобетону, Вт/(м К).

Величина необхідного опору теплопередачі теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу визначається за формулою:

$$R_{\text{мен}} = R_{\text{необ}} - R_{od}, \quad (4.51)$$

де $R_{\text{необ}}$ – необхідний опір теплопередачі дорожньої конструкції, $\text{м}^2\text{К/Вт}$ (таблиця 4.2),

R_{od} – опір теплопередачі дорожньої конструкції, розрахований з умов міцності, $\text{м}^2\text{К/Вт}$.

Якщо розрахунок величини теплоізоляційного прошарку проводять з умов наявності допустимого морозного здимання, то необхідний опір теплопередачі дорожньої конструкції $R_{необ(доп)}$ визначають за формулою:

$$R_{необ(доп)} = R_{необ} \times K_{од} \times K_{вол} \times d, \quad (4.52)$$

де $R_{необ}$ – необхідний опір теплопередачі дорожньої конструкції, м²К/Вт;

$K_{од}$ – коефіцієнт, що враховує термін служби дорожнього одягу між капітальними ремонтами (таблиця 4.12);

$K_{вол}$ – коефіцієнт, що враховує схему зволоження робочого шару основи стабілізованого ґрунту земляного полотна (відповідає розрахунковій відносній вологості ґрунтів земляного полотна);

d – понижуючий коефіцієнт для дорожнього району (0,95).

Таблиця 4.12 – Значення коефіцієнта, що враховує термін служби дорожнього одягу

Тип дорожнього одягу	Значення коефіцієнта $K_{од}$ при гарантованому терміні служби дорожнього одягу між капітальними ремонтами		
	менше 10 років	10 років	20 років
Капітальний	0,70	0,85	1,0
Полегшений	0,80	0,90	1,0

З метою оптимізації алгоритму розрахунку з підбору товщини теплоізоляційного шару з монолітного пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, розроблено номограми (рисунок 4.5). Розрахунок проведено при умові забезпечення захисту теплоізоляційного прошарку від зволоження.

Результати даних досліджень висвітлені у публікаціях [44, 46, 47, 50].

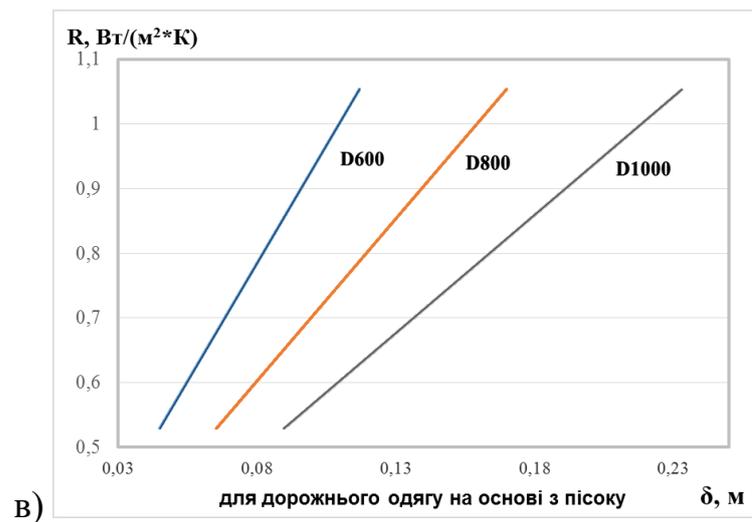
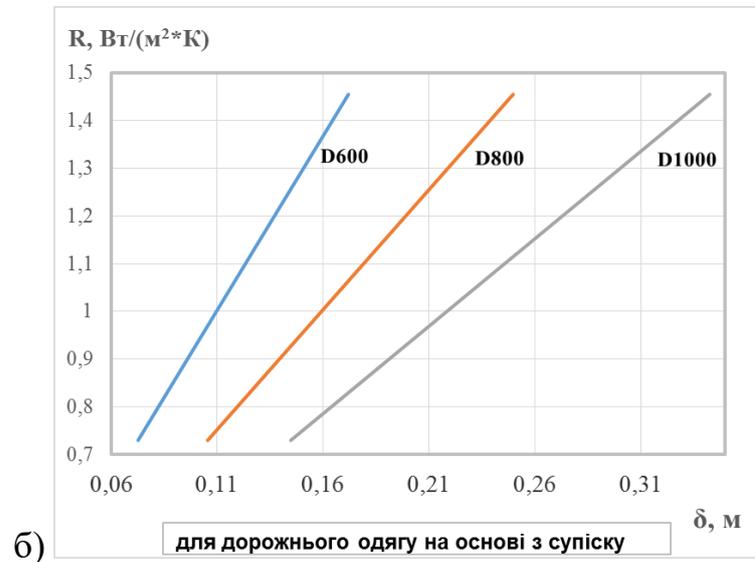
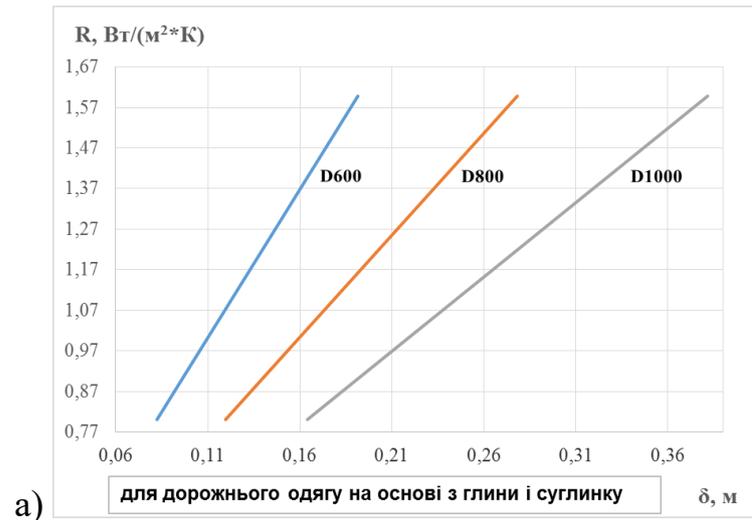


Рисунок 4.5 – Номограми для підбору оптимальної величини теплоізоляційного прошарку з фібропінобетону класів D600, D800, D1000: для основи з піску (а); для основи з супіску (б); для основи з глини та суглинку (в)

4.3. Технологія влаштування захисного теплоізоляційного шару з пінобетону конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу

Згідно вимог будівельних норм (ВБН В.2.3-218-186-2004) шари дорожнього одягу повинні не лише сприймати навантаження, а й впливати на зміну глибини промерзання земляного полотна (тобто передбачається необхідність влаштування відповідного теплоізоляційного шару). Це призводить до збільшення товщини дорожнього одягу, і зазвичай, до здорожчання вартості будівництва автодоріг. Виходом з цієї ситуації є використання нових теплоізоляційних матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності та достатньою несучою здатністю. При цьому, в процесі будівництва доріг об'єм шарів дорожнього одягу повинен бути такою, як об'єм знятого ґрунту земляного корита. Тому використання традиційних матеріалів, таких пісок та щебінь, для влаштування теплоізоляційного шару дорожнього одягу є не лише економічно необґрунтованим, але й недоцільним в конструктивному аспекті.

Матеріали в конструкції дорожнього одягу розташовують по зменшенню міцності відповідно до загасання по глибині напруження від тимчасового навантаження. Слід враховувати жорсткість і коефіцієнт температурного розширення суміжних шарів дорожнього одягу, оскільки при великій їх відмінності в дорожньому одязі виникають тріщини. Найдоцільніше, щоб відношення модулів пружності суміжних шарів з слабозв'язних матеріалів не перевищувало 5-6. У жодному з шарів не повинно виникати пластичних зсувів при дії розрахункових навантажень. Оскільки зсуваючі напруження в дорожньому одязі зменшуються з глибиною, по мірі віддалення від поверхні можна укладати матеріали, що володіють все меншою міцністю.

Якщо загальна товщина дорожнього одягу, отримана з розрахунку на міцність, менша за товщину, встановлену за морозостійкістю, то слід передбачити додаткові морозозахисні чи теплоізоляційні шари. У цьому випадку конструкцію основи дорожнього одягу потрібно призначають одночасно з проектуванням морозозахисних чи теплоізоляційних і дренажних шарів.

Технологія влаштування протиморозного прошарку з неавтоклавного пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, в конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг, внутрішньоквартальних проїздів та пішохідних доріжок передбачає улаштування гідроізоляційних шарів (геотекстилю, гідроізоляційної плівки чи мембрани) (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Схема влаштування конструкції дорожнього одягу

При цьому принцип виготовлення пінобетонної суміші (рисунок 4.7) полягає в наступному: віддозовані сировинні матеріали (цемент, пісок, вода) подаються в пінобетонозмішувач, де відбувається їх перемішування протягом 2-5 хв. Оптимальна послідовність дозування і змішування компонентів пінобетонної суміші наступна: спочатку засипається пісок (щоб зв'язати воду попередньої суміші), потім додається цемент та вода в кількості, що відповідає рецептурі, а також поліпропіленова фібра і все перемішується до отримання однорідної суміші.

