МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)

на тему**: «Удосконалення технології торкрет-бетонування горизонтальних конструкцій»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1923-пцб-2
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньої програми «Промислове і цивільне будівництво»
Куляк Р.Ю.
Керівник доц., к.т.н. Самченко Р.В.
Рецензент с.н.с., к.т.н. Шокарєв Є.О.

Запоріжжя
2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Промислового та цивільного будівництва
Рівень вищої освіти другий магістерський рівень
Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр та назва)
Освітньо-професійна програма «Промислове і цивільне будівництво»
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ПЦБ
проф. Арутюнян І.А.
«____» _____ 20____ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Куляк Руслан Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Удосконалення технології торкрет-бетонування горизонтальних конструкцій

Керівник роботи Самченко Роман Васильович, к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «**30**»**вересня** 2024 року №**1486-с**
2 Строк подання студентом роботи 27.11.2024 р.
3 Вихідні дані до роботи *Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливості розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об'єкт досліджень, предмет досліджень*
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *проаналізувати фізико-математичну модель, що враховує особливості поведінки частинок торкретбетону при взаємодії з горизонтальною пневмоопалубкою; виконати сплановані експерименти і дати аналіз їх результатів з метою обґрунтування оптимальних технологічних рішень нанесення торкретбетону на горизонтальну поверхню пневмоопалубки*

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Від восьми графічних аркушів із результатами аналітичних обґрунтувань наукового напряму досліджень, результатами експериментальних досліджень, доказами оптимальності запропонованих методик, результатами чисельних розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних методів досліджень*

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Самченко Р.В., доц.		
Розділ 2	Самченко Р.В., доц.		
Розділ 3	Самченко Р.В., доц.		

7 Дата видачі завдання 04.03.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1 Актуальний стан технології нанесення бетонних сумішей	27 вересня	
2	Розділ 2 Дослідження процесу нанесення торкрет-бетону на поверхню	25 жовтня	
3	Розділ 3 Дослідження процесу нанесення торкрет-бетону на горизонтальну поверхню пневматичної опалубки експериментальним шляхом	22 листопада	

Студент _____ Р.Ю. Куляк
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

Керівник роботи _____ Р.В. Самченко
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

Нормоконтроль пройдено _____ Н.О. Данкевич
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

АНОТАЦІЯ

Куляк Р.Ю. Удосконалення технології торкрет-бетонування горизонтальних конструкцій.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник Р.В. Самченко. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2024.

Проведено аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень, який підтвердив ефективність застосування технології торкретування бетонних сумішей із використанням горизонтально розташованих пневмокаркасних опалубних модулів у будівництві. Розроблено фізико-математичну модель, яка враховує особливості поведінки частинок торкрет-бетону при їх взаємодії з горизонтальною пневмоопалубкою, залежно від основних технологічних параметрів. Створено модель установки з системою транспортування бетонної суміші по замкнутому циклу. У ході експериментальних досліджень визначено раціональні значення технологічних параметрів, що забезпечують оптимальну міцність торкрет-бетону.

Ключові слова: торкрет-бетон, опалубка, процес торкретування, бетонна суміш, оптимальні технологічні параметри, ефективність нанесення, технології будівництва, параметри монтажу.

Список публікацій магістранта:

Куляк Р.Ю., Самченко Р.В. Удосконалення технології торкрет-бетонування горизонтальних конструкцій. Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Perspectives of contemporary science: theory and practice» (14-16 листопада 2024 р., м. Львів). Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2024. С. 425-427.

ABSTRAKT

Kulyak R.Yu. Improving the technology of shotcrete concreting of horizontal structures.

Qualification final work for obtaining a higher education degree of master in specialty 192 - Construction and civil engineering, scientific supervisor R.V. Samchenko. Zaporizhzhia National University. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, Department of Industrial and Civil Engineering, 2024.

An analysis of domestic and foreign research was carried out, which confirmed the effectiveness of the use of the technology of shotcrete concrete mixtures using horizontally located pneumatic frame formwork modules in construction. A physical and mathematical model was developed that takes into account the peculiarities of the behavior of shotcrete particles during their interaction with horizontal pneumatic formwork, depending on the main technological parameters. A model of a plant with a closed-loop concrete mixture transportation system was created. During experimental studies, rational values of technological parameters were determined that ensure optimal strength of shotcrete concrete.

Keywords: shotcrete, formwork, shotcrete process, concrete mix, optimal technological parameters, application efficiency, construction technologies, installation parameters.

List of master's publications:

Kuliak R.Yu., Samchenko R.V. Improvement of shotcrete technology of horizontal structures. Materials of the IX International Scientific and Practical Conference "Perspectives of contemporary science: theory and practice" (November 14-16, 2024, Lviv). Lviv: National University "Lviv Polytechnic", 2024. P. 425-427.

ЗМІСТ:

ВСТУП 7

1 АКТУАЛЬНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ 9

1.1 Оцінка практичного використання торкретної технології 9

1.2 Науково-технічні особливості торкретування бетонних сумішей 33

1.3. Ефективність використання пневматичних опалубок в будівництві 43

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ТОРКРЕТ-БЕТОНУ НА ПОВЕРХНЮ 52

2.1 Визначення та обґрунтування основних технологічних параметрів нанесення торкрет-бетону 52

2.2 Моделювання фізико-математичних процесів взаємодії торкретного струменя бетонної суміші з горизонтальною поверхнею пневмоопалубки 58

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ТОРКРЕТ-БЕТОНУ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУ ПОВЕРХНЮ ПНЕВМАТИЧНОЇ ОПАЛУБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ ШЛЯХОМ 72

3.1. Розробка плану проведення експериментальних досліджень технологічних параметрів 72

3.2. Виконання експериментальних досліджень технологічних параметрів процесу та оцінка отриманих даних 86

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 101

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 102

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному будівництві спостерігається тенденція до активного зростання обсягів промислового і цивільного будівництва із широким застосуванням монолітних залізобетонних конструкцій. Основною причиною цього є значне зростання вартості залізобетонних виробів заводського виготовлення, обумовлене підвищенням цін на паливно-енергетичні ресурси. Додатково розвиток висотного будівництва вимагає підвищення просторової жорсткості споруд, що досягається використанням каркасних конструкцій з горизонтальними монолітними залізобетонними елементами. Підвищення ефективності монолітного будівництва потребує вдосконалення технологій приготування, транспортування та укладання бетонних сумішей безпосередньо на об'єктах. Особливої уваги вимагає зниження трудовитрат, які залишаються досить високими в цьому сегменті будівництва. Одним із шляхів вирішення цих завдань є впровадження сучасних механізованих технологій, зокрема використання машин для торкретування бетонних сумішей. Метод торкретування має низку переваг, серед яких можливість механізованого виконання робіт, застосування засобів малої механізації, бетонування конструкцій різної складності без потреби жорстких опалубок або з мінімальним їх використанням, а також можливість безопалубочного бетонування.

Метою магістерської роботи є розробка вдосконаленої технології торкретування бетонної суміші на пневматичні опалубки для створення горизонтальних монолітних конструкцій із врахуванням специфічних технологічних особливостей процесу торкретування.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні **завдання**:

- провести аналіз фізико-математичної моделі, що описує поведінку частинок торкретбетону при нанесенні на горизонтальну пневмоопалубку, враховуючи такі параметри, як продуктивність торкрет-машини, діаметр сопла, відстань до поверхні нанесення, а також натяг тканини пневмоопалубки;

- отримати аналітичну залежність, що пов'язує міцність торкретбетону з основними параметрами процесу торкретування;

- виконати експериментальні дослідження для обґрунтування оптимальних технологічних рішень нанесення торкретбетону на горизонтальну поверхню пневмоопалубки.

Об’єкт дослідження — технологія зведення горизонтальних монолітних бетонних конструкцій із застосуванням пневматичних опалубок.

Предмет дослідження — технологія торкретування бетонної суміші на горизонтальну поверхню пневмоопалубки.

Методи досліджень включали аналіз і узагальнення міжнародного досвіду застосування пневматичних опалубок у будівництві, вивчення сучасних теоретичних і практичних підходів до організації будівельно-ремонтних робіт, проведення теоретичних і експериментальних досліджень, а також аналіз отриманих результатів.

Наукова новизна роботи полягає у визначенні оптимальних технологічних параметрів торкретування бетонної суміші на горизонтальну пневмоопалубку, що забезпечують необхідну міцність торкретбетону.

Апробація роботи. Основні положення роботи опубліковані на IX Міжнародній науково-практичній конференції «Perspectives of contemporary science: theory and practice» у секції «Технічні науки» (2024, м. Львів).

Структура роботи. Структурно робота складається з вступу, трьох розділів, висновків. Загальний обсяг 104 сторінки. Включає 54 рисунка, 8 таблиць, список використаних джерел з 23 пунктів.

1 АКТУАЛЬНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

1.1 Оцінка практичного використання торкретної технології

Термін «торкретування» походить від двох латинських слів: «tectorium» (штукатурка) і «concretus» (ущільнений) [3]. Суть методу торкретування полягає у нанесенні дрібнозернистої бетонної суміші через сопло. Компоненти бетонної суміші подаються по матеріалопроводу і, під дією стисненого повітря, накидаються на оброблювану поверхню. Максимальна крупність заповнювача для торкрет-бетону становить 8–10 мм. При більшій крупності заповнювача (до 20–25 мм) матеріал отримує назву шприц-бетон або набризк-бетон.

Процес торкретування є складним виробничим циклом, що охоплює перемішування, транспортування, укладання та ущільнення бетонної суміші. Вибір оптимальної технології для кожного етапу значно впливає на якість кінцевої конструкції. Згідно з дослідженнями [1], одним із критичних факторів, що визначають якість ущільнення, а отже і міцність конструкції, є збереження характеристик бетонної суміші під час транспортування. У зв’язку з цим технологічні аспекти транспортування будівельних сумішей трубопроводами набувають важливого значення.

Історія використання пневмотранспорту для бетонних сумішей демонструє значний прогрес у цій галузі. Наприклад, у 1958 році пневмотранспорт був застосований для спорудження дериваційного тунелю Алма-Атинської ГЕС №2, протяжність якого становила 5800 м. Було використано бетон класу В12,5 з осадкою конуса 6–8 см, а обсяг бетонування склав 23 тис. м³. У 1960 році на металургійному комбінаті «Магнітобуд» за допомогою пневмонагнітача транспортували 6 тис. м³ бетонної суміші у фундаменти цеху.

На шахтах Кривбасу в 1981 році для доставки та укладання бетонної суміші використовувався пневмоукладач УБ-3 конструкції «Гідрорудмаш», що дозволило подвоїти продуктивність праці. Пневмонагнітальна установка СМЛ-141 продуктивністю 18 м³/год широко застосовувалася у тресті «Спецтоннельстрой» під час виконання робіт із бетонування тунелів.

Серед найпоширеніших пневмонагнітальних установок варто відзначити ПБ-1, виготовлену Мінським дослідно-механічним заводом «Будмаш». Ця установка має місткість 1000 л, оснащена змішувачем і забезпечує транспортування жорсткої бетонної суміші на висоту до 30 м і горизонтально на відстань до 150 м.

У 1980-х роках набули популярності змішувально-нагнітальні агрегати, такі як «Пульсар-1000» і установки «Міксокрет» німецької фірми «Putzmeister». Агрегат «Пульсар-1000» мав продуктивність 8 м³/год і забезпечував транспортування бетонної суміші по горизонталі на 150 м, а по вертикалі на 40 м.

У Франції технології пневматичного транспорту для бетонних сумішей активно застосовуються у різних сферах будівництва. Наприклад, за допомогою установки «Plas» продуктивністю 10 м³/год було укладено 2,5 тис. м³ бетонної суміші під час спорудження багатоповерхового будинку в Парижі.

У США пневмотранспортні установки, які використовуються для транспортування бетонних сумішей, називають бетоноукладниками, оскільки вони забезпечують подачу суміші безпосередньо в опалубку. Ці установки знаходять застосування переважно у будівництві залізничних та гідротехнічних тунелів, підземних колекторів, а також у гірничій промисловості на шахтах і рудниках. Наприклад, під час будівництва гідротехнічного тунелю Моно-Кратерс біля Лос-Анджелеса довжиною 18 км бетонування склепіння виконувалося безперервно протягом трьох змін по 8 годин. Добова укладка бетонної суміші досягала 340 м³, а загальний обсяг укладеної бетонної суміші становив близько 16 тис. м³.

Бетононасоси також активно використовувалися в будівництві. Зокрема, на будівництві Кольської АЕС застосовувалися бетононасоси італійської фірми «Worthington», а на Курській АЕС — установки німецької компанії «Schwing». На Нововоронезькій АЕС перекриття апаратного відділення бетонували за допомогою бетононасоса VP74 фірми «Worthington» із маніпулятором В-526. Подібна техніка використовувалася під час бетонування сховища відходів на Чорнобильській АЕС, що дозволило скоротити трудовитрати на подачу і укладку бетонної суміші в 4 рази.

Розвиток методів транспортування бетонних сумішей спричинив активізацію наукових досліджень у цій сфері. Наприклад, дослідження в області транспортування сипучих матеріалів проводили чеський вчений Я.М. Урбан [12] та радянські науковці М.П. Калінушкін [7] і багато інших. Особливості транспортування розчинів вивчав І.М. Ахвердов [5], який у лабораторних умовах досліджував рух цементного тіста і розчину при перекачуванні насосами. Він встановив, що для цементного тіста при незначних швидкостях зсуву діє закон Шведова-Бінгама. Щодо цементно-піщаного розчину, Ахвердов зазначив, що спочатку долається опір структури тіста, після чого зерна піску вступають у взаємодію і здійснюють зсуви, обертання та перекочування.

С.Н. Алексєєв [4, 5] та В.М. Васильєв [3] досліджували процеси руху бетонної суміші по трубопроводах. Алексєєв дійшов висновку, що бетонна суміш із осіданням конуса 4–8 см рухається без перемішування шарів, за винятком тонкого шару розчину (1–2 мм), що безпосередньо контактує з внутрішньою поверхнею труби. Н.П. Блещик [3] вивчав реологію бетонних сумішей та розробив рекомендації для проектування складу бетонів, що транспортуються трубопроводами.

В.Д. Коюшев [7] досліджував перекачуваність бетонних сумішей, а А.С. Стаценко [1] розробляв рекомендації для забезпечення збереження якості бетонних сумішей під час транспортування трубопроводами. Г.А. Оленін [8] визначав фрикційні характеристики бетонів, а В.Н. Євстіфєєва [5] провела комплексні дослідження, спрямовані на розробку технологій трубопровідного транспортування бетонних сумішей і розчинів. Її роботи включали розробку

принципів проектування машин для транспортування будівельних сумішей і методів визначення їх параметрів.

У дослідженнях Г.Б. Івянського було зосереджено увагу на транспортуванні будівельних розчинів трубопроводами, а також зроблено висновки щодо доцільності такого підходу. Теоретичні та експериментальні роботи, проведені спільно з В.М. Євстіфєєвим у ЦНДІОМТП, визначили основні технологічні параметри транспортування сумішей. Було встановлено вимоги до роботи пневмотранспортних установок, а також розроблено критерії для оцінки якості будівельних сумішей, що перекачуються трубопроводами [9].

Згідно з дослідженнями [7], існує два основні методи транспортування сумішей до сопла, відповідно до яких реалізується торкретування (рис. 1.1):

- Сухий метод: транспортується суха бетонна суміш, яка зволожується лише у соплі.

- Мокрий метод: транспортується готовий бетонний розчин із заданою вологістю.

При сухому методі торкретування суха суміш надходить до трубопроводу через клапанні затвори або транспортується шнеком, підхоплюється стисненим повітрям і доставляється до сопла (рис. 1.2, а). У соплі до суміші додають воду, яка, проходячи через спеціальне водяне кільце, утворює дрібнодисперсний туман. Це забезпечує рівномірне зволоження суміші. Оптимальна відстань подачі води до сопла становить 1-3 м, а тиск води має перевищувати тиск повітря на 0,1 МПа [3].

Для мокрого методу торкретування використовують два способи транспортування бетонної суміші:

1. Суцільним потоком: суміш подається насосами через трубопровід до сопла, де стиснене повітря створює низькоконцентрований потік із підвищеною швидкістю, що наноситься на поверхню (рис. 1.2, в).

2. Потоком із низькою концентрацією матеріалу: бетонна суміш транспортується за допомогою повітря через струменеспрямовуючу трубу (рис. 1.2, б, г).

На рис. 1.3 представлена схема мокрого торкретування, яка демонструє, як суміш подається трубопроводами під дією стисненого повітря [5].