Рівномірне розподілення цементу в піску забезпечує оптимальну якість пінобетону. За допомогою піногенератора певна порція піни (відповідно до необхідної середньої густини пінобетону) подається по шлангу у змішувач, де протягом приблизно 120-300 с відбувається її перемішування з раніше

приготованою цементно-піщаною сумішшю до одержання готової пінобетонної суміші. Перемішування продовжується до отримання однорідної пластичної маси. Для утворення піни використовують воду та піноутворюючий концентрат (вода з піноутворюючим концентратом з місткості піногенератора під тиском пропускається через розпилювач, в результаті чого утворюється стійка піну великої кратності).

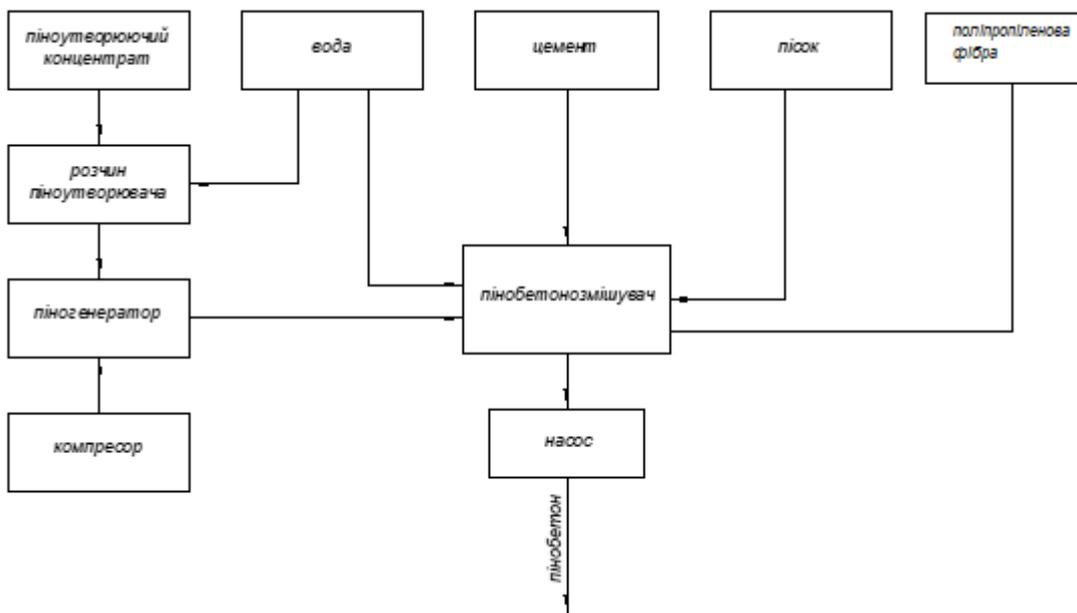


Рисунок 4.7 – Принципова схема виробництва неавтоклавної пінобетону

Готовий пінобетон поступає в насос (автобетонозмішувач), звідки подається до місця заливки. Час отримання готового пінобетону від моменту початку завантаження змішувача складає 5-12 хв.

Висновки до розділу

1. Розроблено методику розрахунку конструкції дорожнього одягу з врахуванням ефекту промерзання конструкції дорожнього одягу та земляного полотна для проектування автомобільних доріг в кожному кліматичному районі

України, що базується на визначенні необхідних показників термічного опору конструкції.

2. Встановлено, що з метою захисту конструкції дорожнього одягу від зимового здимання, тепловий потік, який проходить через дану дорожню конструкцію повинен бути рівним або меншим за тепловий потік, який проходить через масив ґрунту до зони на рівні глибини промерзання.

3. Отримано величини необхідного термічного опору теплопередачі для дорожніх одягів автомобільних доріг для кліматичних районів України, що розташовуються на ґрунтах різних типів (піску, супіску, суглинку та глини). Так, для I кліматичного району при глибині промерзання 165 та 150 см мінімальний опір теплопередачі дорожньої конструкції, що розташовується на піску, становить відповідно 1,054 та 0,958 м²К/Вт.

4. З допомогою методу математичного планування експерименту визначено товщину теплоізоляційного прошарку з пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, для різних типів ґрунтів. В якості змінних факторів якого вибрано мінімально необхідне значення опору теплопередачі дорожньої конструкції залежно від типу ґрунту: для піску ($X_1=1,054; 0,984; 0,914$ м²К/Вт), для супіску ($X_1=1,455; 1,355; 1,255$ м²К/Вт), для глини та суглинку ($X_1=1,598; 1,488; 1,378$ м²К/Вт) та середню густину пінобетону ($X_2=600; 800; 1000$ кг/м³).

5. Встановлено, що для конструкцій дорожнього одягу, що розташовується на пісках, товщина теплоізоляційного шару коливається в діапазоні 0,11-0,23 м; для суглинків – 0,14-0,34 м та для глини і суглинків – 0,16-0,38 м. З метою оптимізації алгоритму розрахунку з підбору товщини теплоізоляційного шару монолітного пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, розроблено номограми для різних типів ґрунтів та марки пінобетону за середньою густиною.

6. Розроблено технологію влаштування теплоізоляційного прошарку з монолітного пінобетону, армованого поліпропіленовою фіброю, у дорожніх одягах автомобільних доріг.

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ФІБРОПІНОБЕТОННИХ ПРОШАРКІВ У КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

5.1. Промислова апробація конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів, армованих дисперсними волокнами

Проведено промислову апробацію розроблених пінобетонів при влаштуванні дослідно-промислових ділянок автодоріг в Одеській обл. силами Державного дорожнього науково-дослідницького інституту імені М.П. Шульгіна «ДерждорНДІ». Результати спостережень та контролю якості дорожнього покриття даних ділянок впродовж семи років показали високу ефективність використання пінобетону в якості протиморозного прошарку дорожнього одягу автомобільних доріг.

Результати дисертаційної роботи використані Державним дорожнім науково-дослідницьким інститутом імені М.П. Шульгіна «ДерждорНДІ» при розробленні „Рекомендацій з використання в дорожньому будівництві пінобетону” (Р В.2.7-218-03450778-681-2007) (Додаток А).

Промислова апробація розроблених дорожніх одягів автомобільних доріг з протиморозним прошарком з монолітного неавтоклавного конструкційно-теплоізоляційного пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, виконано при влаштуванні під'їзних та внутрішньоквартальних доріг і пішохідних майданчиків будівельною компанією «Трембіта», ТзОВ «Балмікс», ЖБК «Уманський дім» при влаштуванні благоустрою на таких об'єктах будівництва: котеджне містечко «Сонячна поляна», дачний кооператив «Сонечко», багатоквартирний житловий будинок у м. Умань, а також при

капітальному ремонті ділянки міської автомобільної дороги на вул. Півколо у м. Львові (Додаток Б – Додаток Д).

Процес впливу морозного здимання земельного полотна при влаштуванні автомобільних доріг нежорсткого типу та зон примикання до штучних бетонних або залізобетонних споруд на автомагістральних та під'їзних залізничних коліях створює в процесі експлуатації дорожньої інфраструктури ряд суттєвих проблем. Зона переходу автомобільної дороги з пружної ділянки земельного полотна, яка ущільнена щебенем під автодорогою нежорсткого типу до ділянки, яка складається з залізобетонної (бетонної) або металевої конструкції, яка є працює жорстко призводить до того, що в даній зоні примикання зазначених вище ділянок, виникають значні деформації. Внаслідок руйнівних деформацій від впливу процесу морозного здимання та суттєвого динамічного навантаження спричиненого рухом автомобільного транспорту та рухомого складу залізниці виникає значне осідання земельного полотна. В процесі експлуатації автодороги та під'їзних залізничних колій з'являються дефекти і пошкодження у верхніх шарах дорожнього одягу автомобільних доріг та пошкодження верхньої будови залізничної колії в зоні примикання до штучної споруди. При цьому вимоги до відхилення у відмітках по висоті на згаданих вище ділянках зони примикання не повинні перевищувати ± 5 мм. Даний процес потребує постійного моніторингу стану автомобільної дороги та залізничної колії і поточного геодезичного контролю за змінами у деформаціях дорожнього полотна та залізничної колії в зоні примикання до штучних споруд.

За алгоритмом розрахунку, наведеним в п.п. 4.1 та 4.2 даного дисертаційного дослідження, здійснено конструювання проектного рішення організації "м'якого в'їзду" в зоні примикання залізничного шляху під'їзної колії на щебеневій основі до залізничної підвищеної естакади довжиною до 2000 мм від границі на контактні земляного насипу та штучної споруди. Товщина протиморозного прошарку та демфорного запобіжника з пінобетону армованого поліпропіленовою фіброю класу D800 становила 500 мм. Заміна даної ділянки щебеневій основі в зоні примикання до штучної залізобетонної споруди створює

можливості для бездефектної роботи підїзних колій в процесі здійснення маневрової роботи з рухомим складом (залізничні вагони, тепловози) на станціях при експлуатації під час навантажувально-розвантажувальних робіт.

На рисунку 5.1 представлено креслення конструктивно-технологічного рішення "м'якого в'їзду" в зоні примикання земляного полотна ущільненою щебеневою основою під верхньою будовою залізничної колії до залізобетонної підвищеної естакади даної залізничної колії, де влаштовано протиморозний прошарок товщиною 500мм на відстані 2000мм від стика штучної споруди та насипу залізничної колії з пінобетону класу D800 попередньо армованою поліпропіленовою фіброю.

Апробацію даного конструктивного рішення за методикою розрахунку регламентованою діючим СН-44-9-72 "Указания по проектированию земляного полотна железнодорожных путей сообщения и автомобильных дорог" за участю проектного підрозділу Проектно-вишуквального та конструкторсько-технологічного інституту "КиївДіпроТранс" показала дієвість запропонованого алгоритму розрахунку і у випадку вирішення проблеми "м'якого в'їзду" з земляного полотна на штучну залізобетонну естакаду підїзної підвищеної залізничної колії в зоні їхнього примикання.

В результаті проведеного розрахунку теплоізоляційного прошарку з фібропінобетону (при умові забезпечення його природньої вологості) було запропоновано конструктивно-технологічне вирішення конструктиву типу "м'який в'їзд" товщиною 500 мм на ділянці залізничного насипу в зоні примикання до залізобетонної штучної споруди до 3,0 м. Запропоноване конструктивно-технологічне рішення фібропінобетонного прошарку в зоні "м'якого в'їзду" було реалізовано у 2018 р. за схемою наведеною на рисунку 5.1 на ділянці примикання підїзної залізничної колії штучної залізобетонної споруди до земляного насипу під верхньою будовою залізничної колії ТЦ "Епіцентр" в м. Київ по вул. Кільцевій.

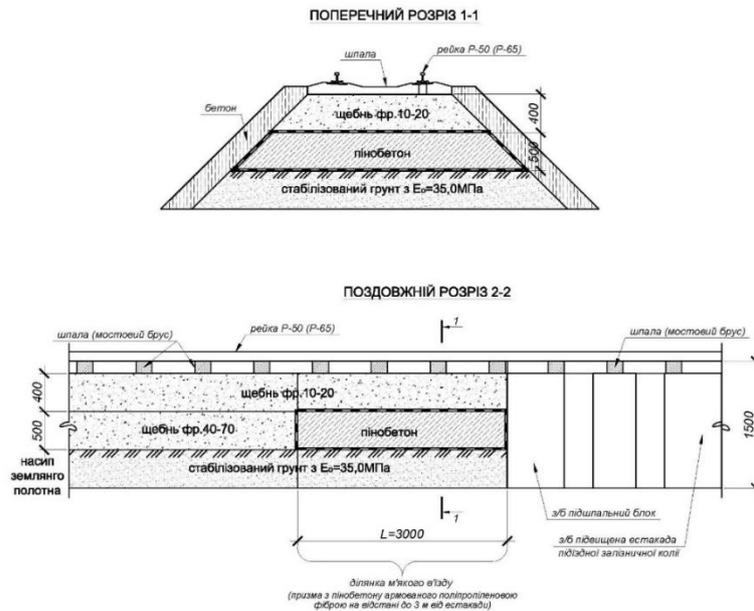


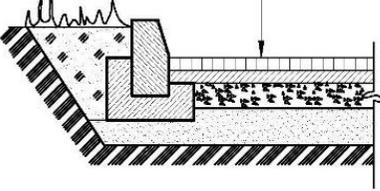
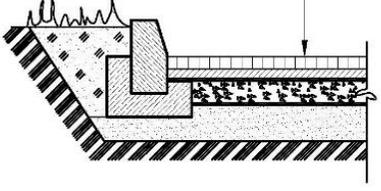
Рисунок 5.1 – Конструктивно-технологічне рішення "м'якого в'їзду" в зоні примикання земляного полотна з ущільненою щебеневою основою під верхньою будовою залізничної колії до залізобетонної підвищеної естакади, яке було застосовано в робочому проекті під'їзної залізничної колії ТЦ "Епіцентр" (м. Київ) згідно проекту ПВКТИ "КиївДіпротранс"

Більш ніж річна експлуатація даної дослідно-промислової ділянки під'їзної колії з інтенсивним рухом залізничного транспорту свідчить про ефективність запропонованого конструктивно-технологічного рішення та про можливість економії значних коштів на ремонт колії в процесі експлуатації залізничної підвищеної естакади ТЦ "Епіцентр" (м. Київ) (Додаток Е).

5.2. Розрахунок економічної ефективності влаштування теплоізоляційних фібропінобетонних прошарків у конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг

Розрахунок економічної ефективності влаштування теплоізоляційного прошарку дорожнього одягу з монолітного пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, представлено в таблиці 5.1.

Порівняння вартості влаштування теплоізоляційного шару

Назва показника	Влаштування піщаного теплоізоляційного прошарку	Влаштування теплоізоляційного прошарку з монолітного пінобетону
1	2	3
Конструкція дорожнього одягу	<ul style="list-style-type: none"> - асфальтобетон дрібнозернистий - 5 см - асфальтобетон крупнозернистий - 7 см - чорний щебінь - 10 см - щебінь фракціонований - 24 см - пісок середній - 30 см - ущільнений ґрунт 	<ul style="list-style-type: none"> - асфальтобетон дрібнозернистий - 5 см - бетонна підготовка - 12 см (В 12,5, W8) - плівка будівельна - 150 мкм - пінобетон D800 (D1000) - 25 см - геотекстиль щільністю 160 г/см² - пісок середній - 20 см - ущільнений ґрунт 
Технологічні операції, що необхідно виконати при влаштуванні теплоізоляційного прошарку	<ol style="list-style-type: none"> 1) транспортування піску і його складування в штабеля; 2) розподіл і планування піску автогрейдером або бульдозером по підготовленому земляному полотну відповідно до проекту; 3) ущільнення піщаного шару з його поливанням; 4) заливка піщаного підстиляючого шару водою, що дозволяє виявити і виправити ділянки, що вимагають додаткової підсіпки; 5) остаточне планування і детальна геодезична перевірка відміток профілів піщаного підстиляючого шару 	<ol style="list-style-type: none"> 1) прокладання захисної поліетиленової плівки; 2) встановлення опалубки; 3) транспортування пінобетонної суміші; 4) вкладання пінобетонної суміші; 5) профілювання поверхні шару та його загладжування

1	2	3
Комплект машин, що необхідно задіяти	автомобілі-самоскиди, бульдозери, автогрейдери, поливальні машини, катки на пневматичних шинах	автомобілі-самоскиди, автобетоновоз (або бетононасос)
Трудомісткість люд-год	17 767	32 358
Загальна вартість влаштування 1 км, грн	22 512 860	42 531 040
Довговічність (міжремонтний термін), роки	2-7	15-20
Вартість ремонтних робіт протягом 25 років, грн	8 000 000×4 = 32 000 000	8 000 000
Загальна вартість за 25 років експлуатації, грн	54 512 860	50 531 040
Економічна ефективність		7,3%

Використання в першому варіанті теплоізоляційного шару з екструдованого пінополістиролу при будівництві доріг з часом неминуче приводить до його часткового або повного руйнування, як і будь-якого органічного високопористого матеріалу (це можна спостерігати на прикладі використання пінополістиролу в процесі утеплення стінових конструкцій та покриттів). Тому його довговічність при використанні в дорожніх одягах автомобільних доріг зазвичай низька.

У процесі аналізу техніко-економічної ефективності влаштування теплоізоляційного прошарку враховано термін експлуатації дорожнього одягу, періодичність міжремонтних термінів та вартість виконання ремонтних робіт. Економічний ефект від застосування теплоізоляційного прошарку з монолітного фібропінобетону дозволяє забезпечити економічний ефект 7,3% порівняно з традиційним дорожнім одягом автомобільних доріг, де в якості теплоізоляційного прошарку використовується пісок.

При цьому доцільність застосування монолітного безавтоклавного пінобетону в якості теплоізолюючого прошарку дорожньої основи є економічно обґрунтована та очевидна в зв'язку з тим, що періодичність проведення ремонтів (капітальних та поточних) на дефектних ділянках виростає в 4 рази та становить від 25 до 30 років при нормальному міжремонтному терміні для автодоріг нежорсткого типу, який становить 7 років.

Таким чином навіть якщо прямий економічний ефект від використання теплоізоляційного фібропінобетонного монолітного прошарку розрахункової товщини для певного природно-кліматичного району України замість традиційного протиморозного прошарку з піску в дорожньому одязі буде не значним, втричі скоротить затрати на експлуатацію дефектних ділянок автомобільних доріг нежорсткого типу.

Крім того, використання неавтоклавного пінобетону дисперсноармованого волокнами поліпропіленової фібри марок D600, D800, D1000 в силу своєї технологічності, простоти у влаштуванні в процесі

будівництва закладає передумови для економії фінансових ресурсів при використанні конструктивно-технологічного вирішення ділянок на контакті земляного полотна з пружною основою з жорсткими бетонними, залізобетонними або металевими штучними спорудами на автодорогах (мости, переходи, труби) і зони "м'якого в'їзду" на залізничних під'їзних коліях вулично-транспортової мережі та інфраструктурних об'єктах в Україні.