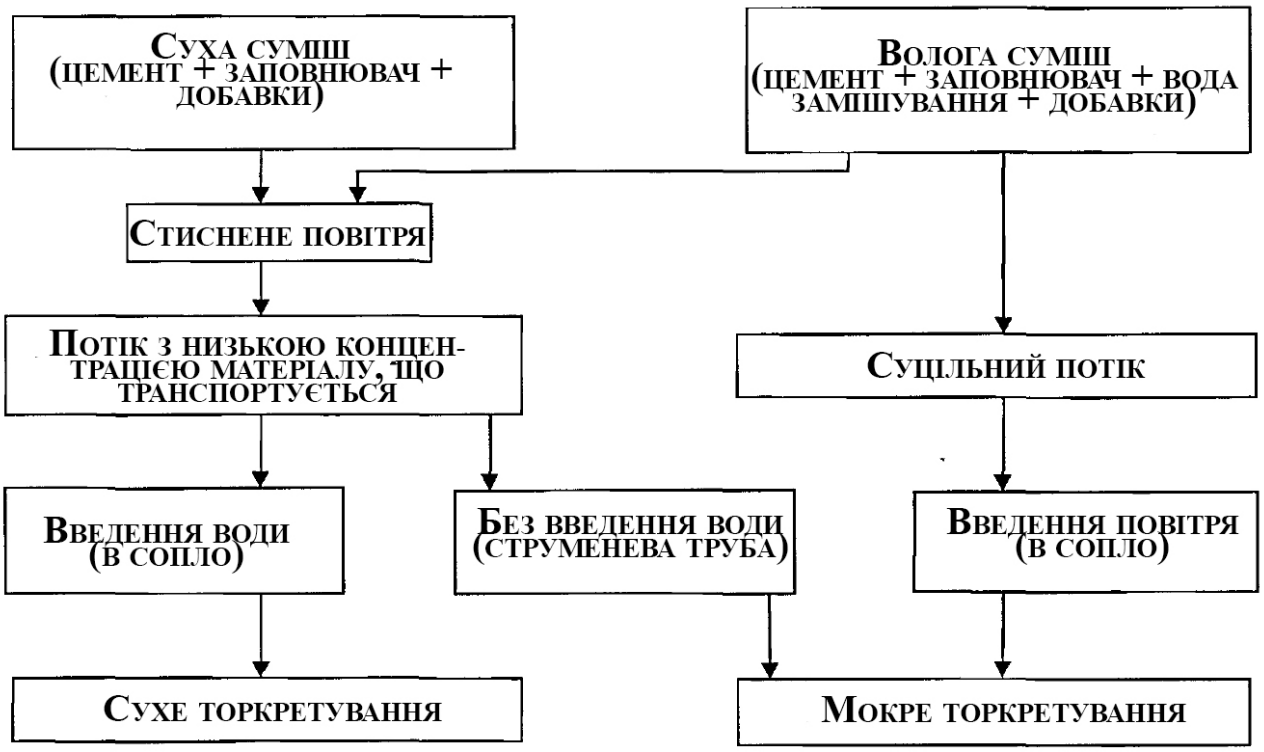


Рисунок 1.1 – Загальна схема виробництва торкрет-бетону

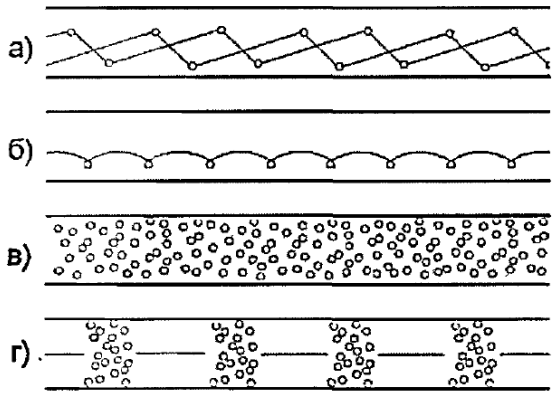


Рисунок 1.2 – Схеми руху матеріалів по трубопроводу:

а - потік з низькою концентрацією матеріалу при сухому способі торкретування; б - потік з низькою концентрацією матеріалу при мокрому способі торкретування -; в - суцільний потік при мокрому способі торкретування; г - потік з окремих порцій (пробок) при мокрому способі торкретування

Для забезпечення стабільності параметрів суміші та її рівномірної подачі було розроблено експериментальний регулювальний пристрій, що дозволяє організувати безперервну циркуляцію бетонної суміші. Ця розробка була виконана з урахуванням необхідності збереження однорідності суміші під час транспортування.

Різноманітні задачі, які вирішуються за допомогою торкретування, сприяли паралельному розвитку технологій та обладнання для обох методів торкретування, що зробило можливим їх широке використання у будівельній галузі.

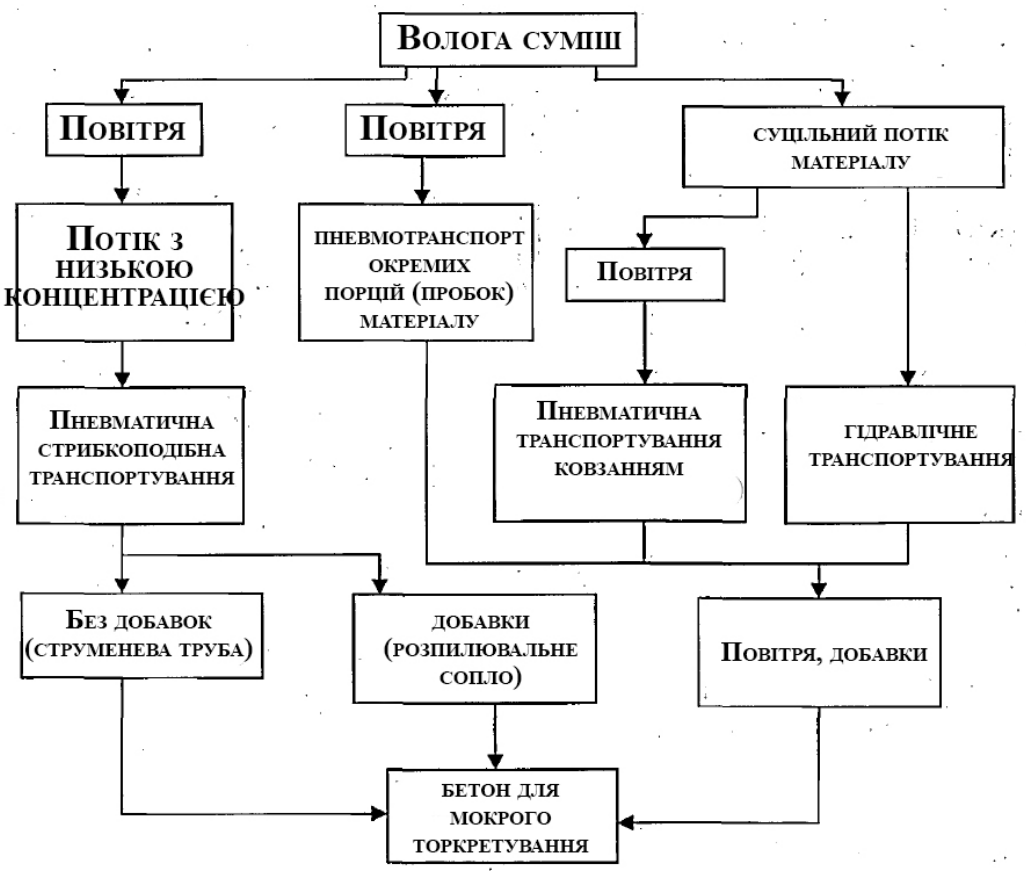


Рисунок 1.3 – Схема транспортування бетонної суміші при мокрому способі торкретування

Для сухого способу нанесення торкрет-бетону основним обладнанням є три типи машин: камерні, шнекові та роторні, які відрізняються як за принципом роботи, так і за методами подачі сухої суміші до робочої камери. Усі ці машини використовують стиснене повітря як транспортний засіб і мають високу продуктивність при роботі з сухими сумішами. Вони здатні працювати із заповнювачами розміром до 20-25 мм, хоча їх робочий обсяг залишається відносно невеликим.

Камерні машини поділяються на одно-, дво- та трикамерні типи. Однокамерні машини працюють у циклічному режимі: після обробки певного обсягу матеріалу їх потрібно зупиняти для завантаження наступної порції сухої суміші. Вони прості в конструкції, надійні та легкі у технічному обслуговуванні. Однак основним недоліком є значна висота машини (близько 1,6 м), зумовлена розмірами робочої камери, необхідність періодичних зупинок, що знижує продуктивність і порушує стабільність подачі суміші, підвищене пилоутворення та ускладнення отримання якісного набризк-бетону. У нашій країні виробляють однокамерні машини, такі як БМ-60П і БМС-3, із продуктивністю 3–4 м³/год (по сухій суміші).

Двокамерні машини здатні працювати у безперервному або циклічному режимі. Їх принцип роботи передбачає наявність двох камер: шлюзової (верхньої) та робочої (нижньої). Поки нижня камера спорожнюється, верхня завантажується новою порцією сухої суміші. Після завантаження верхня камера герметично закривається, а тиск у камерах вирівнюється. Далі затвор між камерами відкривається, і суха суміш пересипається вниз. Потім процес повторюється. Ці машини забезпечують безперервну роботу, проте мають певні недоліки: обмежений обсяг камер (близько 150 л); складність експлуатації через короткий час випорожнення робочої камери (2–2,5 хв); значна висота (до 1,7 м), що ускладнює завантаження, особливо в умовах підземного будівництва. Двокамерні машини виробляються у багатьох країнах, таких як Німеччина, Австрія, США. У нашій країні випускаються моделі БМ-60, С-702, СБ-66 та СБ-67.

Шнекові машини отримали значну популярність для подачі в'язких і гіпсобетонних сумішей. Їх конструкція дозволяє ефективно транспортувати суміш до робочої камери, забезпечуючи рівномірність подачі та високий рівень механізації процесу.

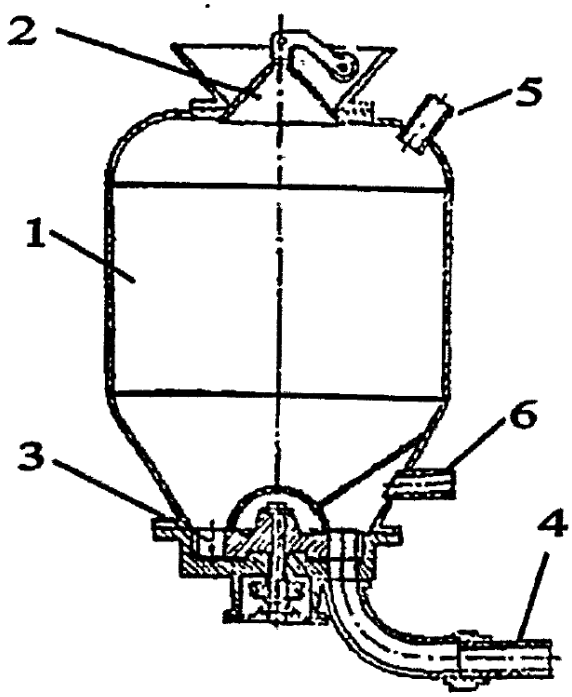


Рисунок 1.4 – Схема однокамерною торкрет-машини:
1 - робоча камера; 2 - колоколообразний клапан; 3 - дозатор; 4 - шланг; 5 - патрубок для подачі стисненого повітря в камеру; 6 - патрубок для подачі сжа-того повітря в видувний вузол

Кожен тип машин для сухого торкретування має свої переваги та недоліки, що визначають їх доцільність у різних умовах будівництва. Однокамерні машини підходять для простих робіт із невеликим обсягом матеріалу, тоді як двокамерні забезпечують безперервність процесу, але вимагають більш складного обслуговування. Шнекові машини є ефективним рішенням для роботи з в'язкими сумішами.

Шнекові машини безперервної дії вирізняються компактними розмірами, простотою конструкції робочого органу, відсутністю клапанів, перемикачів і ущільнювачів, що робить їх зручними у використанні. Невелика висота машин

спрощує процес завантаження, особливо в умовах обмеженого простору. Проте вони мають значні недоліки: високе енергоспоживання та інтенсивний знос шнека. Прикладом шнекових машин є «Аліва-200» швейцарської фірми «Аліва». Її принцип роботи полягає в тому, що суха бетонна суміш подається в завантажувальний пристрій, звідки шнеком транспортується до основи мундштука. У мундштуці суміш ущільнюється, після чого через еластичний конусний мундштук подається в аерокамеру, звідки транспортується по трубопроводу до сопла для нанесення на поверхню. Недоліками шнекових машин є складність герметизації окремих вузлів та значно більша енергоємність порівняно з камерними машинами.

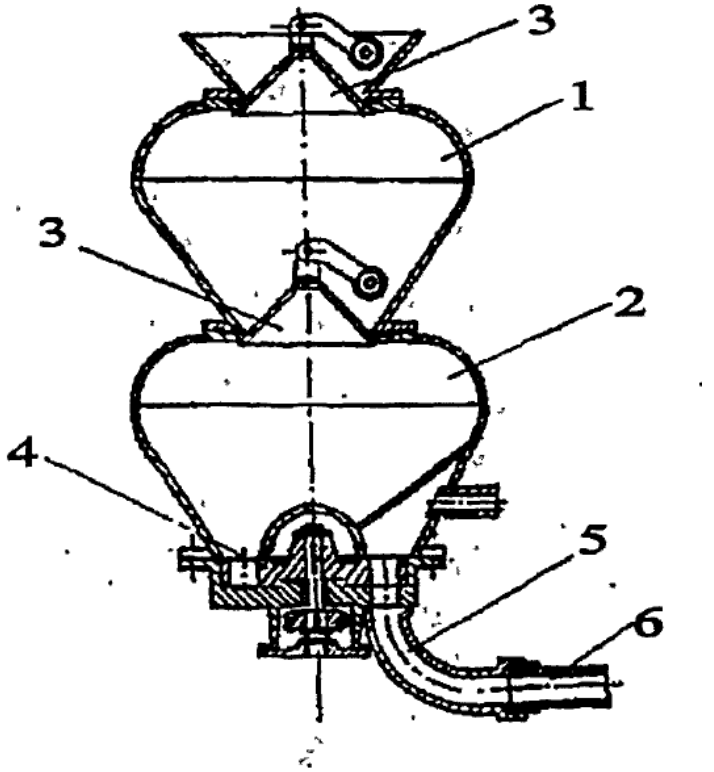


Рисунок 1.5 – Схема двухкамерной машини з тарілчастим живильником
1,2- робочі камери; 3, 4 - клапани; 5 - вихідний патрубок; 6 - шланг

Машини роторного типу є досконалішими пристроями для виконання бетонних робіт методом набризку. Вони працюють безперервно, забезпечуючи рівномірну подачу сухої суміші через завантажувальну воронку до ротора. Суха суміш, потрапляючи в осередки ротора, під дією стисненого повітря транспортується до сопла. Такі машини мають компактні розміри, споживають

менше енергії, ніж шнекові, і вирізняються універсальністю. Наприклад, вони можуть працювати із заповнювачами різної крупності або транспортувати готову бетонну суміш для укладання в опалубку. Універсальність машин роторного типу дозволяє швидко переходити між сухим і мокрим способами торкретування, залежно від умов виконання робіт.

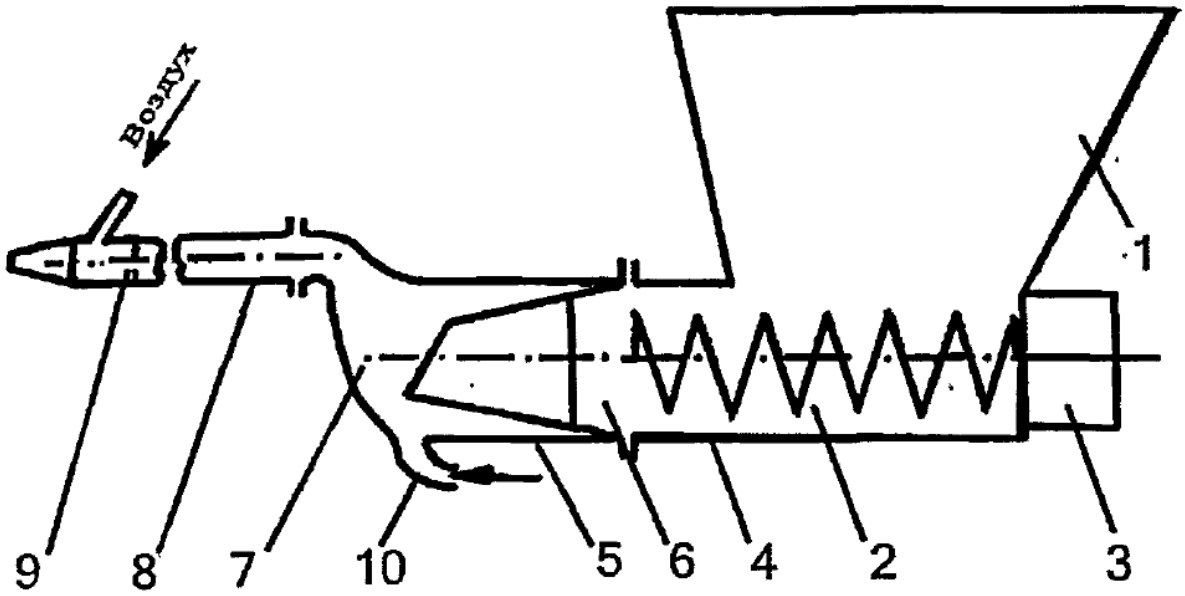


Рисунок 1.6 – Схема шнековой торкрет-машини
1 - завантажувальний пристрій; 2 - шнек; 3 - привід; 4 - корпус; 5 - мундштук; 6 - підстава мундштука; 7 - аерокамера; 8 - бетоновод; 9 - сопло; 10 - повітропровід

Серед закордонних виробників машин роторного типу можна виділити швейцарську компанію «Аліва» (моделі «Аліва-246.5», «252», «263», «285.2»), німецькі фірми «Торкрет» (моделі ОМ-57, ТМ-63) і «Путцмайстер» (моделі 500, 702), чеський виробник машини 88В-22, а також фінську компанію «Spraytec» і австралійську «Cobovis». Ці машини пристосовані до різноманітних умов, мають високий рівень ефективності та універсальності. Наприклад, машина «Аліва-285.2 Універсал» дозволяє швидко змінювати режими роботи, забезпечуючи продуктивність 5–8 м³ суміші на годину та дальність подачі до 300 м по горизонталі та до 100 м по вертикалі для сухого способу.

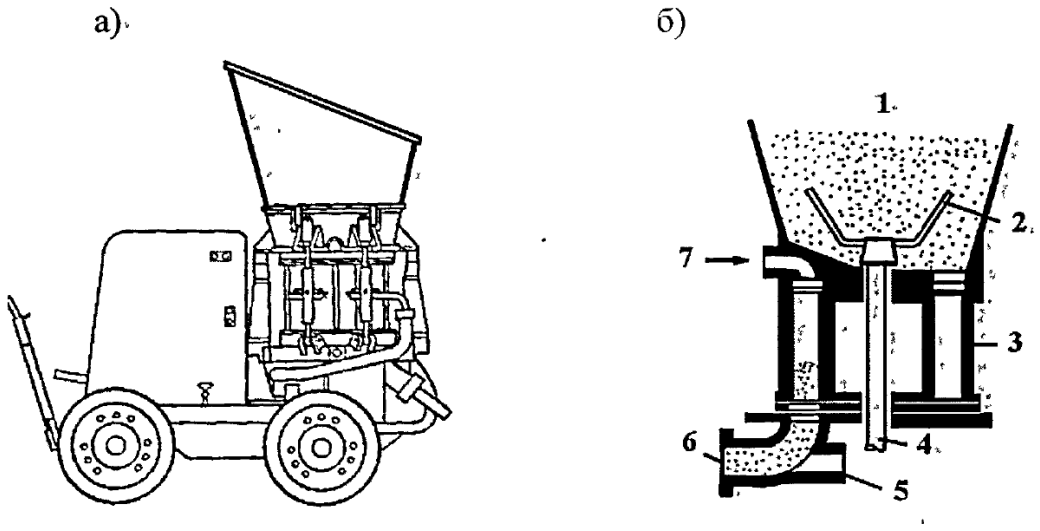


Рисунок 1.7 – Схема машини роторного типу:
а - загальний вигляд; б - вузол завантаження і.видачі сухої суміші з барабана: 1 - загрузочна воронка для сухої суміші; 2 - ротор змішувача; 3 - ротор-дозатор для подачі сухої суміші в вихідний патрубок; 4 - приводний вал; 5 - подача сжатого повітря; 6 - вихідний патрубок; 7 - додаткова подача стисненого повітря

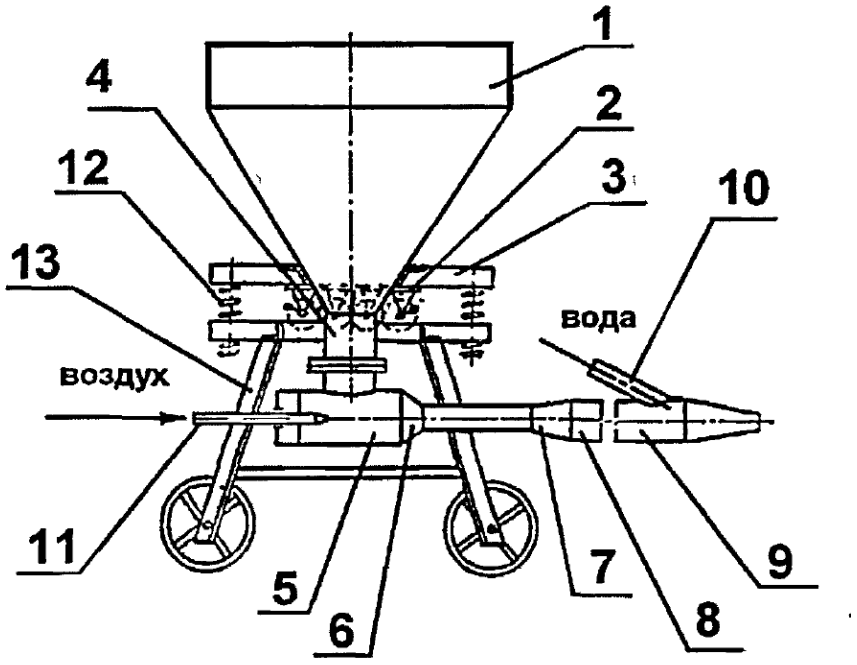


Рисунок 1.8 – Схема віброежекціонной торкрет-машини УЕТ:
1 - вібробункер; 2 - вібромайданчик; 3 - вібратор; 4 - патрубок; 5 – приймальня камера ежектора; 6 - камера змішування; 7 - дифузор; 8 – матеріальний шланг; 9 - сопло; 10 - водяний шланг; 11 - повітряна трубка; 12 - пружинні блоки; 13 - опорний пристрій

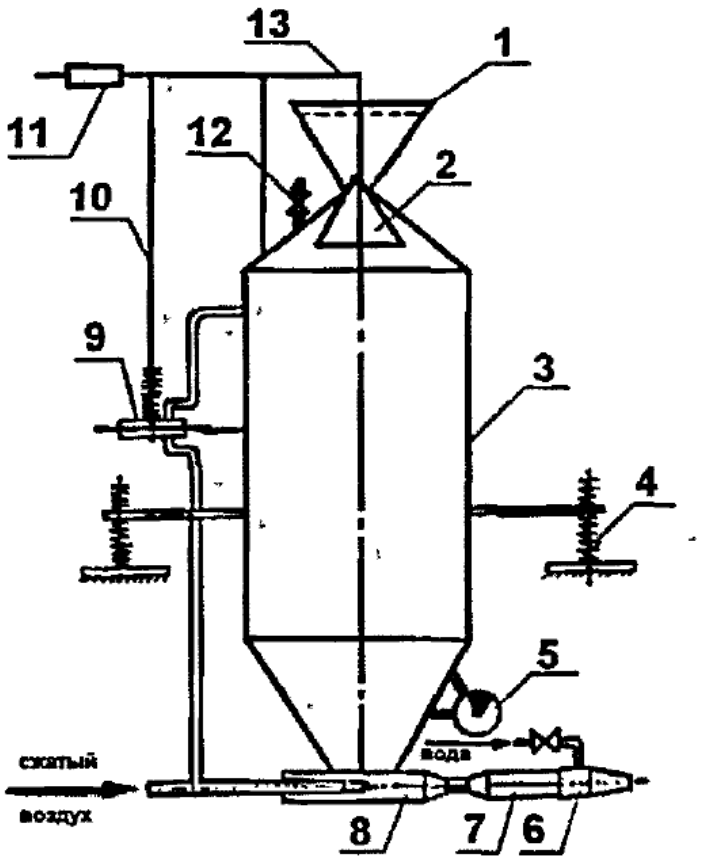


Рисунок 1.9 – Схема торкрет-машини з безперервним завантаженням:
1 - завантажувальний бункер; 2 - затвор; 3 - робоча ємність; 4 - пружинні опорні блоки; 5 - вібратор; 6 - сопло; 7 - трубопровід; 8 - ежектор; 9 - клапанна камера; 10 - трубопровід; 11 - противагу; 12 - повітряний кран; 13 - двуплечий важіль

У нашій країні також випускаються роторні машини, такі як С-320, БМ-68, БМ-70 і СБ-117. Вони широко застосовуються для виконання бетонних робіт методом торкретування завдяки своїй надійності та продуктивності.

Аналіз літератури дозволив виділити установки ежекційного торкретування, які мають свої переваги: простота конструкції, мала вага, зручність у транспортуванні та експлуатації. Основним принципом роботи цих установок є використання струменя стисненого повітря для транспортування сухої суміші, що забезпечує рівномірність нанесення матеріалу. Проте їхнім основним недоліком є обмежена дальність подачі матеріалу, яка складає до 20 метрів по горизонталі та до 5 метрів по вертикалі.

Ежекційні установки зазвичай застосовуються для невеликих ремонтних робіт, таких як відновлення бетонних і залізобетонних конструкцій. Прикладом є використання установки при нанесенні торкрет-бетону товщиною 5 см на поверхню площею 21,000 м² під час будівництва мосту через річку Лопотня. Результати таких робіт показали, що міцність нанесеного бетону перевищує міцність традиційних віброваних бетонів на 15–25%.

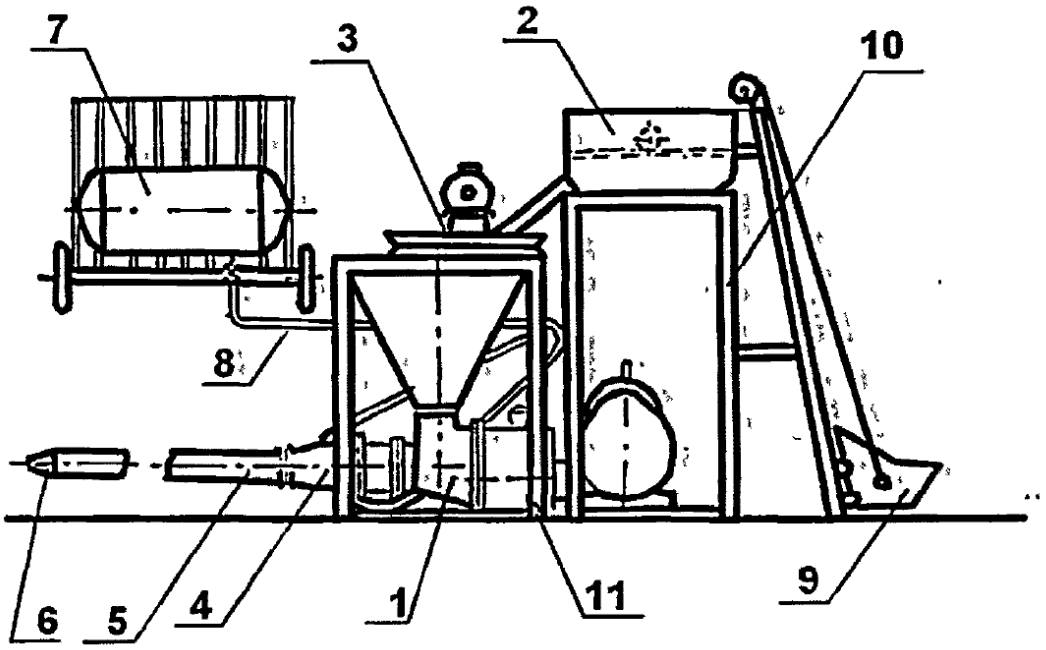


Рисунок 1.10 – Схема установки Н. С. Марчукова:
1 - бетононасос; 2 - бетономішалка; 3 - вібросито; 4 - камера змішувача;
8 - шланги; 6 - сопло; 7 - компресор; 9 - підйомник; 10 - стійки; 11 - рама

Згодом було розроблено торкрет-машини з безперервним завантаженням бункера, які забезпечували вищу ефективність у порівнянні з попередніми моделями. Принцип їх роботи базувався на поєднанні вібрації та ежекційного транспортування, що дозволяло підтримувати постійний тиск і рівномірно подавати суху суміш до сопла.

Мокрий спосіб торкретування потребує спеціалізованого обладнання, але деякі машини, які використовуються для сухого способу, можна адаптувати до мокрого методу. Наприклад, роторні машини, такі як БМ-68 і БМ-70, можуть

оснащуватися додатковими комплектами обладнання для роботи з мокрою сумішшю. Такі установки забезпечують подачу суміші з діаметром заповнювача до 40 мм і продуктивність 10–14 м³/год.

Сучасні установки для мокрого торкретування розробляються з використанням різних принципів транспортування суміші. Наприклад, машини американської фірми «Challenge» або німецької «Montanbüro» транспортують суміш за допомогою насосів, тоді як обладнання від французької фірми «Lancy» або німецької «Putzmeister» використовує принцип пневмотранспорту. Загалом такі машини включають розчинонасоси, компресорні станції, бетонозмішувачі та спеціальні сопла для нанесення бетону.

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що вибір конкретної установки залежить від умов виконання робіт, доступності обладнання та вимог до якості торкрет-бетону.

Однією з найбільш сучасних установок для мокрого способу торкретування є насос «Алів Денсо 275» (Швейцарія). Цей насос відрізняється інноваційним механізмом перемикання з режиму всмоктування на нагнітальний шляхом повороту спеціальних циліндрів, що значно підвищує ефективність його роботи порівняно з аналогами. Особливістю насоса є використання короткого ходу подаючого циліндра, що забезпечує високу якість роботи навіть із жорсткими бетонними сумішами. Основні характеристики: висота 1750 мм, ширина 1600 мм, довжина 4450 мм, маса близько 2450 кг, потужність двигуна 35-37 кВт, місткість воронки 220 літрів, продуктивність до 20 м³/год. Простота конструкції забезпечує надійність експлуатації цього насоса.

Іншою ефективною установкою для мокрого способу торкретування є «Пневмобетон» ПБ-1 (рисунок 1.11). Ця установка побудована на рамі з санчатами, що дозволяє транспортувати її на будівельних майданчиках. Принцип роботи включає заповнення робочої камери бетонною сумішшю, герметизацію камери, подачу стисненого повітря для транспортування суміші через гнучкі рукави до сопла, звідки вона наноситься на поверхню. Робота установки

циклічна, а її продуктивність залежить від часу завантаження і дальності подачі [8].

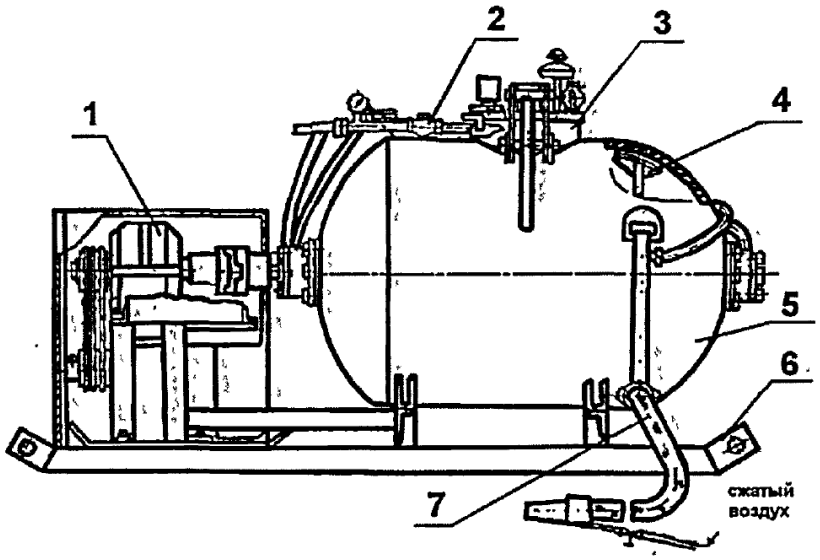


Рисунок 1.11 – Схема установки для подачі і нанесення торкрет-бетону "Пневмобетон" ПБ-1:
1 - привід; 2 - пневмосистема; 3 '- завантажувальний люк; 4 - стимул; 5 - робоча камера; 6 - рама; 7 - бетоновод

Розроблена у ВНІІОМШЄ універсальна пневмобетонна машина ПБМ місткістю до 4 м³ (рисунок 1.12) є багатофункціональною. Вона дозволяє наносити торкретбетон із заповнювачами крупністю до 10 мм, здійснює транспортування, дозування складових, приготування бетонної суміші та її нанесення. Продуктивність машини становить 8-11 м³/год при дальності подачі до 200 м [13]. Однак значні розміри та висока матеріаломісткість до 11,3 т є її недоліками.

Практичний досвід використання торкретування вказує на шкідливі умови праці для операторів, зокрема через високий рівень відскоку суміші та можливість утворення пробок у матеріальних шлангах. Аналіз технічних можливостей існуючого обладнання виявив основні критерії ефективності: продуктивність, простота конструкції, забезпечення рівномірного подавання суміші, легкість обслуговування та роботи.