Висновки до розділу

1. Конструктивно-теплоізоляційний бетон, армований поліпропіленовими волокнами, використано при влаштуванні теплоізоляційного шару дорожнього одягу при будівництві експериментальної ділянки дороги в Одеській обл., нових і реконструкції існуючих автомобільних доріг та влаштуванні благоустрою Будівельною компанією „Трембіта”, ТЗОВ „Галичина”, ТЗОВ „Балмікс” та ЖБК "Уманський дім", ПВКТІ «КиївДіпротранс».

2. Запропоновано конструктивно-технологічні рішення влаштування зон примикання: автодороги (земляного полотна) та мостів і шляхопроводів (штучна споруда); "м'який в'їзд" з використанням дисперсно-армованого пінобетону, за рахунок чого до 3 разів збільшується міжремонтний цикл.

3. Встановлено, що економічна ефективність застосування монолітного неавтоклавного пінобетону, армованого волокнами поліпропіленової фібри, в якості протиморозного прошарку конструкції дорожніх одягів автомобільних доріг порівняно з піщаним теплоізоляційним шаром та теплоізоляційним шаром екструдованого пінополістиролу становить 399 800 та 398 240 грн відповідно.

4. Показано, що економічна ефективність суттєво підвищується за рахунок збільшення міжремонтного циклу до 4 раз, особливо на проблемних ділянках, де здійснюється заміна піску на фібропінобетон відповідного класу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання конструкційно-теплоізоляційного пінобетону неавтоклавного тверднення з підвищеними будівельно-технічними характеристиками для влаштування теплоізоляційного прошарку в конструкції дорожнього одягу за рахунок тривимірного дисперсного армування поліпропіленовою фіброю.

2. На основі результатів досліджень впливу технологічних факторів на властивості пінобетону встановлено оптимальний вміст (до 0,25% від маси цементу) і довжину (12 мм) армувальних поліпропіленових волокон, що дозволяє отримати високі показники міцності дисперсно-армованого цементного каменю на згин (збільшення на 12–20 %) і на стиск (збільшення на 6–12 %) порівняно з неармованим цементним каменем пінобетону неавтоклавного тверднення.

3. Проведено аналіз процесу структуроутворення дисперсно-армованого пінобетону з позицій системного підходу на основі багатфакторних поліноміальних моделей впливу співвідношення наповнювача та в'язучого, а також кількості дисперсних армувальних волокон, який визначається оптимальними умовами розподілення твердої та газової фаз, а також армування суміжних міжпорових перегородок пінобетону, зв'язуючи їх в один асоціат, що забезпечує спільну роботу матеріалу при різного роду зовнішніх впливах.

4. На основі експериментально-статистичних моделей запроєктовано ефективні склади дисперсно-армованих конструкційно-теплоізоляційних пінобетонів за критеріями рухливості, середньої густини, міцності на стиск та згин. Отримані ніздрюваті бетони характеризуються середньою густиною для марок за густиною D600–D1000 та класом за

міцністю С1,5–С5, водопоглинанням 59,3–24,9 мас.%, коефіцієнтом розм'якшення 0,81–0,89. Дослідженнями деформативних властивостей розроблених пінобетонів встановлено, що модуль пружності бетону зростає від 2,5 до 5,74 ГПа, коефіцієнт Пуассона знижується від 0,27 до 0,17, а деформації усадки через 28 діб в повітряно-сухих умовах зменшуються у 2,3 рази порівняно із неармованим пінобетоном. Встановлено, що дисперсне армування забезпечує зростання напруження σ при сталому значенні відносних деформацій дисперсно-армованих пінобетонів. Так, при введенні 0,2 мас.% поліпропіленової фібри при значенні відносних деформацій $\varepsilon=(2-3)\times 10^{-5}$ забезпечується збільшення напружень σ на 7,3–10,1% порівняно з пінобетонами без фібри.

5. Аналізом силових та енергетичних показників тріщиностійкості за методами і критеріями механіки руйнування встановлено, що за показниками енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (W_L) та питомих ефективних витрат енергії на статичне руйнування (G_F) дисперсно-армовані пінобетони перевищують аналогічні показники для неармованих пінобетонів у 1,5–1,8 рази. Аналіз докритичної та закритичної стадій руйнування пінобетону показує перевагу пінобетону армованого фіброю: значення енерговитрат на пружне деформування (W_e) та загальних енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (W_i) у 1,39 рази перевищують показники неармованого пінобетону. Введення до складу пінобетону волокон поліпропіленової фібри веде до зростання в'язкості руйнування (K_i) та критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (K_c). В'язкість руйнування фібропінобетонів у докритичній стадії (K_i) та на стадії поширення тріщин (K_c) в 1,5–3,0 рази перевищує відповідний показник для неармованих пінобетонів.

6. Розроблено метод підвищення довговічності дорожнього одягу і усунення впливу ефекту морозного здимання на якість дорожнього покриття за рахунок введення в конструкцію дорожнього одягу необхідної величини ефективного теплоізоляційного прошарку. Проведено аналіз закономірності

процесу теплопередачі в масиві ґрунту земляного полотна та багат шаровому дорожньому одязі. На основі проведеного аналізу встановлено величини необхідного опору теплопередачі дорожнього одягу для природно-кліматичних районів України та запропоновано методику розрахунку величини теплоізоляційного (морозозахисного) шару дорожнього одягу.

7. Розроблено методику розрахунку величини теплоізоляційного прошарку з використанням монолітного фібропінобетону та номограми для визначення необхідної величини теплоізоляційного прошарку з монолітного неавтоклавного конструкційно-теплоізоляційного фібропінобетону класів D600-D1000.

8. Результати дослідно-промислового впровадження підтверджують ефективність використання монолітного неавтоклавного конструкційно-теплоізоляційного фібропінобетону необхідної товщини в якості протиморозного прошарку конструкції дорожнього одягу. Ефективність від впровадження розроблених фібропінобетонів у конструктиви дорожнього одягу автомобільних доріг становить 3981,820 тис. грн на 1 км автодороги, що складає 7,3% та дозволяє збільшити до 2,5 разів міжремонтний цикл в процесі експлуатації автомобільних доріг нежорсткого типу порівняно з автодорогами з піщаним теплоізоляційним прошарком.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПЕРШОДЖЕРЕЛ

1. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Пенобетоны для интенсивных технологий строительства. Белоруд: Изд-во БГТУ, 2015. 127с.
2. Ахундов А. А., Удачкин В. И. Перспективы совершенствования технологии пенобетона. Строительные материалы. 2003. №3. С. 10.
3. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2011. 529 с.
4. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин. Одеса: Астропринт, 2002. 99 с.
5. Бартеньева Е. А., Машкин Н. А., Шоева Т. Е. Использование золы-уноса в производстве пенобетона. Естественные и технические науки, 2015. №11. С. 608-611.
6. Богатина А. Ю., Моргун Л. В. Фибропенобетон для перекрытий каркасных зданий. Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 2. С. 34–35.
7. Большаков В. И., Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы теории и /методологии многопараметрического проектирования составов бетона. Днепропетровск: ПГАСА, 2006. 360 с.
8. Большаков В. И., Мартыненко В. А., Ястребцов В. В. Производство изделий из ячеистого бетона по резательной технологии. Днепропетровск : Пороги, 2003. 141 с.
9. Большаков В. И., Шпирько Н. В. Использование кремнегеля для получения теплоизоляционных материалов / Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. №6. 2011. С. 34-39.
10. Бусел А. В. Ремонт автомобильных дорог: Учеб. Пособие. Минск : АртДизайн, 2004. 208 с.
11. Василевич О. В. Узагальнена математична модель взаємодії синтетичних прошарків із конструктивними шарами дорожнього одягу //

Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Міжвідомчий наук.-техн. збірник К.: НТУ, 2003. Вип. 63. С. 156–160.

12. Взаємний зв'язок міцнісних та деформаційних характеристик безавтоклавного пінобетону / В. Б. Верба, І. Б. Горніковська, Х. Б. Демчина, В. В. Волоцюга, П. О. Голик // Вісник Донецької національної академії будівництва і архітектури «Сучасне промислове та цивільне будівництво». Т. 8. № 1. 2012. С. 28–35.

13. Взаимосвязь структуры пены, технологии и свойств получаемого пенобетона / Т. Е. Кобидзе, В. Ф. Коровяков, А. Ю. Киселев, С. В. Лисов // Строительные материалы. 2005. №1. С. 26–29.

14. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем / М. А. Саницький, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, М. С. Стечишин // Будівельні матеріали і виробы, 2015. № 1. С. 6–9.

15. Волков И. В., Газин Э. М. Фибробетон. Особенности и перспективы применения в строительных конструкциях // Стройпрофиль, 2003. № 2. С. 67–69.

16. Волоцюга В. В., Горніковська І. Б., Демчина Х. Б. Визначення міцності пінобетону на розтяг за згину // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2012. № 742. С. 42–47.

17. Воробьев Х.С., Филиппов Е.В., Тальнов Ю.Н. Технология и оборудование для производства изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения // Строительные материалы 1996. № 1. С. 10-15.

18. В'язучі речовини / [Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л.]. К.: Основа, 2012. 448 с.