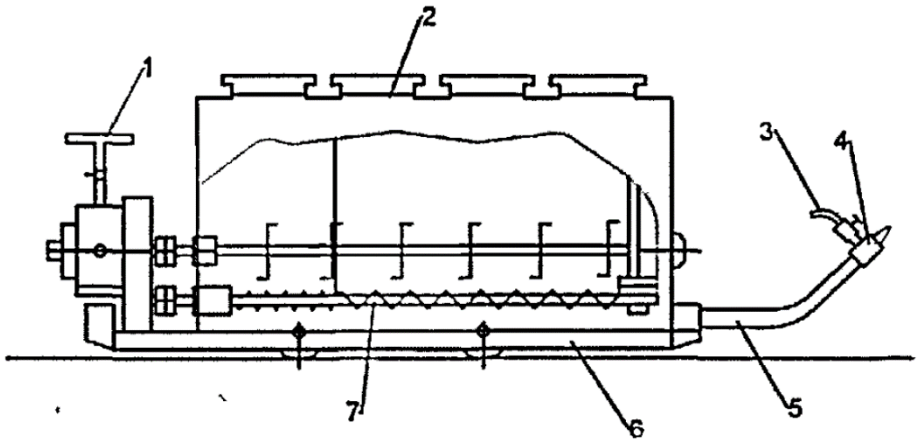


Рисунок 1.12 – Схема машини ПБМ для нанесення торкрет-бетону: 1 - повітропровід; 2 - машина ПБМ; 3 - шланг для води; 4 - сопло; 5 - матеріальний шланг; 6 - пересувна платформа; 7 - горизонтальний шнек

Відскік торкрет-бетонної суміші від оброблюваної поверхні, зумовлений високими швидкостями польоту струменя і невеликими відстанями від сопла до поверхні, супроводжується потраплянням крапель суміші та пилу в зону роботи сопловщика. Вимоги техніки безпеки виробництва робіт, додаткові складнощі торкретування на складних будівельних об'єктах, а також в обмежених умовах будівництва й тунелебудування, сприяли появі торкрет-маніпуляторів. Ці машини здебільшого оснащені гідравлічним приводом і можуть використовуватися як окремий модуль (наприклад, телескопічна торкрет-стріла з електроприводом і розпилювальним соплом для нанесення бетонного розчину з можливістю монтажу на існуючий гідропідйомник), або як пристрій на технологічному шасі для переміщення в межах будівельного об'єкта. Переміщення сопла біля оброблюваної поверхні здійснюється за допомогою спеціальних маніпуляторів, керованих дистанційно. Загальний вигляд маніпуляторів фірми Meus (Швейцарія) наведено на рисунку 1.13.

Важливим конструктивним елементом для нанесення торкрет-бетону є розпилювальне сопло, яке збільшує швидкість потоку бетонної суміші на виході. Розпилювальне сопло — це конічний, циліндричний або сплющений відрізок труби з пристроєм для подачі води, повітря або добавок до транспортованого

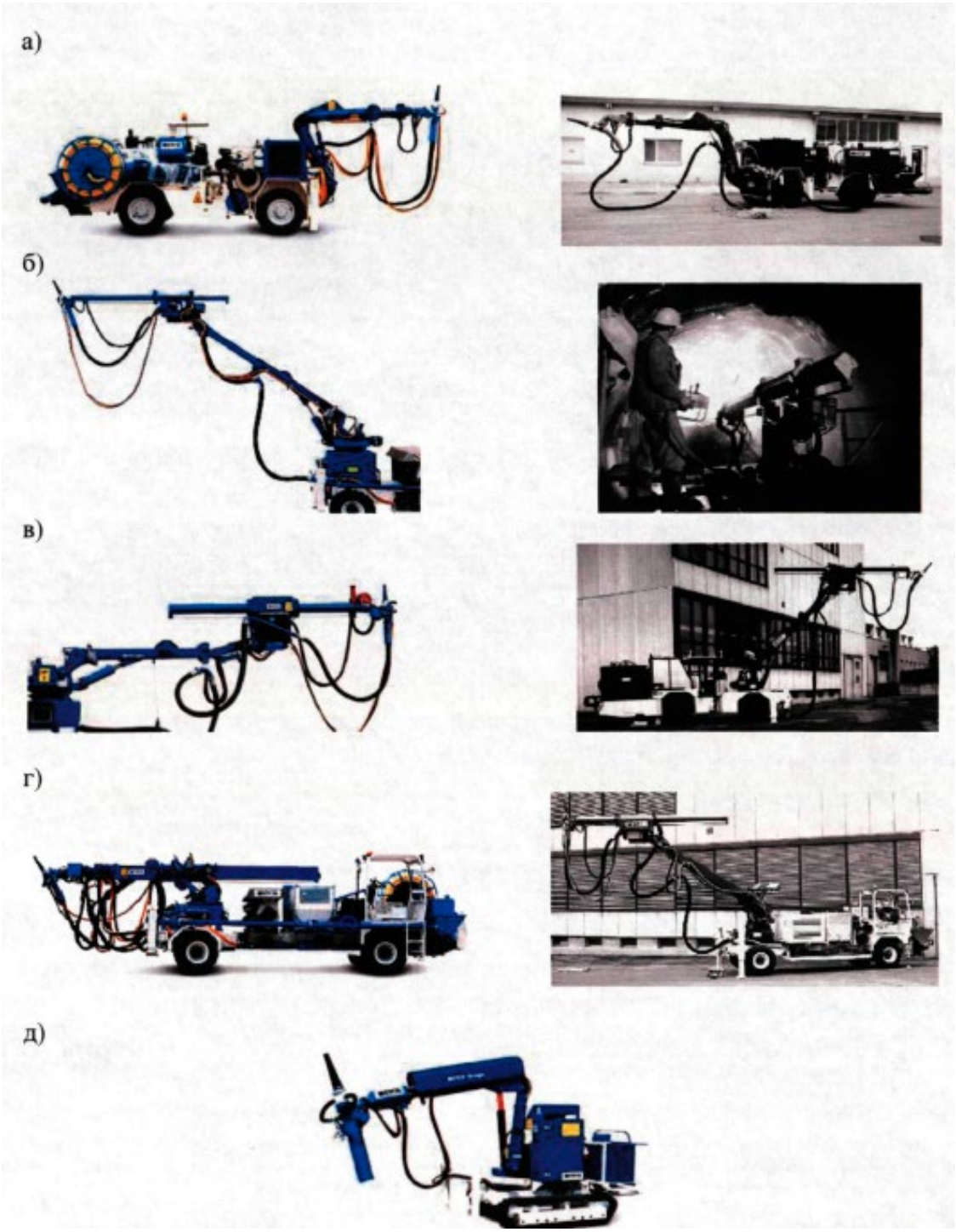


Рисунок 1.13 – Торкрет-маніпулятори фірми Меус (Швейцарія)
а) Meyco Cobra, б) Meyco Robojet, в) Меус Robojet Logica,
г) Меус Potenza, д) Меус Oruga

матеріалу [9]. Його використовують як для сухого, так і для мокрого торкретування.

Аналіз існуючих конструкцій сопел, застосовуваних у різних установках, дозволив визначити основні параметри та конфігурації сопел, які представлені на рисунку 1.14. На основі вивчення вітчизняної та зарубіжної практики застосування торкрет-бетону [5] та методів торкретування, було виконано порівняльний аналіз переваг і недоліків сухого та мокрого методів торкретування. Результати аналізу наведено в таблиці 1.1.

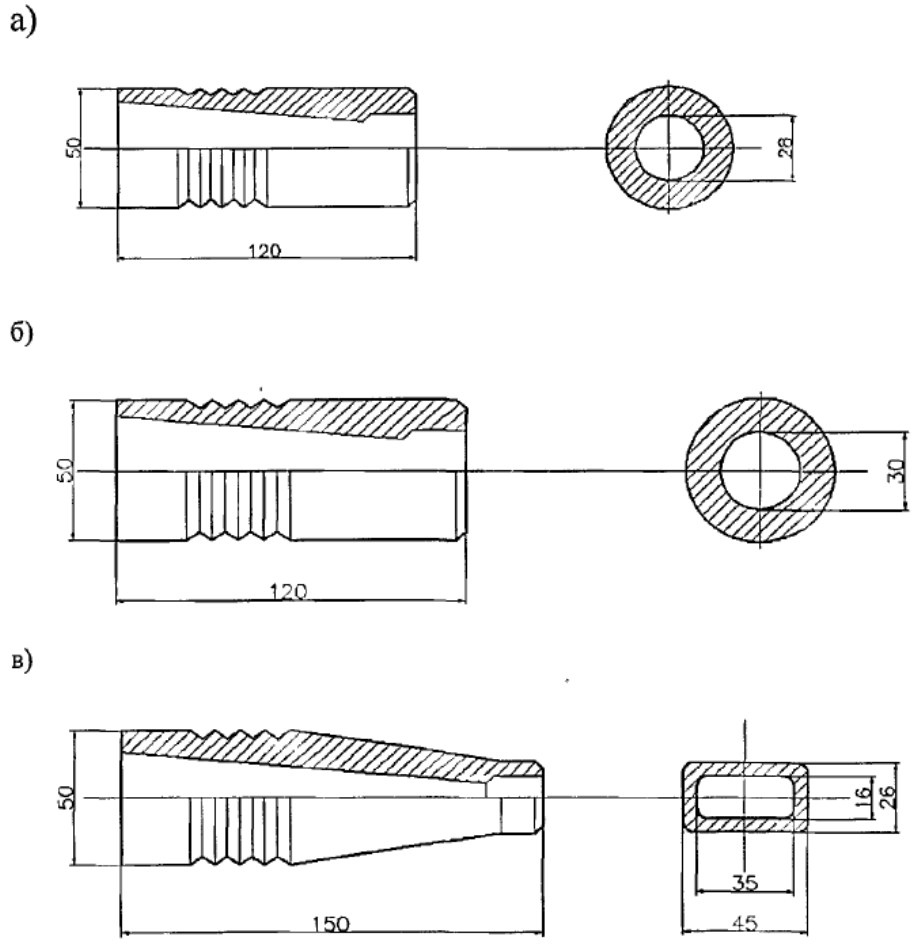


Рисунок 1.14 – Схеми сопел для нанесення бетонних сумішей: а - на вертикальні поверхні; б - на горизонтальні поверхні зверху - вниз; в - при замонолічування стиків

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз сухого і-мокрого торкретування з використанням різного обладнання

Метод торкретування	Переваги	Недоліки
Сухий	1. Тривалий термін зберігання вихідних компонентів. 2. Відсутність залишків вихідної суміші торкретбетону після закінчення робіт. 3. Велика дальність транспортування Пневмоустановка сипучих матеріалів. 4. Простота і універсальність обладнання. 5. Енерговитрати машин менше. 6. Маса і вартість машин менше. 7. Робітникові-торкретчіку легше працювати з соплом.	1. Висока швидкість транспортування матеріалів по трубопроводу (до 150м / с). 2. Значний обсяг відскоку від оброблюваної поверхні (до 40%). 3. Високий ступінь пилоутворення, що створює шкідливі умови праці сопловника. 4. Високий витрата стисненого повітря. 5. Необхідність підсушувати вологі компоненти і, як наслідок, необхідність влаштування на будмайданчику закритого складу для проміжного зберігання запасу наповнювачів для зниження їх вологості. 7. Оптимальне значення водоцементного відносини знаходиться в дуже вузьких межах, і, як наслідок, потрібна вища кваліфікація сопловщіка для регулювання суміші на виході з сопла.

Продовження табл. 1.1

Метод	Переваги	Недоліки
		8. Час перемішування вихідної суміші збільшено у порівнянні з мокрим. 9. Досить високі витрати на деталі, що зношуються.повітря. сопла.
Мокрий	1. Можливість більш точного дозування вихідних компонентів і водоцементного відносини. 2. Менша швидкість підльоту частинок суміші до оброблюваної поверхні (до 50м / с), що супроводжується зниженням відскоку матеріалу. 3. Зменшення пилоутворення. 4. Зниження витрати стисненого повітря. 5. Не потрібно обмежувати вологість заповнювача. 6. У вологій суміші можна більш стабільно підтримувати її рівномірність і якість. 7. Добавки можна вводити в меншій кількості, ніж при сухому методі. 8. Продуктивність вище. 9. Робочий-торкретчік не може змінювати водоцементное відно шення на виході з сопла, тому вимоги до його кваліфікації нижче.	1. Велика трудомісткість ра-бот. 2. Менша дальність транспортування трубопроводами. 3. Час використання приготовленої бетонної суміші обмежена. 4. В кінці бетонних робіт необхідно прибирати невироблена бетонну суміш. 5. Робітникові-торкретчіку важче працювати з соплом. 6. Енерговитрати машин вище. 7. Маса і вартість машин вище. 8. Надмірний тиск в матеріалопроводи вище. 9. Виключена можливість навіть короткочасних перерв у торкретуванні без трудомісткою операції промивки матеріалопроводи (Відбувається його закупорка).

Порівняння експлуатаційних характеристик обох методів торкретування показало, що мокрий метод має ряд переваг, які роблять його більш популярним у будівельному виробництві. Особливо помітними є такі недоліки сухого методу, як запиленість робочого місця, необхідність постійно регулювати витрату води та візуально контролювати якість бетону, а також нижча продуктивність обладнання. Мокрий метод дозволяє знизити швидкість підльоту частинок до поверхні, що важливо при використанні пневмоопалубки, оскільки це зменшує негативний вплив на міцність конструкції.

Мокрий спосіб торкретування включає три технології транспортування бетонної суміші: потік з низькою концентрацією матеріалу, пневмотранспорт окремих порцій (пробок) матеріалу та суцільний потік. Машини, що працюють з окремими порціями, транспортують суміші, непридатні для перекачування, і здебільшого використовуються для доставки матеріалу. Порівняльний аналіз технологій транспортування бетонних сумішей потоком з низькою концентрацією матеріалу та суцільним потоком наведено в таблиці 1.2.

В результаті порівняльного аналізу технологій транспортування бетонних сумішей при мокрому способі торкретування була обрана технологія подачі бетонної суміші по матеріалопроводу суцільним потоком. Це рішення забезпечує підвищену ефективність роботи обладнання для торкретування завдяки рівномірності подачі, постійності складу суміші, вищій продуктивності, зниженню ударного впливу струменя торкрет-бетону на пневмоопалубку та зменшенню відскоку при обробці вертикальних поверхонь.

Однією з сучасних машин, які відповідають цим вимогам, є машина словацького виробництва Р-13, оснащена двоплунжерним насосом із зрівноважувальним поршнем. Її технічні характеристики наведені в таблиці 1.3. Машина Р-13 має компактну мобільну конструкцію, встановлену на рамі з колесами, що забезпечує зручність її переміщення між об’єктами. До її складу входять бетономішалка, насос і система транспортування суміші, що дозволяє виконувати торкретування з високою якістю.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз технологій транспортування бетонних сумішей по матеріалопроводи до розпилювальні сопла при мокрому способі торкретування з використанням різного обладнання

розряджений потік	суцільний потік
1. Водоцементное відношення нижче (0,38 - 0,44) і може бути зменшено за рахунок введення добавок.	1. Водоцементное відношення (0,440,5)
2. Витрата цементу (270 - 350 кг / м-*), напруги усадки і повзучості нижче.	2. Витрата цементу 330 - 450 кг / м3.
3. Зчеплення з основою вище через більшої швидкості частинок суміші в момент зіткнення з поверхнею бетонування.	3. Продуктивність вище.
4. Ступінь ущільнення торкрет-бетону вище.	4. Легше підтримувати рівномірність і якість транспортованої бетонної суміші.
5. Кількість вводяться в разі потреби добавок менше, і, як наслідок, менше знижується міцність конструкції.	5. Знос машин і матеріалопроводів нижче.
6. Енерговитрати, маса і вартість машин нижче.	6. Потреба в стислому повітрі дуже низька.
7. Кількість відскоку 20 - 30%.	7. Кількість відскоку 5 - 10%.
8. Консистенція вологою суміші 1-2	8. Консистенція вологою суміші 2-3.

Аналіз науково-технічної літератури дозволив сформулювати основні технологічні вимоги до процесу торкретування:

- Сопло при нанесенні торкрету повинно розташовуватися перпендикулярно до оброблюваної поверхні.

- Торкретування здійснюється спіралеподібним рухом сопла з перекриттям нанесеного шару на 20 см.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики установки Р-13

Корисна ємність мішалки, л	170
Корисна ємність усереднювача, л	200
Номінальна продуктивність насоса:	
на першій передачі, м / ч / л / хв	1,5
на другій передачі, м 4 / ч / л / хв>	3,0*
на третій передачі, м3 / год / л / хв	4,8
Дальність подачі:	
по горизонталі, максимальна м	500
по вертикалі, максимальна м *	60
Допустиме тиск в транспортному трубопроводі, Па	5 88,4.10^4
Номінальний умовний діаметр транспортного	
трубопроводу, мм	35 и 50
Продуктивність компресора, м3 / год	24
Загальна встановлена потужність, кВт	10’
рід струму	50 Гц, 380 В’
Швидкість обертання валу мішалки, об / хв	52
Швидкість обертання валу усереднювача; об / хв	52
Максимальна зернистість перекачується розчину, мм	8
Габарити агрегату:	
висота, мм	1500
ширина, мм	1600
довжина, мм	3000
Маса агрегату (без приладдя), кг	900
Максимальна швидкість пересування, км / год	15

- Товщина шару, що наноситься за один раз, не повинна перевищувати 15 мм на горизонтальних і вертикальних поверхнях, 25 мм — на вертикальних поверхнях при нанесенні зверху вниз, та 50 мм — на горизонтальних поверхнях.

- Перед нанесенням наступного шару поверхню попереднього необхідно зволожувати.



Рисунок 1.15 – Загальний вигляд торкрет-машини Р-13 для пневмонанесенія бетонної суміші

- Кожний наступний шар наноситься після схоплювання попереднього, через 24 години.

- Загальна товщина торкрет-бетонного покриття визначається проєктом.

Рекомендовані відстані від сопла до оброблюваної поверхні значно варіюються залежно від джерела та методу торкретування. Для сухого методу рекомендовані відстані становлять від 0,7 до 2,0 м, для мокрого методу — від 0,5 до 1,8 м. Найбільш точними вважаються значення 0,95–1,00 м, особливо для нанесення другого та наступних шарів торкрет-бетону. Важливо, що всі ці рекомендації здебільшого стосуються торкретування вертикальних поверхонь.