19. Галушко В. О. Проблеми та перспективи розвитку дорожньої галузі / Дорожня галузь. 2011. № 2. С. 12–15.

20. Гамеляк І. П., Шевчук В. Р. Проектування ремонтів нежорстких дорожніх одягів з урахуванням залишкового строку служби покриття // Вісник ЦНЦ ТАУ. №3. 2001. С. 26–34.

21. Горніковська І. Б., Демчина Х. Б., Ковальчик Я. І. Дослідження фізико-механічних властивостей пінобетону, армованого фіброю // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. № 37. 2010. С. 100–112.
22. Горніковська І. Б., Каганов В. О. Деформативні характеристики безавтоклавного пінобетону для шарів дорожнього одягу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». 2013. № 755. С. 95–99.
23. Горніковська І. Б., Каганов В. О. Тріщиностійкість пінобетонів для дорожнього будівництва // Збірник наукових праць «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Вип. 31. Рівне: НУВГП. 2015. С. 305–312.
24. Горшков В. С., Тимашев В. В., Савельев В. Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М. : Высш. шк., 1981. 335 с.
25. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шпилюк П. С. Бетони і будівельні розчини : підручник. Київ: Основа, 2016. 568 с.
26. Гусенков С. А., Удачкин В. И. Удешевление индивидуального жилищного строительства // Промышленность России, специальный вып. 1999. 33 с.
27. Дворкін Л. Й., Бордюженко М. О. Технологія та властивості ніздрюватого бетону на основі тонкомеленого в'язучого // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Вип. 49, 2013. С. 49–53.
28. Дворкин Л. Й., Бордюженко О. М. Сухая строительная смесь для производства неавтоклавного пенобетона // Сб. статей «Сухие строительные смеси». № 4. 2009. С. 28-30.
29. Дворкин Л. И., Бордюженко О. М. Эффективные неавтоклавные шлакосодержащие пенобетоны // Технологии бетонов. 2010. № 5-6. С.68-71.
30. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язання будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.

31. Демчина Б. Г., Литвиняк О. Я. Експериментальні дослідження збірно-монолітних залізобетонних плит перекриття з використанням пінобетону при монтажі та експлуатації // Науково-технічний збірник ХНАМГ. 2012. № 105. С. 10–17.

32. Демчина Х. Б. Міцність та деформативність пінобетонних плит на продавлювання штампом. Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01. Львів, 2016. 22 с.

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

34. Деформативность пенобетона с учетом изменения наполнителя / Постернак И. М., Костюк А. И., Постернак А. А., Шегера Д. А., Постернак С. А. // Науковий вісник будівництва. Вип. № 31. 2005. С. 97–103.

35. Довженко О. О., Юрко І. А., Кравченко В. В. Застосування фібробетону в Україні. Властивості дисперсноармованих бетонів // Научно-техн. сб. «Коммунальное хозяйство городов» №90. 2009. С. 267–272.

36. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Досвід застосування фібробетону у будівництві // Збірник наукових праць ДЕТУТ : Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 24. К.: ДЕТУТ, 2014. С. 5–11.

37. Дослідження міцності неавтоклавного пінобетону на розтяг при згині / В. В. Волоцюга, Х. Б. Демчина, І. Б. Горніковська, О. А. Гаврилко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 5(35). Полтава, 2012. С. 161–165.

38. ДСТУ Б В.2.7-45:2010. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови. Київ, 2010. 41 с.

39. Ефективні бетони для огорожуючих конструкцій та технологія їх виробництва. / [Гоц В. І., Тимошенко С. А., Гелевера О. Г., Петропавловський О.М.] // Будівельні конструкції. Київ, 2009. Вип. 72. С. 516-523.

40.Закорчемний Ю. О. Управління структурою та властивостями пінобетону. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05. Одеса. 2004. 20с.

41. Карпінський Б., Макух Б. Транспортна система України в контексті європейської інтеграції // Економіка України. №7 (440), 2003. С. 17–23.

42.Европейское соглашение о международных автомагистралях (СМА) от 7-10 октября 2002 года [Електронний ресурс]: Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций; Комитет по внутреннему транспорту. Режим доступа: http://www.conventions.ru/view_base.php

43. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Дослідження фізико-механічних та експлуатаційних властивостей безавтоклавного пінобетону для дорожнього будівництва // Вісник Донецької національної академії будівництва та архітектури. «Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва». Вип. 6(80). 2009. С. 63–69.

44.Каганов В. О., Горніковська І. Б. Забезпечення морозостійкості конструкції дорожнього одягу та земляного полотна автомобільних доріг // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». № 662. 2010. С. 201–204.

45.Каганов В. О., Горніковська І. Б., Івасів І. С. Експлуатаційні характеристики морозозахисного прошарку дорожнього одягу нежорсткого типу з монолітного безавтоклавного пінобетону // Будівельні матеріали та виробы. №3. 2010. С. 21–23.

46.Каганов В. О., Горніковська І. Б. Методика розрахунку величини теплоізоляційного прошарку автомобільних доріг нежорсткого типу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». №737. 2012. С. 71–78.

47.Каганов В. О., Горніковська І. Б. Новітні підходи до використання пінобетону в дорожньому будівництві // Бетон і залізобетон. 2009. №5. С. 21–24.

48.Каганов В. О., Горніковська І. Б. Тріщиностійкість пінобетонів безавтоклавного виробництва. Збірник наукових праць «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Вип. 26. Рівне: НУВГП. 2013 С. 179–185.

49.Каганов В. О., Горніковська І. Б., Позняк О. Р. Підвищення експлуатаційних властивостей дорожніх одягів автомобільних доріг // Збірник тез доповідей Міжнародної конференції «Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій». 2018. С. 20–22.

50.Каганов В. О., Горніковська І. Б. Шляхи використання безавтоклавного пінобетону в дорожньому будівництві // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». № 27. 2008. С. 116–121.

51. Комохов, П.Г. Современные пенобетоны. М. : Наука, 1997. – 284 с.

52.Конструкционно-теплоизоляционный неавтоклавный пенобетон в конструкциях и изделиях / И. М. Постернак, А. И. Костюк, С. А. Постернак, А. А. Постернак // Вісник ДонДАБА. Макіївка, 2004. Вип. 3 (45). С. 89–92.

53.Концепція реформування транспортного сектора України / Ю. М. Цветов, Л. М. Соколов, Ю.М. Федюшин та ін. / Збірник наукових праць. К. : Преса, 1999. 67 с.

54.Концепція розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на середньостроковий період до 2020 року. Міністерство транспорту та зв'язку України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://old.mtu.gov.ua>

55. Королев А. С., Волошин Е. А., Трофимов Б. Я. Оптимизация состава и структуры конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона // Строительные материалы. 2004. № 3. С. 30–32.

56.Корсунський М. Б. Межремонтные строки службы дорожных одежд и покрытий /Автомобильные дороги. №1. 1984. 4–6с.

57.Костюк А. И., Постернак С. А., Постернак И. М. Обзор развития, состояния и применения конструкционно-теплоизоляционного

неавтоклавного пенобетона в конструкциях и изделиях // Вісник ОДАБА: зб. наук. праць. Вип. № 10. Одеса, ОДАБА. 2003. С. 109–116.

58. Кривенко П. В., Мохорт М. А., Ковальчук Г. Ю. Підбір складу жаростійкого лужного алюмосилікатного газобетону на основі золи-виносу // Вісн. Вінниц. політехнічного ін-ту. 2000. № 4. С. 15–19.

59. Кудрицька Н. В. Транспортно-дорожній комплекс України: сучасний стан, проблеми та шляхи розвитку: [монографія]. К.: НТУ, 2010. 338 с.

60. Кудряков А. И., Стешенко А. Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения. Вестник ТГАСУ, 2014. №2. С. 127–133.

61. Лобанов И. А., Пухаренко Ю. В., Моргун Л. В. Безавтоклавные ячеистые бетоны, армированные синтетическими волокнами // Бетон и железобетон, 1983. №8. С. 28-30.

62. Ляшенко Т. В. О математических моделях в строительном материаловедении. Наука та будівництво. 2015. № 1. С. 10–17.

63. Мартыненко В. А. Влияние технологических параметров на свойства теплоизоляционного пенобетона // Вісник ПДАБА. 2002. № 5. С. 41–50.

64. Мартыненко В. А., Ворона А. Н. Запорожский ячеистый бетон. Днепропетровск: Пороги, 2003. 95 с.

65. Мартынов В. И., Орлов Д. А., Выровой В. Н. Анализ структурообразования и свойств неавтоклавного пенобетона // Строительные материалы. М.: Стройматериалы. 2005. №1. С. 48–49.

66. Мартынов В. Синергетический подход при формировании, оценке характера структуры и свойств строительных композитов макропористого строения // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса, 2010. № 39. Ч. 2. С.62-69.

67. Мартынов В., Выровой В. Структурная организация и свойства пористых строительных композитов // Строительство, материаловедение, машиностроение: серия Теория и практика применения ячеистого бетона в строительстве. Днепропетровск, ПГАСА, 2009. Вып.4. С.256–261.