Для проведення експериментальних досліджень було обрано мокрий метод торкретування із використанням торкрет-машини Р-13. Для транспортування бетонної суміші застосовуватиметься гідравлічний метод із подачею суміші суцільним потоком через поршневий насос, а повітря додаватиметься

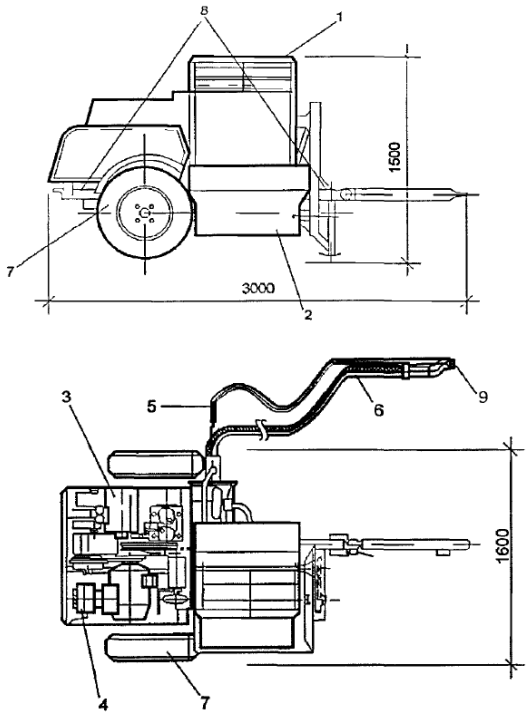


Рисунок 1.16 – Схема машини Р-13 для нанесення бетонної суміші:
1 - бетономішалка; 2 - бункер; 3 - насос; 4 - електрообладнання; 5 - повітропровід; 6 - матеріальний шланг; 7 - ходова частина;
8 - несуча рама; 9 - сопло

безпосередньо перед розпиленням. Для нанесення торкрет-бетону використовуватиметься стандартне сопло з круглим перерізом, спеціально призначене для обробки горизонтальних поверхонь.

1.2 Науково-технічні особливості торкретування бетонних сумішей

Одним із ключових аспектів технології торкретування бетонних сумішей на податливу пневмоопалубку є забезпечення достатньої міцності матеріалу, що наноситься, із одночасним мінімізацією відскоку. Важливу роль у цьому процесі відіграє розуміння закономірностей формування міцності торкрет-бетону та вплив основних технологічних факторів приготування і нанесення суміші.

Одним із таких факторів є взаємодія торкретного струменя з поверхнею пневмоопалубки.

Міцність торкрет-бетону при сталому водоцементному відношенні та заданому гранулометричному складі визначається процесом структуроутворення. У роботах Д.М. Голіцинського та Я.І. Марена [4] описано, як процес структуроутворення набризк-бетону пояснюється з позицій фізико-хімічної механіки матеріалів. Основною метою цього підходу є спрямоване структуроутворення, що передбачає створення максимально міцної структури для матеріалів із заданим складом.

Академік П.А. Ребіндер [8] образно описав цей процес: «шлях до міцності лежить через руйнування». У цементних бетонах твердіння відбувається за рахунок кристалізаційного структуроутворення, яке починається з формування первинної коагуляційної структури в дисперсних системах цементу, заповнювача та води. Коагуляційні структури, зчеплені слабкими (вандерваальсовими) взаємодіями, мають порівняно низьку міцність. Формування остаточної щільної кристалізаційної структури забезпечується прямим зрощенням кристалів гідратних новоутворень, що виділяються із перенасиченого водного розчину.

Процес торкретування сприяє руйнуванню слабких коагуляційних зв'язків. За рахунок високої швидкості (140–170 м/с) зерна заповнювача, що вилітають із сопла, створюють пошарове трамбування матеріалу, що забезпечує механічний і фізико-хімічний вплив. У процесі трамбування віджимається зайва вода, а добавки-прискорювачі сприяють швидкому набору початкової міцності щільної структури торкрет-бетону.

Додатковим ефектом є так зване «розпорошення цементних зерен» [4], яке забезпечує очищення поверхні цементних мінералів від нальотів. Це підвищує активність цементу, прискорюючи процес структуроутворення цементного каменю, особливо на ранніх етапах твердіння [5]. Таким чином, технологія торкретування, враховуючи фізико-хімічні особливості процесу, дозволяє отримати матеріал із високими показниками міцності та довговічності.

Більша увага вивченню процесу структуроутворення в ході ущільнення наноситься .смесі приділено в роботі М.Г. Дюженка [3]. Виконані дослідження дозволили виділити найважливіший параметр; що визначає якість ущільнення, а, отже, і міцність конструкції. Таким параметром є відносна, глибина проникнення ДПР (відношення абсолютної глибини проникнення до поперечного розміру проникаючої частки), що визначається; формулою:

$$\Delta_{пр} \approx 0{,}52 \cdot К_{пр} \cdot \rho \cdot v^{`}, \quad (1.1)$$

де Кпр - емпіричний коефіцієнт проникнення; р - щільність частки, кг / м3; V - швидкість частинки в момент удару об поверхню, м / с.

Встановлено, що оптимальне значення відносної! Глибини проникнення знаходиться в межах 0,65 - 0,80, що відповідає швидкості * польоту зерна 50 ... 60 м / с.

Оптимальне значення відносної глибини проникнення частинок торкрет-бетону в шар матеріалу встановлено в межах 0,65–0,80, що відповідає швидкості польоту зерен заповнювача 50–60 м/с. Як показує формула (1.1), відносна глибина проникнення визначається властивостями матеріалу, вираженими через емпіричний коефіцієнт, а також кінетичною енергією частинок, яка залежить від швидкості і маси зерен.

Цей вираз закладає основний принцип підбору раціональних сполучень технологічних параметрів при прогнозуванні міцності торкрет-бетону. Основний принцип полягає в необхідності збільшення енергії проникнення частинок до рівня, що обмежується здатністю укладеного шару матеріалу опиратися проникненню нових частинок. При цьому досягається ідеальне ущільнення і потрібна міцність торкрет-бетону.

На основі підходів, розроблених у роботах М.Г. Дюженка, встановлено, що основними технологічними параметрами, які мають найбільший вплив на фізико-механічні властивості набризк-бетону, є:

- водоцементне відношення;
- форма зерен і гранулометричний склад заповнювача;
- продуктивність компресора і швидкість вильоту матеріалу;
- відстань між соплом і бетоновою поверхнею;
- кут нахилу сопла до поверхні, що обробляється.

Згідно з дослідженнями М.Г. Дюженка, між міцністю (y, Па) і складом розчину (водоцементне відношення, x) для набризк-бетону існує лінійна залежність, яка описується рівнянням: y=458.2−89.2·x,y = 458.2 - 89.2 \cdot x, що свідчить про значний зв'язок між цими змінними.

Вплив швидкості руху матеріалу VV, м/с, на межу міцності при стисканні σc\sigma_c, Па, має нелінійну залежність, яку можна представити у вигляді: σc =f(V) де функція f(V)f(V) враховує кінетичну енергію частинок, їх взаємодію з шаром бетону та ефективність ущільнення матеріалу при заданих технологічних параметрах.

$$R_c = 16{,}714 + 11{,}925 \cdot v + 0{,}115 \cdot v^2, \quad (1.2)$$

В експериментальних дослідженнях встановлено, що оптимальна відстань між соплом і бетоновою поверхнею становить 90–120 см, а тиск повітря на виході має бути в межах 0,10–0,13 МПа. Під час спостереження за процесом формування шару торкрет-бетону М.Г. Дюженка зауважив, що збільшення інтенсивності ущільнення призводить до зростання кількості матеріалу, який відскакує. Якщо ж сила удару струменя торкрет-бетону перевищить певний рівень, то на бетоновій поверхні шар матеріалу не утворюється, оскільки він буде руйнуватися і відкидатися. Це дозволяє припустити, що кількість відскоку може бути використано як показник для контролю процесу ущільнення торкрет-бетону і прогнозування його міцності.

Відскік — це сукупність часток, що утворюються в результаті пружних зіткнень нових частинок суміші з тими, які вже укладені, але ще не покриті цементною плівкою. Одними з перших дослідників цього процесу в нашій країні були С.І. Дружинін і П.І. Глужге. Вони досліджували склад відскоку і його вплив

на міцність торкрет-бетону. Їхні роботи були продовжені Н.А. Агризковим, який розглянув широке коло питань, включаючи фізико-механічні властивості торкрету, технологію торкретування і організацію робіт. Н.А. Агризков також досліджував вплив марки цементу, гранулометричного складу і форми зерен на міцність, а також зчеплення торкрету з іншими матеріалами, включаючи арматуру.

А.П. Шипілов у своїх теоретичних дослідженнях розглянув механізм утворення відскоку. Він трактував торкрет-струмінь як потік змочених водою частинок, удар яких об поверхню може бути змодельовано як зіткнення пружних куль з жорсткою, недеформованою поверхнею. У момент удару частина води, що покриває частинку, змочує невелику ділянку поверхні. Утримуюча сила, яка виникає завдяки поверхневому натягу води, намагається утримати частинку на поверхні, протидіючи силі віддачі.

Виходячи з досліджень Г.І. Покровського, можна стверджувати, що спочатку на торкретованій поверхні утримуються лише дрібні частинки, здебільшого цементні. З часом утворюється суцільна плівка, і великі зерна піску починають залишатися на поверхні, досягаючи усталеного режиму торкретування. У цей момент відскік стає стабільним і переважно складається з зерен піску з невеликим вмістом цементу.

Таким чином, відскік є неминучим явищем, що пов’язане з механікою пружних зіткнень, але його контроль і оптимізація дозволяють покращити процес формування торкрет-бетонного шару.

На основі наведених теоретичних передумов А.П. Шипілов приходить до наступних висновків:

а) отощеніё вихідної сухої суміші збільшує кількість відскоку;

б) співвідношення цементу і піску в ТОРКРЕТ значно відрізняється від такого в сухої суміші.

В результаті обробки дослідних * даних була отримана емпірична формула, яка виражає залежність складу торкрета1 від складу вихідної

цементно-піщаної суміші, а також формула, яка визначає кількість відскоку в залежності від співвідношення цементу і заповнювача:

$$О = Ц_с \cdot (Р + 1) \cdot (Т - П) / (Р - Т), \quad (1.3)$$

де: О - відскік в%;

Цс - відсоток цементу в сухої суміші;

Т - співвідношення пісок - цемент в сухої суміші;

Р - співвідношення пісок - цемент в торкреті;

П - співвідношення пісок - цемент в відскоку.

На основі експериментальних досліджень, проведених А.П. Шипіловим, було встановлено, що процеси відскоку і ущільнення тісно взаємопов'язані та визначаються властивостями використовуваної суміші. Накопичені наукові дані дозволили отримати емпіричні залежності між міцністю торкрет-бетону та основними технологічними параметрами, які можна застосовувати для оптимізації будівельних процесів.

На рисунку 1.17 представлені графіки, що демонструють залежності межі міцності при стисненні набризк-бетону і відскоку від поверхні, отримані Д.М. Голіцинським [4]. Ці криві було побудовано шляхом варіювання одного з технологічних параметрів за умови, що інші параметри залишаються на своїх оптимальних рівнях. Вид цих залежностей дозволяє в якості критерію оптимальності параметра прийняти мінімальний відскік при максимальній інтенсивності ущільнення.

Графіки демонструють кілька ділянок, що відображають якісні зміни процесу укладання торкрет-бетону:

1. Початкова стадія: На цьому етапі зовнішня сила недостатня для повного використання потенціалу матеріалу в опорі проникненню частинок. Збільшення зовнішнього впливу призводить до поступового підвищення міцності торкрет-бетону.

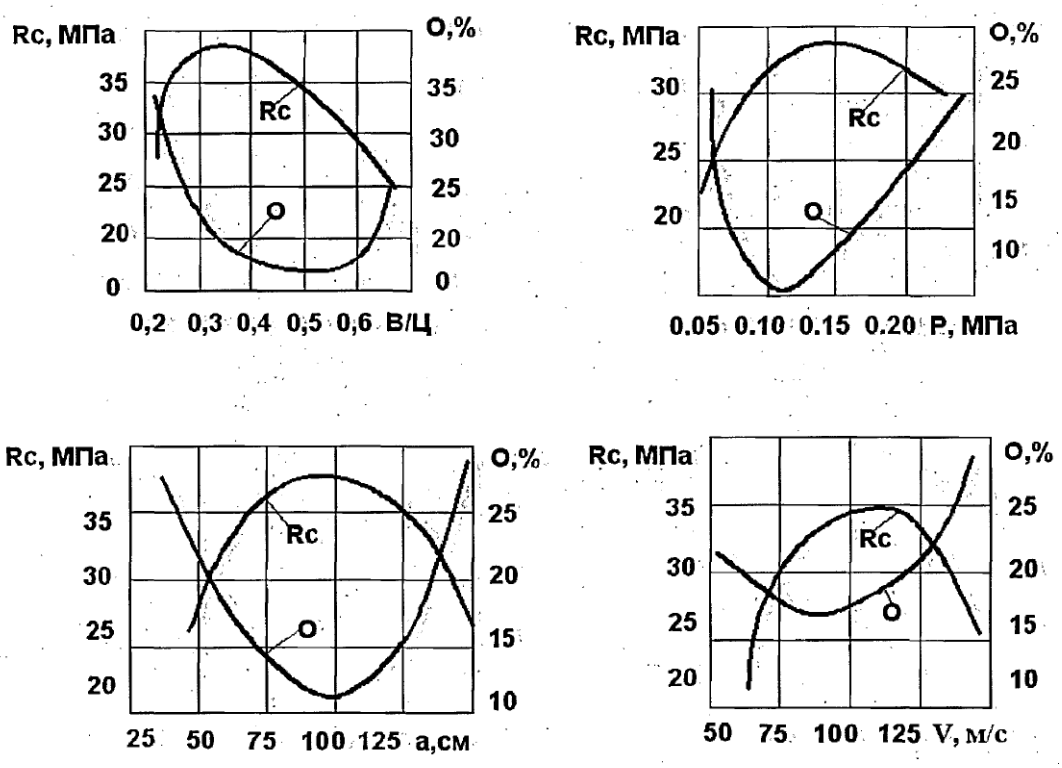


Рисунок 1.17 – Залежності міцності торкрет-бетону на стиск Rc і кількості відскоку O:
а) від водоцементного відносини В / Ц; б) від тиску повітря Р в машині; в)від відстані між соплом і поверхнею; г) від швидкості вильоту сухої суміші V

2. Досягнення максимуму: При подальшому посиленні зовнішнього впливу залежність міцності досягає свого максимуму, що відповідає оптимальним умовам ущільнення.

3. Зниження міцності: Після перевищення певного оптимального рівня зовнішнього впливу починається розпушення структури торкрет-бетону, що негативно позначається на його кінцевій міцності.

Ці спостереження підтверджують доцільність обраного принципу підбору технологічних параметрів, за якого досягається мінімальний відскок при забезпеченні максимальної міцності торкрет-бетону.

Дослідженню ударного впливу струменя торкрет-бетону на міцність конструкції присвячена дисертаційна робота К.Ф. Абдуліна [6]. На підставі експериментальних досліджень (рисунок 1.18) він встановив регресійні

залежності міцності зразків торкрет-бетону Rc », Па від сили удару струменя об жорстку поверхню:

$$R_{сж} = 43{,}57 \cdot (1 - e^{0{,}0063P}), \tag{1.4}$$

де Р - сила удару струменя, Па.

На основі аналізу досліджень та експериментальних даних встановлено, що міцність торкрет-бетону значною мірою залежить від процесу структуроутворення, який відбувається під час ущільнення матеріалу. Згідно з наведеною формулою і графічними залежностями, характер залежності між міцністю бетону та силою удару має експонентний вигляд: спочатку спостерігається різке зростання міцності, але при подальшому збільшенні сили удару міцність стабілізується і практично не змінюється. Цей феномен пояснюється тим, що надмірна інтенсивність зовнішнього впливу може призводити до розпушення структури бетону, що негативно позначається на його кінцевій міцності.

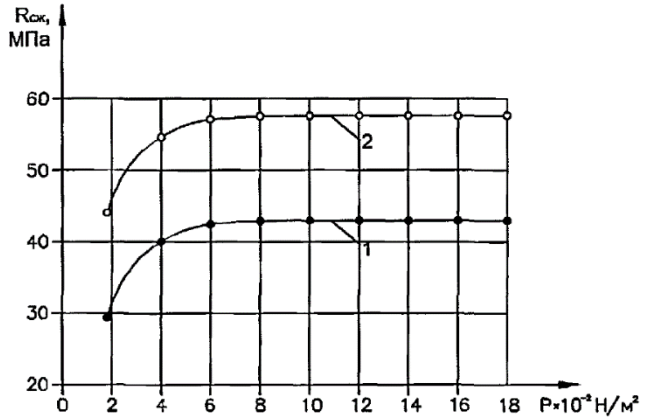


Рисунок 1.18 – Залежності міцності зразків торкрет-бетону Rc, Па від сили удару струменя

Одним із перших досліджень взаємодії торкретної струмені з нежорсткими поверхнями виконав К.Ф. Абдулін, вивчаючи її поведінку на ґрунтових основах. Згодом питання взаємодії струменя з пневмоопалубкою стали об'єктом

досліджень багатьох науковців. Г.А. Пікус встановив, що відхилення кута між соплом і поверхнею від 90° призводить до збільшення відскоку та зменшення щільності матеріалу через ефект рикошету, який знижує ударний імпульс струменя. Це підтверджує важливість дотримання оптимального кута під час нанесення торкрету.

А.А. Колосов досліджував вплив швидкості вильоту суміші із сопла та відстані до оброблюваної поверхні на міцність цементоасфальтобетонного дорожнього покриття, отриманого методом торкретування. В.В. Єрмолов сформулював вимоги до матеріалів оболонок пневмоопалубок, а Л.В. Болотських провів фізико-математичне моделювання взаємодії торкретної струмені з пневмоопалубкою, що дозволило визначити оптимальну швидкість нанесення торкрет-бетону для забезпечення необхідної міцності конструкції.

На основі аналізу наукових праць можна зробити висновок, що для досягнення заданої міцності торкрет-бетону необхідно підібрати технологічні параметри, які забезпечать максимальну інтенсивність ущільнення при мінімальному відскоку. Особливу увагу слід приділити взаємодії торкретної струмені з пневмоопалубкою, оскільки цей фактор значно впливає на якість готової конструкції.

Недостатність даних про поведінку частинок торкрет-бетонної суміші під впливом зовнішніх сил, особливо під час нанесення на горизонтальну поверхню пневмоопалубок, підкреслює необхідність подальших теоретичних і експериментальних досліджень. Результати таких досліджень дадуть змогу оптимізувати технологічний процес нанесення торкрет-бетону з урахуванням специфіки взаємодії струменя з пневмоопалубкою.

Многі автори науково-технічних робіт рекомендують при нанесенні торкрету на поверхню встановлювати кут між поздовжньою віссю сопла і поверхнею нанесення рівним 90°. У роботі Г.А. Пікуса встановлено, що при нанесенні торкретфібробетону на різні поверхні, навіть незначне відхилення цього кута від 90° призводить до збільшення відскоку матеріалу і зменшення щільності фібробетону. Це пояснюється ефектом рикошету, що виникає при

таких умовах, який супроводжується зменшенням ударного імпульсу струменя торкрету.

А.А. Колосов у своїх дослідженнях експериментально довів вплив швидкості вильоту суміші із сопла і відстані між соплом і оброблюваною поверхнею на міцність цементоасфальтобетонного дорожнього покриття, отриманого методом торкретування. Його результати підтверджують, що правильний підбір технологічних параметрів суттєво впливає на якість готового матеріалу.

Питання нанесення торкрету на пневмоопалубки стали предметом численних досліджень. В роботі В.В. Єрмолова були сформульовані основні вимоги до матеріалів оболонок повітронаповнюваних споруд, серед яких короткочасна міцність при розриві матеріалу першої групи становить 40-60 кН/м, середньої групи — 60-100 кН/м, а важкої групи — понад 100 кН/м.

А.А. Арзуманова вивчав стійкість термопластикових матеріалів до абразивного зносу при торкретуванні бетонних сумішей, а також вимірював деформаційні характеристики цих матеріалів.

Л.В. Болотських розробив фізико-математичну модель, що описує процес взаємодії торкретної струмені з пружно-податливою поверхнею пневмоопалубки. У своїй роботі він визначив чисельні значення оптимальної швидкості нанесення для фіксованих параметрів натягу пневмоопалубки. Ця модель дозволила врахувати вплив податливої опалубки на кінцеву міцність конструкції.

Аналіз наукових робіт дає підстави зробити висновок, що міцність торкретованої конструкції визначається процесом структуроутворення під час ущільнення торкрет-бетонної суміші. Встановлено, що перебіг ущільнення можна оцінювати за допомогою спостереження за формуванням відскоку. Для досягнення необхідної міцності необхідно підібрати такі технологічні параметри, які забезпечать максимальну інтенсивність ущільнення при мінімальному відскоку.

Недостатня кількість інформації у відомих дослідженнях про поведінку частинок суміші під впливом зовнішніх сил, особливо під час нанесення на горизонтальну поверхню пневмоопалубок, вказує на необхідність проведення додаткових досліджень. Це дозволить оптимізувати технологічний процес нанесення торкрет-бетону, забезпечивши необхідну міцність конструкцій та знизивши втрати матеріалу.

1.3 Ефективність використання пневматичних опалубок в будівництві

Зростання обсягів монолітного домобудівництва обумовлене насамперед значним зниженням вартості будівництва, зумовленим заміною збірних залізобетонних конструкцій на монолітні. Водночас трудомісткість виконання робіт у монолітному будівництві залишається досить високою. Важливим аспектом технології зведення монолітних залізобетонних конструкцій є застосування різних типів опалубок, таких як розбірно-переставні, блокові, ковзаючі та незнімні опалубки-облицювання. Використання цих опалубок потребує значних матеріальних ресурсів, високої трудомісткості та значних витрат, що суттєво впливає на загальну вартість будівництва.

Аналіз техніко-економічних показників монолітних тонкостінних оболонок підтверджує їх ефективність, яка може бути підвищена за рахунок удосконалення комплексу опалубних, арматурних і бетонних робіт. Основний недолік монолітного залізобетону полягає у високій частці ручної праці, що досягає в деяких випадках 50%, причому значну частку цього обсягу складають опалубні роботи. Зокрема, 35–45% загальних трудовитрат на зведення оболонок припадає на опалубні роботи, а їхня вартість становить 15–25% загальної вартості конструкцій.

Необхідність пошуку шляхів вдосконалення опалубних форм обумовлена потребою в нових прогресивних матеріалах, збільшенні оборотності опалубки та

підвищенні рівня механізації опалубних і бетонних робіт. Одним із перспективних напрямків є використання пневмонапружених систем як опалубок для зведення монолітних конструкцій. Область застосування таких пневматичних опалубок охоплює зведення цивільних будівель, мостових опор, купольних покриттів та інших протяжних споруд. Завдяки високій ефективності та прогресивності конструкцій, пневмоопалубки швидко впроваджуються в практику як зарубіжного, так і вітчизняного будівництва.

Переваги пневмоопалубок полягають у скороченні термінів будівництва, підвищенні продуктивності праці, зниженні трудомісткості, а також у забезпеченні високої якості бетону. Основними несучими елементами пневмоопалубок є гнучкі оболонки, формоутворення та стабілізація яких забезпечуються перепадом тисків. Виготовлені з матеріалів з малою жорсткістю, вони використовуються для відтворення форм у залізобетоні.

Дослідно-експериментальні роботи підтвердили, що застосування пневмоопалубок дозволяє досягти строків зведення монолітних конструкцій, співставних зі збірними варіантами, значно знижуючи при цьому їхню вартість. Пневмоопалубки покращують якість бетонної поверхні, знижують витрати на подальшу обробку, скорочують час витримки бетону, а також дозволяють зводити конструкції оптимальної геометричної форми.

Пневматичні опалубки являють собою замкнуті герметичні оболонки, які за рахунок надлишкового тиску повітря забезпечують необхідну форму залізобетонних конструкцій. Такі опалубки широко застосовуються у США, Канаді, Франції, Німеччині та Японії. У Росії їх використання почалося з будівництва тунелів та гірничих виробок.

На сьогоднішній день найширше застосування при зведенні просторових конструкцій отримали пневматичні опалубки двох типів: повітряноопорні та воздухонесомі. Воздухонесомі конструкції є автономними елементами, які не потребують постійного підкачування повітря. У них підтримується високий тиск (30–500 кПа), що забезпечує жорсткість конструктивних елементів, таких як балки, стійки чи панелі. Повітряноопорні конструкції, на відміну від них,

працюють на основі надлишкового тиску (0,1–0,4 кПа), який створюється і підтримується вентилятором, що забезпечує стабільність оболонки. Ці конструкції використовуються для створення великих об’єктів, наприклад купольних споруд, житлових чи промислових будівель.

Функціональною різницею між цими типами є масштаб і сфера застосування: воздухонесомі конструкції здебільшого виступають як окремі елементи, тоді як повітряноопорні створюють єдину споруду. На рисунку 1.18 представлено класифікацію пневматичних конструкцій, яка охоплює основні типи таких опалубок.

За способом нанесення бетонної суміші пневмоопалубки поділяються на два види: пневмодинамічні та пневмостатичні. Пневмодинамічні опалубки спочатку розкладаються на землі, потім на них наноситься шар бетонної суміші, після чого опалубка напружується повітрям і піднімається в проєктне положення. Пневмостатичні опалубки встановлюються безпосередньо в проєктне положення, після чого на них наноситься бетон методом торкретування чи пневмонабризку.

Аналіз існуючих технологій підтвердив високу ефективність використання пневмоопалубок, які дозволяють знизити трудомісткість і скоротити терміни будівництва. Вперше торкретування на повітряноопорну пневмоопалубку було здійснено в США в середині 1930-х років. Бетонна суміш укладалася за допомогою цемент-гармати на надуту пневмоопалубку при зведенні житлових будинків, зерносховищ і складських приміщень. Конструкції, зведені за цією технологією, відзначалися високою міцністю та виконували функції стін і покрить (рисунок 1.19).

У Радянському Союзі в 1950-х роках інженер А.Е. Лопатто запропонував спосіб зведення міжповерхових перекриттів із використанням лінзоподібної пневмоопалубки, натягнутої на металеву раму. Торкрет-бетон наносився кільцями, після чого додавалася арматура і основний бетон. У 1960-х роках Е.Л. Майлер розробив метод виготовлення збірних резервуарів і каналів із використанням повітронаповнюваних опалубок у закритих приміщеннях.

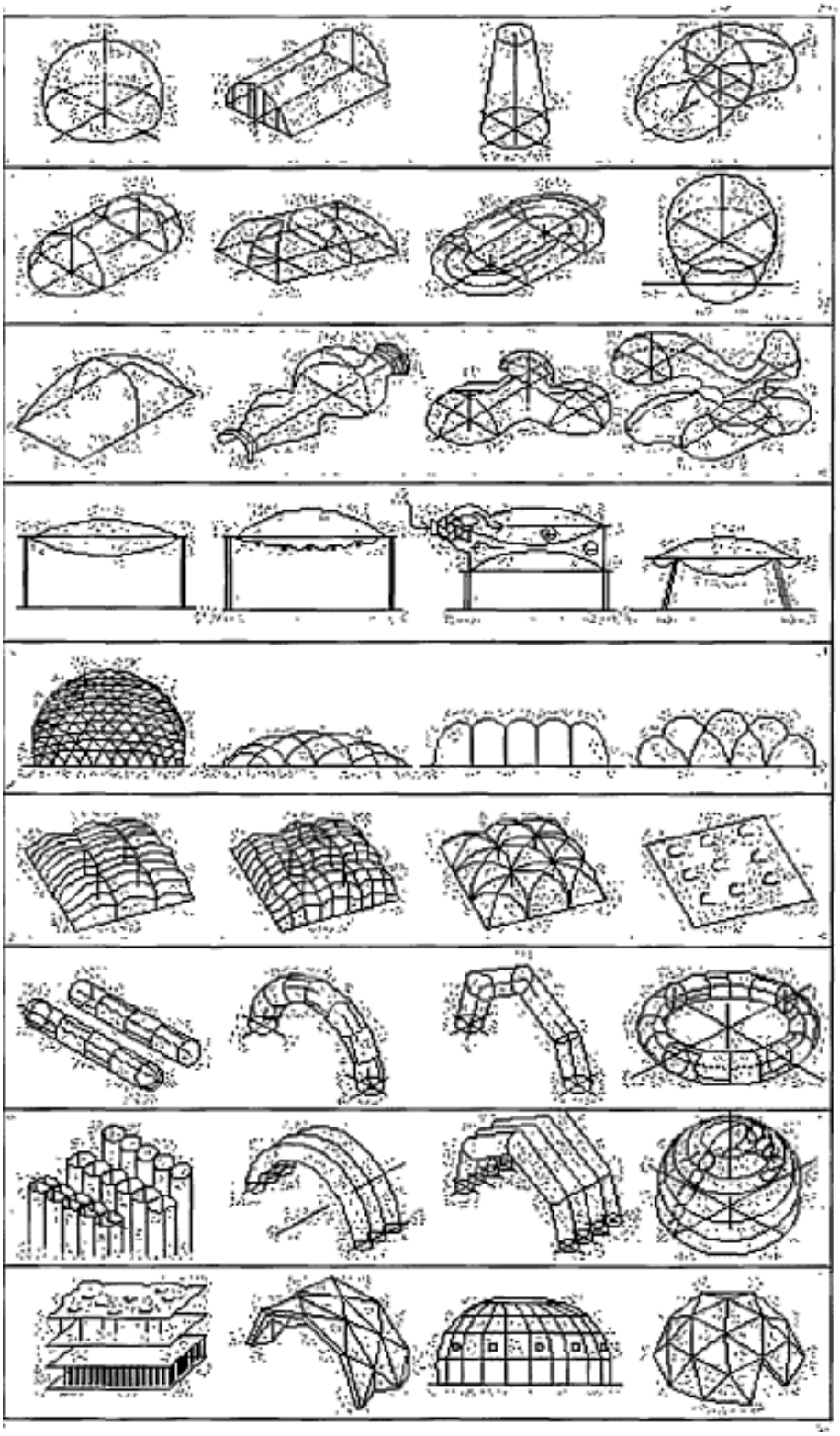


Рисунок 1.18 – Класифікація пневматичних конструкцій

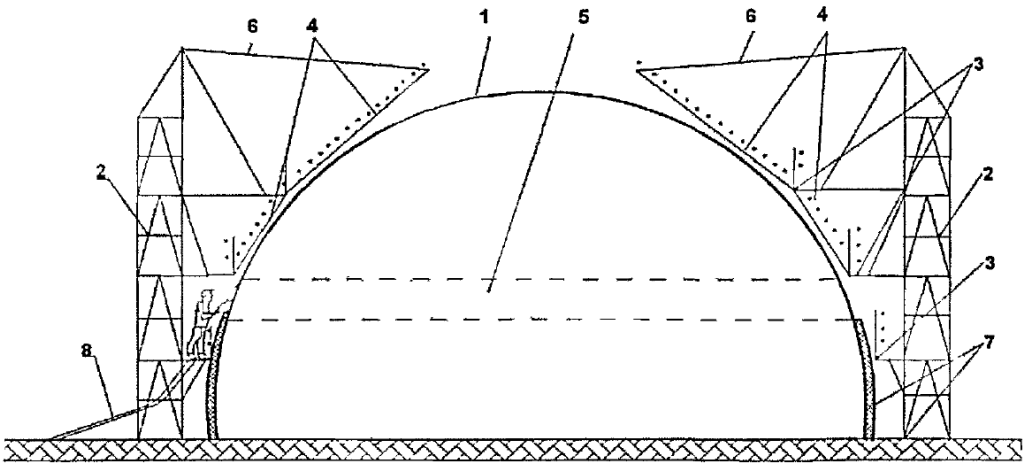


Рисунок 1.19 – Зведення купола на надувний пневмоопалубке

1 - пневмоопалубка з укладеною арматурою; 2 - щогли по периметру купола; 3 - робочі площі; 4 - переносні драбини; 5 - наноситься за допомогою цемент - гармати шар торкрет-бетону; 6 - канат; 7 - затверділий торкрет-бетон; 8 - матеріальні шланги

Суть технології полягала в нанесенні торкрет-бетону на пневмоопалубку, розміщену всередині арматурного каркаса.

У 1960-х роках, через високий попит на конструкції будівель прямокутної форми, радянські вчені запропонували метод зведення хвилястих склепінь за допомогою торкретування поверхонь надутої опалубки. Ці конструкції мали двояку кривизну, високу міцність і використовувалися для зведення споруд складної геометрії.

З 1967 по 1978 роки за кордоном було зведено значну кількість купольних житлових і громадських будівель діаметром 8 м методом пневмобетонування по повітряноопорній опалубці в два шари [1]. У нашій країні А.С. Арзуманов вперше запропонував бетонувати оболонки на надутій пневмоопалубці в один шар. Теоретично і експериментально було доведено, що така опалубка має достатню несучу здатність для сприйняття навантаження від пневмобетонування [2]. Під керівництвом В.В. Беспалова було реалізовано грандіозне купольне покриття діаметром 32 м, яке зводилося методом набризку бетонної суміші з дисперсним армуванням по горизонтальних кільцях висотою 1,5–2 м [2].

Методи будівництва споруд із використанням повітряноопорних опалубок досліджували та вдосконалювали вітчизняні вчені й інженери: А.С. Арзуманов, Б.І. Петраков, В.В. Беспалов, В.В. Єрмолов та інші. Повітряноопорний тип опалубки мав більше поширення в промисловому будівництві порівняно з воздухонесомими, особливо для будівель із прольотами до 9 м. Однак повітряноопорні конструкції мали суттєві недоліки: обмеженість застосування лише для однотипних конструкцій, високі експлуатаційні витрати через постійну подачу повітря, а також значну витрату гумотканинних матеріалів.

Останніми роками в нашій країні набули популярності пневмокаркасні (воздухонесомі) конструкції, які в значній мірі усувають недоліки повітряноопорних систем. Зокрема, пневмокаркасні модулі дозволяють створювати конструкції різних розмірів і конфігурацій, а також переміщувати їх на нові захватки в процесі бетонування, що значно знижує матеріаломісткість у розрахунку на 1 м² бетонованої поверхні (рисунок 1.20).