68. Мартынов В., Елькин В. Влияние «внутренней» и «внешней» активации на свойства неавтоклавного пенобетона // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. Курск, 2014. №9. С.107–111.

69. Мікловда В. П., Шевчук Я. В. Сучасний стан та рівень розвитку автомобільної інфраструктури України // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка». Вип. 32. Ужгород: Вид-во Ужгородського національного університету, 2011. С. 6–13.

70. Моргун В. М. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения с компенсированной усадкой. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за специальностью 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2004.

71. Моргун Л. В., Моргун В. Н. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. №1. С. 33–35.

72. Моргун Л. В. Эффективность применения фибропенобетона в современном строительстве // Строительные материалы. 2002. № 3. С. 16–17.

73. Мосьпан В. І. Пінобетон, армований дискретними поліпропіленовими волокнами. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05. Дніпропетровськ, 2011. 20 с.

74. Меркин А. П. Научные и практические основы улучшения структуры и свойств поризованных бетонов. Автореферат д-ра техн. наук по специальности 05.23.05. М., 1972. 44 с.

75. Меркин А. П., Филин А. П., Земцов Д. Г. Формирование макроструктуры ячеистых бетонов // Строительные материалы. № 12. М., 1963. С. 10-12.

76. Несветаев Г.В. Расчет состава ячеистых бетонов [Электронный ресурс] // Весь бетон. 2008. Режим доступа: <http://www.allBeton.ru>

77. Новікова А. М. Україна в системі міжнародних транспортних коридорів. К.: НІПБМ, 2003. 494 с.

78. Нудель Г. Н., Микруков В. А., Ситкова Е. Б. О действии добавок суперпластификаторов на автоклавный газобетон // Долговечность конструкций из неавтоклавных бетонов: Тез. докл. VI респ. конф.-Таллинн, 1987. Ч.1. С. 114 -119.

79. Організаційно-методичні, економічні і технічні нормативи. Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування. ВБН Г. 1-218-050-2001. К: Державна служба автомобільних доріг України, 2001.

80. Орлов Д. А. Особенности структурообразования и vlastivosti пінобетону неавтоклавного тверднення. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05. – Одеса, 2009. 21 с.

81. Офіційний сайт Міністерства інфраструктури України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.mtu.gov.ua/article/show/article_id/16012/highlight/Концепція розвитку транспортно дорожнього комплексу України на середньостроковий період та до 2020 року.

82. Офіційний сайт Управління Державтоінспекції Міністерства внутрішніх справ України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.sai.gov.ua/>.

83. Офіційний сайт Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ukravtodor.gov.ua>

84. Оценка эффективности применения наноструктурированного вяжущего при получении легковесных ячеистых композитов / В. В. Строкова, А. В. Череватова, Н. В. Павленко, Е. В. Мирошников, Н. А. Шаповалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. № 4. С. 48–51.

85. Пащенко Ю. Є., Никифорок О. І. Транспортно-дорожній комплекс України в процесах міжнародної інтеграції: [моногр.]. НАН України. Рада по вивч. продукт. сил України. Ніжин: Аспект-Поліграф, 2008. 192 с.

86. Перфилов В. А., Алаторцева У. В., Тюрин А. А. Фибробетоны с повышенной прочностью, трещиностойкостью, морозостойкостью, водонепроницаемостью и долговечностью // Строймастер. 2008. № 1. С. 22.

87. Пінобетон для дорожнього будівництва / Коваль П. М., Фаль А. Є., Кушнір О. В., Мартинов В. І. // Матеріали 47 Міжнародного семінару «Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии. Одеса : Астропринт, 2008. С. 204–207.

88. Позняк О. Р., Мельник А. Я., Марущак У. Д. Неавтоклавные газобетоны на основе модифицированных вяжущих композиций // Международный журнал «Устойчивое развитие». 2014. №18. С. 97–104.

89. Пособие по проектированию и устройству теплоизолирующих слоев дорожной одежды из пенополистирольных экструзионных плит "Экстрол". Балашиха: ОАО "СоюзДорНИИ", 2007. 49с.

90. Прейгер Д. К., Собкевич О. Ю., Ємельянова О. В. Реалізація потенціалу транспортної інфраструктури України в стратегії посткризового економічного розвитку. К.: НІСД, 2011. 37 с.

91. Проектирование и устройство теплоизолирующих слоев из экструдированного пенополистирола Styrofoam на автомобильных дорогах России: Стандарт организации. Москва, 2007.

92. Протяжність і характеристика автомобільних доріг загального користування на 01.01.2013 року:[бюлетень] / [Електронний ресурс]: Державне агентство автомобільних доріг України „Укравтодор” (офіційний сайт). – Режим доступу: <http://www.ukravtodor.gov.ua/clients/ukrautodor.nsf>

93. Пухаренко Ю. В. Свойства и перспективы применения ячеистого фибробетона // Популярное бетоноведение. Санкт-Петербург, 2006. № 4. С. 50–53.

94. Рекомендації з використання в дорожньому будівництві пінобетонів. Р В.2.7-218-034-50-778-681:2007: ДерждорНДІ. - Київ, 2007.

95. Роль межпоровых перегородок как структурообразующего элемента порогипсобетона [Текст] / Р. Б. Ергешев, А. А. Родионова, В. А. Югай и др. // Строительные материалы. 2006. № 1. С. 30–31.

96. Румянцев Б. М. Критарасов Д. С. Пенобетон. Проблемы развития. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. №1. С. 14–15.

97. Савченко Т. О. Етапи становлення і розвитку дорожнього господарства України // Матеріали науково-технічної конференції ВНПК.

98. Саницький М. А., Ілів В. В., Павлишин І. І. Виробництво пінобетонів безавтоплавного тверднення в західному регіоні України / Вісник Теорія і практика будівництва. 2004. С. 166–168.

99. Сахаров Григорий Петрович Ячеистые бетоны в посткризисный период // Строительство: наука и образование. 2011. №1. С. 12-16.

100. Свиначев А. В., Тысячук В. В. Опыт применения монолитного пенобетона при строительстве и реконструкции зданий и сооружений // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгород, 2003. № 4. С. 62–66.

101. Сеница М., Лукайтис А., Дудик А. Влияние структуры поризованного бетона на его деформации и прочность // Дайджест публикаций журнала «Строительные материалы» по тематике «Ячеистые бетоны – производство и применение». 2005. Часть II. С. 96–98.

102. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. 144 с.

103. Солодкий С. Й. Дорожні одяги. Навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. 164 с.

104. Солодкий С. Й., Толмачев С. М. Бетонні дорожні та аеродромні покриття. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. 132 с.

105. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво ДБН В.2.3-4:2007. К: Укравтодор, 2007. 91с.

106. Стешенко А. Б., Кудяков А. И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой. Инженерно-строительный журнал, 2015. № 2 (54). С. 56–62.

107. Теплоизоляционные слои дорожной одежды из пенополистирольных плит "Пеноплэкс". Методические рекомендации по проектированию и устройству: СоюзДорНИИ. Москва, 2001.

108. Технология устройства теплоизоляционного основания из легкого пенобетона монолитной укладки / Т. Е. Кобидзе, В. Ф. Коровяков, С. В. Листов, С. А. Самбровский // Строительные материалы. 2005. № 3. С. 60–62.

109. Транспортна політика України та її наближення до норм Європейського Союзу / [Т. Сирийчик, А. Фургальські, Ч. Клімкевич, М. Камола та інш.]; за ред. Марчіна Свенчіцкі. К.: Аналітично-дорадчий центр Блакитної стрічки, 2010. 102 с.

110. Транспортна стратегія України на період до 2020 року / Розпорядження Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 року №2174-р [Електронний ресурс]: Міністерство інфраструктури України. Режим доступу: <http://www.mintrans.gov.ua/uk/discussion/15621.html>.

111. Удачкин И. Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона // Строительные материалы. 2003. №3. С. 8–9.

112. Ушеров-Маршак А. В., Сопов В. П. Изотермическая калориметрия-стандартный метод измерения кинетики гидратации цемента. Цемент и его применение. 2009. № 5. С. 106-107.

113. Хитров А. В. Природа пены в технологи пеноматериалов // Новые исследования в материаловедении и экологии: Сб. науч. ст. Вып. 6. Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2006. С. 23–28.

114. Чубукін Р. Ю. Пінобетонні суміші одностадійного приготування та ефективні безавтоклавні бетони на їх основі. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05. Харків, 2006. 21 с.

115. Шахова Л. Д. Повышение эффективности производства неавтоклавных пенобетонов с заданными свойствами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук за специальностью 05.23.05. Белгород, 2007.

116. Шевчук Я. В. Регіональна політика розвитку автотранспортної інфраструктури в Україні // Сталый розвиток економіки. 2011. №1. С. 108–114.

117. Шишкин А., Шишкина А. Поризованные бетоны повышенной прочности // Будівельні конструкції. 2014. Вип. 80. С. 46–49.

118. Фердман Г. П. Проблеми та перспективи розвитку транспортної системи України / Збірник наукових праць Військової академії. № 2(2). 2014. С. 179–184.

119. Филатов И. П. Повышение качества резательных пенобетонных изделий добавками твердых фаз. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.05; Петербургский гос.ун-т путей сообщения, 2007. 21 с.

120. Юхновський І. Р., Лебеда Г. Б., Попова Т. І. Транспортний комплекс України. Автомобільні дороги: проблеми та перспективи // Міжвід. аналіт.-консультат. рада з питань розв. продукт. сил і виробн. відносин. К.: ФАДА, ЛТД, 2004. 177 с.

121. Якимечко Я. Б. Неавтоклавные газобетоны с полидисперсными наполнителями на основе отходов промышленности // Строительные материалы. 2009. №1. С. 24–26.

122. Amran Y. H. M., Farzadnia N., Abang Ali A. A. Properties and applications of foamed concrete: a review. Construction and Building Materials. Vol. 101, Part 1, 2015. P. 990–1005.

123. A study of fracture toughness of heavy-weight concrete and foam concrete reinforced by polypropylene fiber for road construction / S. Solodkyy, V. Kahanov, I. Hornikovska, Y. Turba // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 4/5 (76). P. 40–46.

124. Awang H., Ahmad M. H. Durability Properties of Foamed Concrete with Fiber Inclusion. Civil, Environment Structure Construction and Architecture Engeeniring. 8, 2014. P. 269–272.

125. Characteristics of Functionally Modified Foamed Concrete by Nano-Silica / T. Sivakumar, P. Prabha, B. Bhuvaneshwari, R. Regupathi // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 3 Issue 5, 2014. P. 1447–1451.

126. Demchyna B., Verba V. Evaluation of reinforcement bonding in foam concrete // Budownictwo i inżynieria środowiska. z. 53. 2009. S. 39–45.

127. Dhir R. K., Newlands M. D., Carthy A. M. Use of foamed concrete in construction // Proceedings of the International conference held at the University of Dundee, Scotland, 2005. London: Thomas Telford, 2005. 174 p.

128. Dolton B., Hannah C. Cellular Concrete: Engineering and Technological Advancement for Construction in Cold Climates // The 2006 Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Calgary, Alberta, Canada, May 23-26, 2006. P. GC-125-1–GC-125-11.

129. Fedorowicz L., Kadela M., Bednarski Ł. Modelowanie zachowania pianobetonu w konstrukcjach warstwowych współpracujących z podłożem gruntowym // Zeszyty naukowe wyższej szkoły technicznej w Katowicach. 2014. № 6. P. 73–81.

130. Fukang D. Mechanical properties and energy-saving effect of polypropylene fiber foam concrete // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. Vol. 6. № 11. P. 2012–2018.

131. Herega A. N. Physical aspects of self-organization processes in composites. The structure and interaction of inner boundaries // Nanomechanics Science and Technology. 2013. V. 4. P. 17–20

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

133. Just A., Middendorf B. Microstructure of high-strength foam concrete // *Materials Characterization*. Vol. 60. Issue 7. 2009. P. 741–748.
134. Lytvyniak O., Demchyna B., Ordon-Beska B. Kombinacje połączenia tradycyjnych i energooszczędnych materiałów w konstrukcjach nowoczesnych budynków // *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2013. № 1 (11). P. 82–89.
135. Kadela M., Kozłowski M., Kukielka A. Application of Foamed Concrete in Road Pavement - Weak Soil System // *Procedia Engineering*. 2017. № 193. P. 439–446.
136. Kgellsen K. O., Atlassi E. H. Pore structure of cement silica fume systems. Presence of hollow shell pores // *Cement and Concrete Research*. 1999. 29. № 1. P. 133–142.
137. Lotov Y. A., Mitina N. A. Optimum porous structure forming for non-autoclave gas-concrete // *KORUS 2002. The 6-th Russian-Korean international Symposium on Science and technology*. Novosibirsk, 2002. Vol 2. P. 320–321.
138. Liu X., Jiang Y. X. Preparation of Foamed Concrete with High-Strength and Low-Shrinkage, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 174–177, 2012. P. 1299–1305.
139. Martynov V., Krylov A. Analysis of Solid Phase Impact on Cellular Concrete Properties // *Journal of technical university of Moldova and Moldavian engineering association*. Meridian inginttres, 2015. №2. P. 35–37.
140. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete / Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, H. Wang // *Cement and Concrete Composites*, 2015. Vol. 62. P. 97–105.
141. Nambiar E. K. K., Ramamurthy K. Air-void characterization of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, 37. 2007. P. 221–230.
142. Nambiar E. K. K., Ramamurthy K. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, 28. 2006. P. 752–760.

143. Namsone E., Šahmenko G., Korjakins A. Durability Properties of High Performance Foamed Concrete // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. P. 760–767.

144. Noraini I. A. R., Zahari M., Mujahid A., Zaidi A. Foamed Concrete: Potential Application in Thermal Insulation. Proceedings of MUCET2009 Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology, 2009. P. 47–52.

145. Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures / P. Zhihua, L. Hengzhi, L. Weiqing // *Construction and Building Materials*. Vol. 72. 2014. P. 256–261.

146. Poznyak O., Melnyk A. Non-autoclaved aerated concrete made of modified binding composition containing supplementary cementitious materials, *Budownictwo i Architektura*. 13, 2014. P. 127–134.

147. Ramamurthy K., Kunhanandan N. E. K., Indu Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, Issue 6, 2009. P. 338-396.

148. Research into structure formation and properties of the fiber-reinforced aerated concrete obtained by the non-autoclaved hardening / Poznyak O., Sanytsky M., Zavadsky I., Braichenko S., Melnyk A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3(6). P. 39–46.

149. Richard, A. O., Ramli M. B. A Qualitative Study of Green Building Indexes Rating of Lightweight Foam Concrete // *Journal of Sustainable Development*. 2011. Vol. 4, № 5. P. 188–195.

150. Roads and car parks on foam concrete. CROW, 2003. 80 p.

151. Schrenk J. Rendering of light weight concrete subsurfaces. New aspect new of practice. *BFT INTERNATIONAL*. 2006. №2. P.140–141.

152. Solodky S. Y., Turba Y. V. Crack resistance of concrete, reinforced with fiber of different types. Weimar: Ibausil, 2012. P. 2-0561–2-0567.

153. Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement / Jun J., Zhongyuan L., Yunhui N., Yuping Z. // *Materials & Design*. Vol. 92. 2016. P. 949–959.

154. Study on Fiber Element Used for Simulate SRC Component / S. S. Zheng et al. // *Applied Mechanics and Materials*, 2012. Vol. 174-177. P. 1285–1289.
155. The energy absorption of modified foamed concrete with rice husk ash subjected to impact loading / J. Hadipramana, A. A. A. Samad, R. Ibrahim et al. // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 11. No. 12. 2016. P. 7437–7442.
156. Wan K.S., Shaohua W., Chaoming P. 3D full field study of drying shrinkage of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2017. Vol. 82. P. 217–226.
157. Yiwang B., Li T., Jianghong G. Pore Structure and Microstructure of Foam Concrete // *Testing and Evaluation of Inorganic Materials. Advanced Materials Research*. Vol. 177. 2010. P. 530–532.
158. Zhukov A. D., Rudnitskaya V. A. Foam concrete reinforcement by basalt fibres // *Vestnik MGSU*. 2012. № 6. P. 83–87.



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)

Державний дорожній науково-дослідний інститут
імені М.П.Шульгіна
ДерждорНДІ

03113 м. Київ,
проспект Перемоги, 57

тел/факс 456-34-15
dornanka@post.com.ua

№ Д.Д. 201-15/1-1055

"08" 11 2010 р.

Довідка про впровадження

Видана аспіранту Національного університету „Львівська політехніка” Горніковській Ірині Богданівні в тому, що матеріали її дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук використані при розробці „Рекомендацій з використання в дорожньому будівництві пінобетонів” Р В.2.7.-218-03450778-681-2007, розроблених згідно науково-дослідної роботи „Розробити рекомендації з використання в дорожньому будівництві пінобетонів” № державної реєстрації 0106U005366.

Заступник директора
з наукової роботи



А. С.Фаль

Товариство з обмеженою відповідальністю

ALGRUP

ГАЛИЧИНА

м. Львів р/р 2600603829315 АЧО 325331 ЗПРУ ІЗ Промбанк м.Львів
ЗКПЄ 2234-960 іпс.код. № 303408613133 ок. № 100271189 телефон (032) 245-41-12

28^{го} січня 2011 р.

№ 2401-4.5

м. Львів

ДОВІДКА

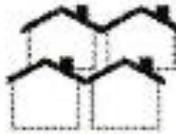
про викрадення

Вилана попіранту Національного університету „Львівська політехніка” Горинівський Ірина Іванівна в тому, що матеріали її дисертаційної роботи на здобуток наукового ступеня владдєва технїчних наук були використанє прекаїтє пєрєдє рємонтї дорєгє на вул. Пєтєрєвєкє м. Львовє у 2010 р.

Директор ТОВ «Галичина»

І.П.Падєла





ТРЕМБІТА
Будівельна компанія

Україна, м. Львів, вул. Битли-Ського, 54 Тел. факс: (032)224-76-17 Email: office@trivillage.com.ua www.trivillage.com.ua

18" лютого 2011р.