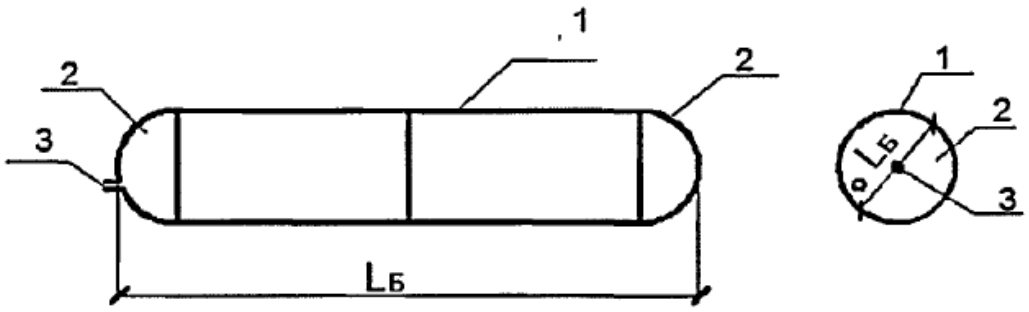


Рисунок 1.20 – Схема пневмокаркасних модуля
1 - робоча, поверхня, 2 - торці, 3 - ніпель

Пневмокаркасні опалубки комплектуються з окремих модулів, які можна з’єднувати між собою для створення будівель різних розмірів і форм. Так, модульна пневмокаркасна опалубка, розроблена в 1981 році інститутом «Донецький ПромбудНДІпроект», застосовувалася для бетонування перекриттів. Ця опалубка складається з гумових балонів, розміщених на

жорсткому настилі, що дозволяє змінювати геометричні форми конструкцій шляхом регулювання тиску в балонах (рисунок 1.23).

У 1990 році Воронезький і Ленінградський інженерно-будівельні інститути під керівництвом А.С. Арзуманова та Г.М. Бадьїна розробили пневмоопалубку з циліндричних пневмокаркасних модулів, які виконували роль як несучих елементів, так і робочої палуби (рисунок 1.22). Такі конструкції дозволяють зводити монолітні перекриття на різних висотах.

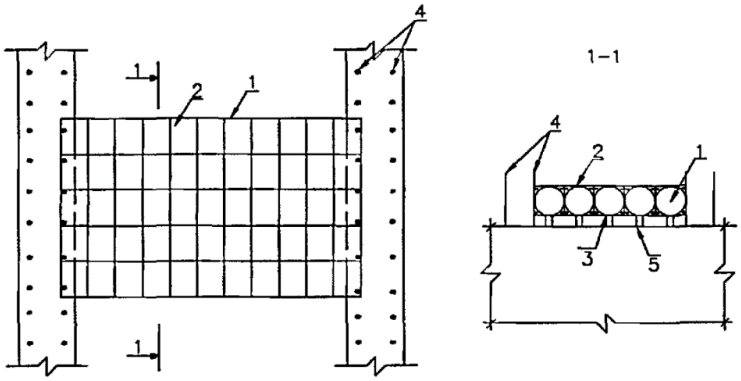


Рисунок 1.21 – Схема виконання робіт при бетонуванні пролітних конструкцій: 1 - пневмомодуль, 2 - верхня арматурна сітка, 3 - нижня арматурна сітка, 4 - випуски арматури з стіни, 5 – підкладка

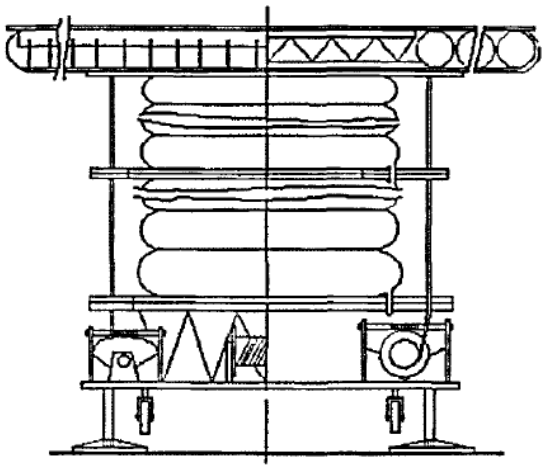


Рисунок 1.22 – Пневмоопалубка перекриттів

Пневмокаркасні модулі вирізняються своєю легкістю і компактністю у складеному вигляді. Вони легко транспортуються і швидко монтуються без

застосування важкого обладнання, що робить їх ідеальними для зведення великопролітних конструкцій. Опалубка може збиратися лише для певної частини споруди з можливістю подальшого перенесення, що значно знижує матеріаломісткість і підвищує ефективність будівельних робіт.

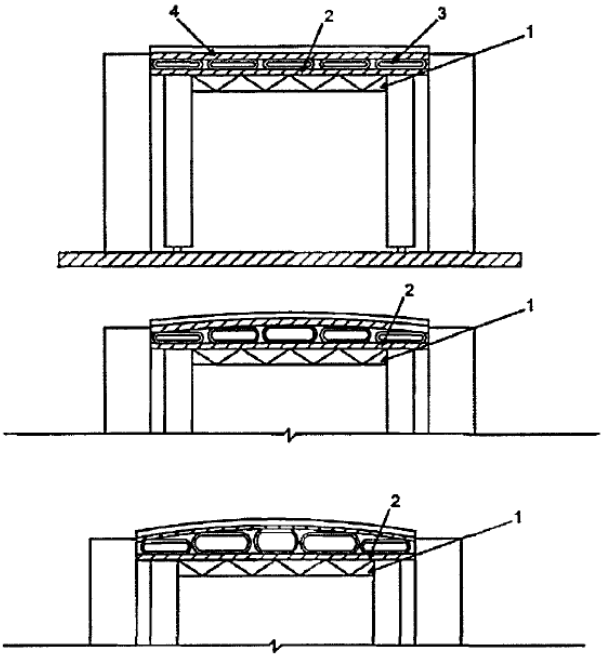


Рисунок 1.23 – Опалубка для бетонування перекриттів
1 - опорні ферми; 2 - жорсткий настил; 3 - гумові балони;
4 - металевий щит

Застосування пневмомодульних каркасних опалубок має перспективу у зведенні паль-оболонок у водонасичених ґрунтах із малою несучою здатністю, фундаментів різного призначення, підпірних стін у скельних умовах, огороджувальних конструкцій різних форм, покриттів, перекриттів і прогонових споруд. Порівняно невеликі розміри модульних елементів дозволяють використовувати не лише традиційні матеріали, такі як прогумовані тканини, термотканини, склотканини, армовані плівки, а й інші, зокрема листи тонкої фанери, оргаліт, литу гуму тощо. Дослідження цих матеріалів виконано А.С. Арзумановим.

Використання модульних пневмокаркасних опалубок забезпечує можливість зведення монолітних споруд, максимально наближених до розрахункової форми, покращення якості бетону, скорочення витрат праці та зменшення вартості робіт, а також підвищення оборотності опалубних форм. Комплексна механізація робіт із використанням маніпуляторів сприяє значному скороченню ручної праці, що робить цей метод ще більш привабливим для сучасного будівництва.

У дослідженні та проєктуванні пневматичних опалубок значний внесок зробили вітчизняні науковці, серед яких С.Б. Вознесенський, М.І. Петровнін, А.С. Арзуманов. Вони працювали над вирішенням завдань, пов’язаних із визначенням напружено-деформованого стану оболонок. Теоретичні та експериментальні дослідження, виконані А.С. Арзумановим, дозволили визначити закономірності, що забезпечують геометричну незмінність пневмоопалубок при збереженні функціональної відповідності їх жорстким аналогам. Він також розробив математичні моделі трансформації пневмоопалубок залежно від фізико-механічних характеристик матеріалів.

Д.А. Казаков досліджував вплив натягу тканини на пневмокаркасні опалубки та визначив раціональне співвідношення поздовжнього й поперечного натягу тканини при тиску до 50 кПа. Це співвідношення є важливим для подальших експериментів. У зимових умовах, як показали дослідження А.Н. Ткаченка, експлуатаційна температура впливає на деформаційні характеристики матеріалів, що використовуються в пневмоопалубках.

Л.В. Болотських проводив експерименти з вивчення взаємодії торкретної струменя з поверхнею пневмоопалубки, встановивши, що максимальна міцність бетону досягається при лінійному натягу, характерному для пневмокаркасних систем.

Проведені дослідження показали, що найбільший інтерес становлять пневмоопалубки воздухонесомого типу, які завдяки своїй універсальності та ефективності мають значний потенціал у майбутньому будівництві.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ТОРКРЕТ-БЕТОНУ НА ПОВЕРХНЮ

2.1 Визначення та обґрунтування основних технологічних параметрів нанесення торкрет-бетону

Виконані дослідження в галузі торкретування спрямовані на вивчення фізико-механічного процесу нанесення бетонної суміші, що здебільшого здійснюється для жорстких поверхонь. Б.Т. Грязнов [4] дійшов висновку про можливість використання тканини, натягнутої на металеву раму, як опалубки при торкретуванні. Зважаючи на те, що пневмокаркасні конструкції мають властивості мембрани, цей підхід може бути застосований і до них.

Б . Г. Грязнов вивів формулу для розрахунку швидкості матеріалу в перерізі трубопроводу або сопла:

$$v_m = (v - v_m^0) \cdot \frac{\zeta_x}{\mu + \zeta_x} + v_m^0 \tag{2.1}$$

де: v; v^0 - швидкість повітря і матеріалу в перерізі;

v^o_m- швидкість матеріалу в попередньому перерізі; '

р - вагова концентрація матеріалу;

Z - коефіцієнт лобового опору частинок на розглянутому, ділянці труби (сопла); .

Для ваговій концентрації існує вираз:

$$\mu = \frac{\rho_m}{\rho} s \tag{2.2}$$

де $р_т$ - щільність переміщуваного матеріалу (приймаємо 2000 кг / м3) ;.

ρ - щільність транспортує повітря при атмосферному тиску ρ = 1,2 кг / м3;

s - відношення обсягу твердих частинок до обсягу аеросуміші (приймається 0,02 для торкрет-установок).

Для знаходження коефіцієнта лобового опору використовується наступна формула:

$$\zeta = \frac{S_{mi}}{F_0} / \left(1 - \frac{S_{mi}}{F_o}\right) 3 \tag{2.3}$$

де i - порядковий номер даного тіла;

Smi - площа перерізу тіла; .

F_0 - площа труби;

На підставі припущень було здійснено розрахунок швидкостей вильоту частинок бетонної суміші, результати якого представлені в таблиці 2.1.1. Водночас існують й інші моделі процесу нанесення розчинних сумішей. Зокрема, дослідження С.П. Єгорової [8] базуються на аналізі руху часток розчину в суцільному струмені, який спрямований уздовж горизонтальної лінії. У цьому випадку форсунка розташовується під певним кутом до горизонталі, як показано на рисунку 2.1.

Значення швидкостей підльоту до поверхні, отримані в роботі Єгорової С.П. і відповідні верхню та нижню межу факела, визначаються за формулами:

$$V_2' = \sqrt{V_1^2 \cos(\varphi_1 + \alpha_1)^2 \cdot 0,929 + \left[V_1 \sin(\varphi_1 + \alpha_1) - \frac{gL}{V_1 \cos(\varphi_1 + \alpha_1) \cdot 0,964}\right]^2} \tag{2.4}$$

$$V_2'' = \sqrt{V_2^2 \cos(\varphi_1 + \alpha_2)^2 \cdot 0,929 + \left[V_1 \sin(\varphi_1 + \alpha_2) - \frac{gL}{V_1 \cos(\varphi_1 + \alpha_2) \cdot 0,964}\right]^2} \tag{2.5}$$

Таблиця 2.1.1 – Розрахункові значення швидкостей вильоту торкретной суміші

Продуктивність установки, м^3 / г	Діаметр вихідного отвору сопла, мм	Швидкість подачі бетонної суміші по шлангу, м / с	Швидкість подачі бетонної суміші в перетині сопла, м / с	швидкість вильоту, м / с
1	2	3	4	5
9	30	2,6	3,54	3,72
	20		7,95	8,46
	10		31,8	42,78
5	30	1,44	1,96	2,1
	20		4,4	4,9
	10		17,64	32,45
2	30	0,58	0,79	1,2
	20		1,77	2,34
	10		7,12	24,86

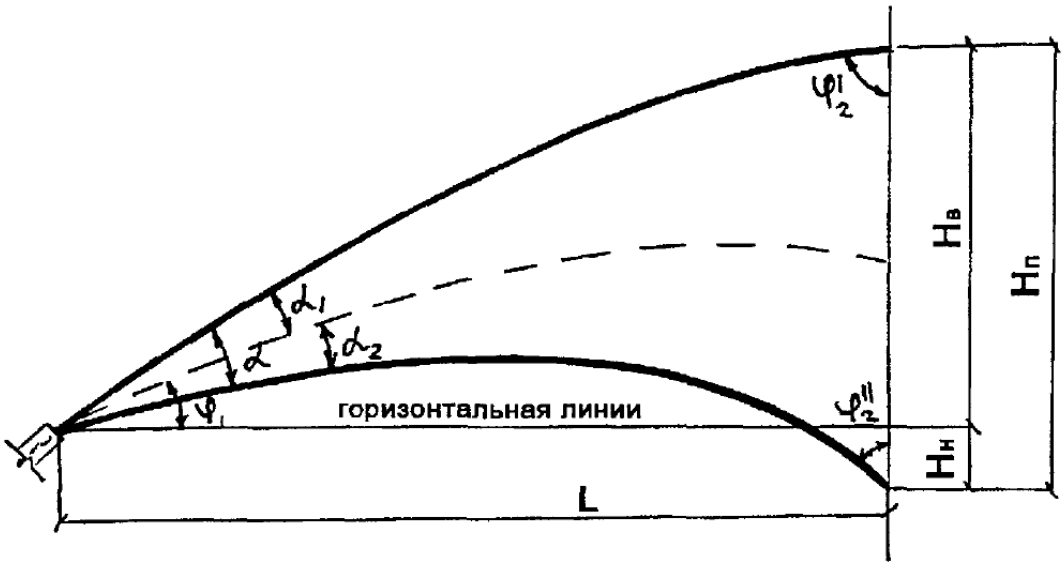


Рисунок 2.1 – Схема траєкторії польоту струменя розчину

1 - верхня межа струменя; 2 - нижня межа струменя

Знаючи значення швидкостей вильоту частинок бетонної суміші, Л.В. Болотських, на основі теоретичної моделі руху частинок розчину, запропонованої С.П. Єгоровою, виконав розрахунок геометричних параметрів торкретного факела і швидкостей підльоту до поверхні нанесення. Також було здійснено фізико-математичне моделювання процесу взаємодії торкретної струменя з пружно-податливою поверхнею пневмоопалубки при нанесенні торкрет-бетону на вертикальну поверхню.

Під час розробки моделі взаємодії торкретної струменя з податливою поверхнею пневмоопалубки передбачалося, що на момент нанесення торкрет-бетону опалубка зазнає тиску струменя, який вона повинна витримувати. Для визначення сили впливу торкретної струменя на плоску вертикальну стінку було використано закон збереження кількості руху. Згідно з ним, зміна кількості руху в одиницю часу дорівнює сумі проєкцій зовнішніх сил на певну вісь, що діють на розглянуту масу.

На рисунку 2.2 представлені зовнішні сили, що впливають на торкретну частинку одиничної маси, яка знаходиться на осі торкретного факела. Зміна кількості руху цієї маси mm в одиницю часу в проєкції на вісь X дорівнює Px, оскільки в перерізі B−B швидкість Vx=0. Зовнішні сили складаються з реакцій вертикальної стінки N і сили тиску N1 в перерізі A−A.

Для величини N1 в перерізі A - A справедлива фомула:

$$N_1 = F_c \cdot (P_a - P) \,, \tag{2.6}$$

де Pa - тиск в соплі, Па;

P - атмосферний тиск, Па;

Fc- площа поперечного перерізу вихідного отвору сопла, м2.

Рівняння проекцій на вісь X сил і кількості руху має вигляд:

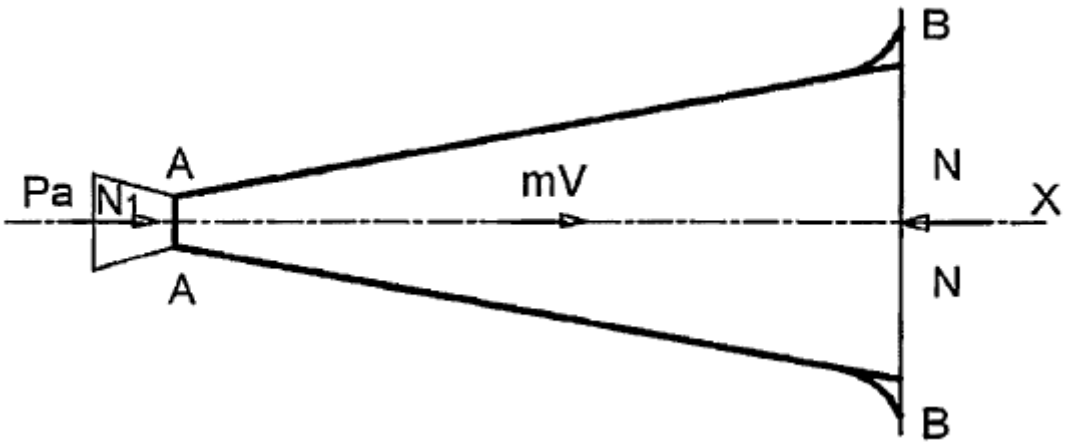


Рисунок 2.2 – Схема розподілу сил в струмені торкрет-бетону
А - А - перетин вихідного отвору; В - В - перетин поверхні пневмо-опалубки; N - реакція вертикальної стінки; N1 - величина сили тиску струменя торкрет-бетону на виході з сопла

$$m \cdot V = N - N_1 \,, \tag{2.7}$$

Оскільки в роботі [34] приймалося, що відскік матеріалу не матиме місце у разі застосування пневматичної опалубки, то енергія частинки повинна гаситися енергією прилипання, розраховується за формулою:

$$E_{np} = k \cdot E_0 = (1 - \alpha) \cdot E_0 \,, \tag{2.8}$$

При цьому, aE_0 - частина кінетичної енергії, що витрачається на пружне повернення системи «торкрет-частинка-пневмоопалубка» в положення рівноваги. Енергія aE0 дорівнює потенційної енергії пружних сил взаємодії частинки з поверхнею, представленої в ідеалізованої формі у вигляді струни.