№ 1802/11-1

м. Львів

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційної роботи

Комісія в складі голови – директора ТОВ «Трембіта» Савчина М.Ю. і членів: головного інженера Кузьо А.М. та виконроба Павлики М.В. схилює цей акт по факту використання при будівництві автомобільної дороги до коледжних містечка «Сонячна поляна» в с. Новий Ярчів, Кам'янка-Бузького району Львівської обл. результатів досліджень, виконаних аспірантом катедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» Горніковською Іриною Богданівною при розробці дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Вивчивши методику розрахунку та квантування теплоізоляційного пропарку автомобільних доріг з використанням монолітного безавтоклавного пінобетону та порівнявши результати попереднього підрахунку вартості виконання робіт, була встановлена доцільність впровадження теоретичних досліджень у будівельну практику.

Економія матеріальних та трудових ресурсів в процесі виконання будівельних робіт по влаштуванню автомобільної дороги склала 4,5% у порівнянні з використанням традиційного теплоізоляційного насипу. Доцільність практичного застосування результатів даної дисертаційної роботи обумовлюється ще і підвищенням якості доріг та збільшенням міжремонтних термінів їх експлуатації, що дозволить в перспективі зекономити значні кошти пов'язані з поточними ремонтами доріг.

Директор
Головний інженер
Виконроб



Савчин М.Ю.
Кузьо А.М.
Павлик М.В.

УКРАЇНА

ТзОВ "БАЛМІКС"

81053 м.Новозорівськ, вул.Ст.Бандери 11, Львівська обл.
 р/р 26096112501 в ПАТ АКБ "УкрБіа",
 МРО 325268, ЗКДТО 11821684
 тел (032-58) 42-818, 42-488, факс 41-851

"28" вересня 2016р.
 м. Новозорівськ

№ 2809-16-1

Д О В І Д К А
 про впровадження

Вилана аспіранту (асистенту) Національного університету „Львівська політехніка” Горніковській Ірині Богданівні в тому, що матеріали її дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук були використані при виконанні робіт по благоустрою (виготовленні під'їзних доріг та міжквартальних доріжок) під час будівництва даного кварталу «Синьоква» на території ІІІ кв. сільської ради у 2012-2016 рр.

Директор ТзОВ "БАЛМІКС"



Батюцький М.Я.

**Обслуговуючий кооператив «Житлово-будівельний
кооператив**

«Уманський Дім»

Місцевість: Дніпро, м. 21000, Черкаська область, м. Умань, вул. Енергетична буд. 1 Г
 ЄДРПОУ: 39943933
 Впр 2600037-956200
 в ПАТ «УкрСиббанк»
 МФО 951003

13 квітня 2017р.
 м. Умань

№ 13-24-17-2

А К Т В П Р О В А Д Ж Е Н Н Я

результатів дисертаційної роботи

Цей акт складений про те, що при виконанні робіт по благоустрою під час реалізації проєкту «Продовження незавершеного будівництва багатоквартирного житлового будинку з об'єктами обслуговування по вул. Радянській, 11 (Шебеної Солі) у м. Умань» у 2017 р. було запроваджено теплоізоляційний проширок з монолітного неавтотеклавної пінобетону в конструкції дорожнього одягу під'їзних шляхів та під'їзних доріжок.

Використання теплоізоляційного проширку з монолітного неавтотеклавної пінобетону в конструкції дорожнього одягу дозволяє зекономити до 3,6% вартості будівельних робіт у порівнянні із застосуванням традиційних теплоізоляційних матеріалів. А разом з врахуванням збільшення безперервного терміну експлуатації дороги – це дозволяє зекономити до 20 % вартості робіт.

Голова ЖК «Уманський Дім»

Кл. н., доц. кафедри БВ НУ ЛП

Кл. н., доц. кафедри БВ НУ ЛП

Аспірант кафедри БВ НУ ЛП

Сідловський О.В.

Гоголь М.В.

Катанов В.О.

Горішковська І.Б.





ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
"ПРОЕКТНО-ВИШУКУВАЛЬНИЙ ТА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
ІНСТИТУТ ТРАНСПОРТНОГО БУДІВНИЦТВА

"КІЇВДІПРОТРАНС"

вул. С. Пастури 15, оф. 708, м. Київ, 01032, Україна, тел. +38 067 4469120, Е-пошта: info@kdt.com.ua, Код ЄДРПОУ 14360570

Голові спеціалізованої ради
Д 35.052.17
при Національному університеті
«Львівська політехніка»
проф. Бліхарському З.Я.

Проектно-вишукувальним та конструкторсько-технологічним інститутом "КиївДіпроТранс" у 2018-2019рр. були використані результати дисертаційного дослідження Горніковської Ірини Богданівни на тему: "Неавтоклавний пінобетон для шарів дорожніх одягів автомобільних доріг" в процесі розробки конструктивних рішень примикання типу "м'який в'їзд" в місці переходу від земляного полотна (щебеневої основи) до верхньої будови залізничної колії до залізобетонних штучних споруд під'їзних колій на об'єктах ТЦ "Епіцентр" (м. Київ, вул. Кільцева дорога, 1Б) та виробничої бази Київського управління механізації МО України (м. Київ, вул. Бориспільська, 181).

Директор ПВКТІ
"КиївДіпроТранс"



Сахно Т.В.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях та наукових періодичних виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:

1. A study of fracture toughness of heavy-weight concrete and foam concrete reinforced by polypropylene fiber for road construction / S. Solodkyu, V. Kahanov, I. Hornikovska, Y. Turba // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 4/5 (76). P. 40–46. ISSN 1729-3774, Scopus.

2. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Шляхи використання безавтоклавного пінобетону в дорожньому будівництві // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». № 27. 2008. С. 116–121. ISSN 0321-0499.

3. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Дослідження фізико-механічних та експлуатаційних властивостей безавтоклавного пінобетону для дорожнього будівництва // Вісник Донецької національної академії будівництва та архітектури. «Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва». Вип. 6(80). 2009. С. 63–69. ISSN 1814-3296.

4. Горніковська І. Б., Демчина Х. Б., Ковальчик Я. І. Дослідження фізико-механічних властивостей пінобетону, армованого фіброю // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. № 37. 2010. С. 100–112.

5. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Забезпечення морозостійкості конструкції дорожнього одягу та земляного полотна автомобільних доріг // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». № 662. 2010. С. 201–204. ISSN 0321-0499.

6. Каганов В. О., Горніковська І. Б., Івасів І. С. Експлуатаційні характеристики морозозахисного прошарку дорожнього одягу нежорсткого типу з монолітного безавтоклавного пінобетону // Будівельні матеріали та виробы. № 3. 2010. С. 21–23.

7. Взаємний зв'язок міцнісних та деформаційних характеристик безавтоклавного пінобетону / В. Б. Верба, І. Б. Горніковська, Х. Б. Демчина, В. В. Волоцюга, П. О. Голик // Вісник Донецької національної академії будівництва і архітектури «Сучасне промислове та цивільне будівництво». Т. 8. № 1. 2012. С. 28–35. ISSN 1819-432X.

8. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Методика розрахунку величини теплоізоляційного прошарку автомобільних доріг нежорсткого типу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». №737. 2012. С. 71–78. ISSN 0321-0499.

9. Дослідження міцності неавтоклавного пінобетону на розтяг при згині / В. В. Волоцюга, Х. Б. Демчина, І. Б. Горніковська, О. А. Гаврилко // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 5(35). Полтава, 2012. С. 161–165.

10. Горніковська І. Б., Каганов В. О. Деформативні характеристики безавтоклавного пінобетону для шарів дорожнього одягу // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». 2013. № 755. С. 95–99. ISSN 0321-0499.

11. Горніковська І. Б., Каганов В. О. Тріщиностійкість пінобетонів для дорожнього будівництва // Збірник наукових праць «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Вип. 31. Рівне: НУВГП. 2015. С. 305–312.

Матеріали і тези міжнародних та всеукраїнських конференцій:

12. Каганов В. О., Горніковська І. Б. Тріщиностійкість пінобетонів безавтоклавного виробництва. Збірник наукових праць «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Вип. 26. Рівне: НУВГП. 2013 С. 179–185. ISSN 2218-1873

13. Каганов В. О., Горніковська І. Б., Позняк О. Р. Підвищення експлуатаційних властивостей дорожніх одягів автомобільних доріг // Збірник тез доповідей Міжнародної конференції «Структурутворення, міцність та

руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій». 2018. С. 20–22.

Публікації, що додатково відображають наукові результати дисертації:

14. Каганов В.О., Горніковська І.Б. Новітні підходи до використання пінобетону в дорожньому будівництві // Бетон і залізобетон. 2009. №5. С. 21–24.

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

Всеукраїнська Інтернет-конференція молодих учених та студентів "Проблеми сучасного будівництва (Полтава, 2012) – заочна участь;

VIII науково-практичному семінарі "Структура, властивості та склад бетону" (Рівне, 2013) – очна участь;

XI науково-практичному семінарі "Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди" (Рівне, 2015) – очна участь;

Міжнародна конференція "Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій" (Одеса, 2018) – заочна участь.