В роботі [34] приймається допущення, що обурення струни має форму рівнобедреного трикутника (рисунок 2.3).

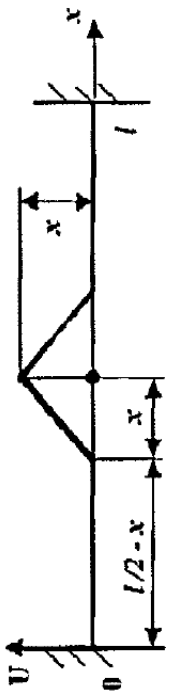


Рисунок 2.3 – Початкове положення коливання струни

В даному випадку, для розрахунку характеристики струни а, рівній швидкості в момент пружного взаємодії, лінійне натяг розраховується з деяким коректуванням:

$$T' = T + \frac{m_э \cdot v_1}{2\cos 45^0}, \tag{2.9}$$

Елементарна маса торкретной частки розраховується за формулою:

$$m_{эл} = \frac{Q_i \cdot \rho_1}{3600 \cdot F_i}, \tag{2.10}$$

де Qi - продуктивність торкрет-машини, м3 / год;

рі- щільність бетонної суміші, яка приймається 1850 кг / м3;

F, - площа плями бетонування з товщиною шару 0,01 м.

Таким чином, в результаті аналізу фізико-математичних моделей процесу нанесення розчину і торкрет-бетону на вертикальну поверхню (жорстку і деформується) встановлено такі основні технологічні параметри цього процесу:

- продуктивність нагнетательной машини Q;

- діаметр вихідного отвору сопла, D;

- відстань від площини вихідного отвору сопла до оброблюваної поверхні, H;

- сила натягу гнучкої пневмоопалубкі;

- кут нахилу сопла до торкретіруемой поверхні;

- діаметр плями торкрет-бетону на оброблюваної поверхні.

Ці параметри істотно впливають на міцність бетону, нанесеного на оброблювану поверхню.

2.2 Моделювання фізико-математичних процесів взаємодії торкретного струменя бетонної суміші з горизонтальною поверхнею пневмоопалубки

Використання пневматичних опалубок статичного типу передбачає торкретування бетонної суміші на лицьову поверхню опалубки. Взаємодія торкретного струменя з поверхнею опалубки має значний вплив на якість бетонних та залізобетонних конструкцій, що споруджуються. Оптимізація технологічних параметрів нанесення суміші, з урахуванням отримання проектних характеристик бетону, є доцільною за допомогою математичної моделі, яка описує цей процес.

У розділі 1.2 було встановлено, що формування міцнісних властивостей торкрет-бетону значною мірою залежить від ущільнення. Процес ущільнення можна оцінити на основі зміни інтенсивності відскоку, що дозволяє розробити

ідеалізовану модель, яка відображає механізм утворення відскоку при взаємодії торкрет-бетонної суміші та пневмоопалубки.

При підборі параметрів ідеалізованої моделі ми прагнули встановити їх взаємозв'язок з макроявищами, спостереження за якими дозволяє прогнозувати результат з точки зору забезпечення необхідної міцності. Як показує дослідження [5], міцність торкрет-бетону визначається процесом ущільнення, що залежить від проникнення частинок, їх форми, запасу кінетичної енергії та властивостей в'язкої середовища. Згідно з існуючими уявленнями [4], відскік бетону від поверхні, що обробляється, утворюється внаслідок зіткнень частинок, при цьому кінетична енергія частинок переходить в енергію трамбування. У зв'язку з цим відскік можна розглядати як критерій поведінки в'язкої середовища під час ущільнення. Отже, досліджуючи залежність відскоку від технологічного параметра, можна встановити зв'язок між міцністю та цим параметром.

Ефект відскоку явно спостерігається при нанесенні торкрет-бетону на вертикальні поверхні [4]. У такому випадку на нижній частині поверхні опалубки накопичуються частинки, що відкидаються внаслідок її коливань. При нанесенні на горизонтальні поверхні відскік частинок торкрет-бетону має іншу природу: частинки, що відкидаються від поверхні, переміщуються на периферію плями бетонування і залишаються в самому бетоні, утворюючи так званий «невидимий» відскік. Цей процес впливає на якість ущільнення та, відповідно, на його міцність.

На сьогоднішній день механізм переміщення торкрет-бетону від сопла до поверхні нанесення вивчений недостатньо. За нашими уявленнями, потік торкрет-бетону рухається не окремими частинками, а порціями або великими конгломератами, однак точне описання цього процесу наразі неможливе. Тому, спрощуючи, можна вважати, що до поверхні підлітає окрема частинка з певною кінетичною енергією.

В роботі [4] запропоновано відскік зв'язати з співвідношенням швидкостей поворотного руху поверхні пневмоопалубкі (v2) і швидкості підльоту частки торкрет-струменя до поверхні торкретування (v1):

Величина швидкості викликає прогин матеріалу пневмоопалубки, і чим вища ця швидкість, тим швидше тканина повертається в своє нормальне положення, що в свою чергу збільшує відскік. У нашій ідеалізованій моделі, замість розгляду просторових коливань поверхні пневмоопалубки, ми аналізуємо плоскі коливання тонкої смуги цієї поверхні (струни). Такий підхід до моделювання гнучкої поверхні пневмоопалубки вже неодноразово використовувався в теоретичних моделях.

Взаємодія частинки з поверхнею опалубки описується за допомогою математичної теорії малих коливань струни [8]. Розглядаючи одиничну частку, що підлітає до струни і має певну кінетичну енергію, ми визначаємо обурення струни цією часткою. Припускаємо, що через енергію частинки, передану струні, остання відхиляється від свого рівноважного положення і набуває певної форми.

Задача про форму відхилення струни не має чіткого рішення в рамках класичної теорії малих коливань, незважаючи на наявність безлічі різних «ідеальних» рішень цієї проблеми [15].

Взаємодія частки з поверхнею опалубки описується за допомогою математичної теорії малих коливань струни:

$$u_{tt} = a^2 \cdot u_{xx} \tag{2.11}$$

де u - відхилення будь-якої точки струни від горизонталі в довільний момент часу u(x,t)

a - швидкість руху хвилі по струні, $a^2 = T_0 / p$;

T_0 - натяг струни;

p - лінійна щільність струни.

Передбачається, що за рахунок енергії частки струна відхиляється від положення рівноваги і приймає деяку форму. Використовується «згладжена» модель обурення: береться затиснена з двох сторін струна і виробляється вплив на її центральну частину кінетичної енергією підлітає частки. Основною

гіпотезою є припущення про нульових швидкостях всіх точок струни, що знаходиться в возмущенном стані.

Приймаємо початкові умови

$$\begin{cases} u(x,0)=\varphi(x), \\ u_t'(x,0)=0 \end{cases} \tag{2.12}$$

і граничні умови u(0, t) = 0, u{l, t) = 0.

Вирішується 1 - я крайова задача для відомого рівняння коливань струни:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \tag{2.13}$$

На основі розкладу розв'язування задачі (2.11 - 2.13) в кратний ряд Фур'є

$$u(x,t)=\sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos\frac{ak\pi t}{l}\sin\frac{k\pi x}{l}, \tag{2.14}$$

можна вивчати коливання струни і, зокрема, обчислювати швидкості руху її окремих точок.

Можна використовувати також підхід Даламбера [8], відповідно до якого рішення (2.13) завдання (2.11) - (2.13) має при довільній початковій формі і = (р (х) вид суми двох розбігаються хвиль:

$$u(x,t)=\frac{\varphi(x+at)+\varphi(x-at)}{2}. \tag{2.15}$$

Виходячи з формули (2.15) швидкість руху довільної точки струни представлена в наступному вигляді:

$$v(x_0,t_0)=\frac{a}{2}\left(\varphi'(x_0+at_0)-\varphi'(x_0-at_0)\right) \tag{2.16}$$

Так як похідна функції в точці дорівнює тангенсу кута нахилу її графіка в цій точці, формула (2.16) означає, що максимальна швидкість зворотного руху точок струни, що мала початкову форму і - <p (x), дорівнює максимальному тангенсу кута нахилу графіка функції і = <p (x), помноженому на коефіцієнт а.

В роботі [4] в якості основного розглядалося припущення про те, що обурення струни має форму рівнобедреного прямокутного трикутника. Це означає, що

$$v_1 = v_2 \tag{2.17}$$

де v1 - швидкість підлітає частки бетону; v2 - швидкість зворотного руху струни.

Це ж допущення рівності швидкостей спостерігається і в більш складній параболічної моделі, яка була введена в даній роботі в якості спроби піти від рівності (2.17). Розглянемо, наприклад, в якості початкової (обуреної) форми струни параболу (рисунок 2.4), розташовану симетрично щодо центру струни.

З огляду на початкову швидкість підлітає частки V /, а також швидкість руху обурення вздовж струни, рівну значенню коефіцієнта а з рівняння (2.13), вважається, що тангенс кута нахилу обговорюваної параболи до осі OX дорівнює:

$$tg\theta = \frac{v_1}{a}. \tag{2.18}$$

Тоді в момент часу, який відповідає точці «торкання» двох розбігаються парабол (рисунок 2.5), швидкість зворотного руху центральної точки струни дорівнює нулю, що означає виконання рівності (2).

Вибір форми обурення струни є критичним фактором для математичного опису моделі взаємодії пневмоопалубки та торкретного струменя. На нашу

думку, модель повинна враховувати специфічний вплив на торкретний струмінь, спричинений упругоподатливою пневматичною опалубкою. Виходячи з того, що, згідно з існуючими уявленнями [4], в момент зіткнення частинок суміші з поверхнею пневмоопалубки кінетична енергія рухомих частинок переходить у потенційну енергію деформації гнучкої тканини, яка на наступному етапі перетворюється в кінетичну енергію руху пневмоопалубки. Оскільки зіткнення частинок з торкретованою поверхнею є неупругими, ми припускаємо, що специфічним ефектом є зниження швидкості зворотного руху опалубки порівняно зі швидкістю підлітаючих частинок. Чим більшим буде значення цього показника, тим вища ймовірність відриву частинки бетонної суміші і появи ефекту відскоку.

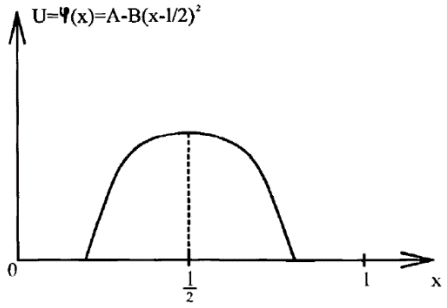


Рисунок 2.4 – Параболічне обурення струни

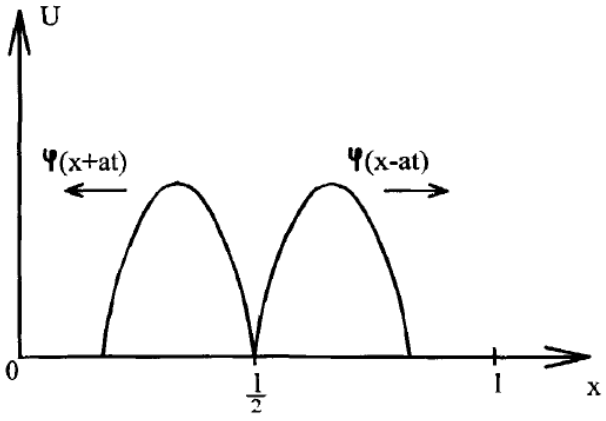


Рисунок 2.5 – Розбігаються параболічні хвилі

Рівність (2.17), яка характерна для трикутної (рисунок 2.3) та параболічної (рисунок 2.4) моделей обурення струни при ударі окремої частинки, змушує нас розглянути більш складну модель, де зв'язок між початковою і поворотною швидкостями відрізняється від умови (2.17).

В якості основного випадку далі, будемо, вважати, що розглянута струна розташовується на відрізку [0, л] і має після обурення форму кривою Гаусса з деяким параметром а (рисунок 2.6) і описується виразом:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right), x_0 = \frac{\pi}{2} \tag{2.18}$$

В силу відомого в теорії ймовірностей правила трьох сигм можна вважати, що обурена струна відхиляється від горизонтального положення

лише на ділянці - 3 <т, ^ + 3 <т | . Ця умова накладає на пропоновану модель поведінки струни природне обмеження:

$$0 < \sigma < \frac{\pi}{6} \tag{2.19}$$

З (2.19) ордината кривої визначається значенням параметра про і дорівнює

Максимальне значення модуля похідної функції (2.19) досягається в точках перегину х = ^ + про цієї кривої і становить

$$\frac{1}{\sigma^2\sqrt{2\pi}} exp^{-1/2} = \frac{1}{\sigma^2\sqrt{2\pi}} \tag{2.20}$$

При цьому значення параметра а можна пов'язати з енергією пружного збурення струни Єв:

$$E_B = \int_0^{\pi} k(\sqrt{1+(\varphi'(x))^2} - 1)dx = 2k(\int_{\pi/2}^{\pi} \sqrt{1+(\varphi'(x))^2}\,dx - \frac{\pi}{2}) \tag{2.21}$$

тут k - коефіцієнт Гука, який можна вважати пропорційним (з деяким коефіцієнтом т) силі N натягу струни - k = tN.

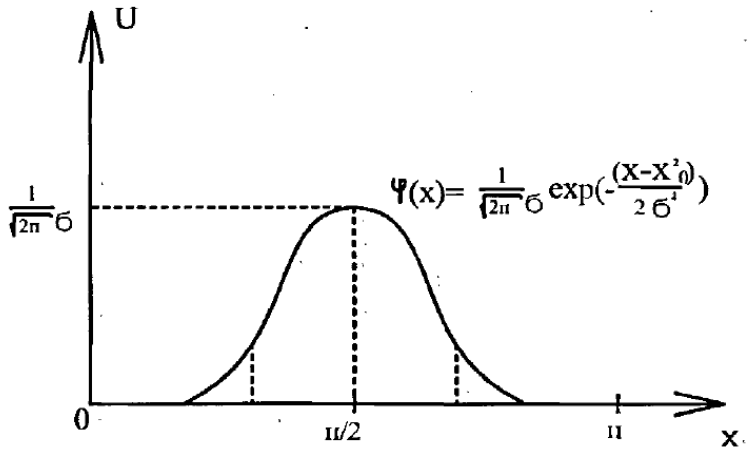


Рисунок 2.6 – «Гаусове» обурення струни

Обчислити інтеграл для функції (2.21) можна лише наближено. Чисельне моделювання призводить тут до наступної наближеної залежності енергії обуреної струни від значення параметра про:

$$E_B = N(\frac{C}{\sqrt{\sigma}} - R) \tag{2.22}$$

де C і R- позитивні константи

Величина енергії пружного збурення струни, отримана в результаті розгляду запропонованої гауссової моделі, дорівнює значенню кінетичної енергії, яку частка передає струні. Далі необхідно визначити вираз, який відображає взаємозв'язок між кінетичною енергією і основними технологічними параметрами, такими як продуктивність, діаметр сопла та відстань між соплом і поверхнею нанесення.

На рисунку 2.7 показана фізична модель, що характеризує процес нанесення торкрет-бетону на горизонтальну поверхню з використанням сопла, розташованого під кутом 90° до оброблюваної поверхні. На цьому рисунку

видно, що швидкість торкрет-бетону на виході з сопла дорівнює , а при зіткненні з горизонтальною поверхнею . Частинки струменя володіють кількістю руху, що дозволяє описати механізм їх взаємодії з поверхнею опалубки.

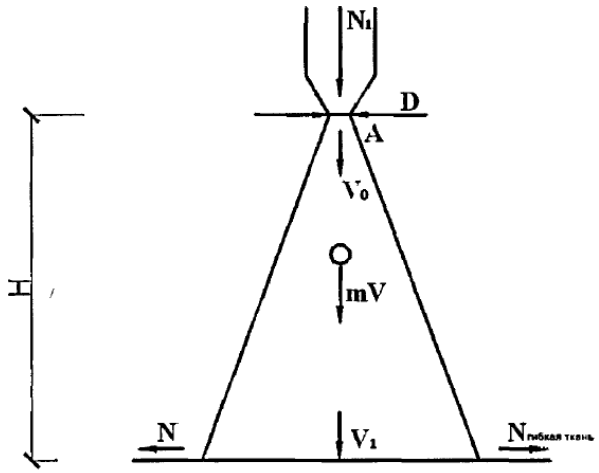


Рисунок 2.7 – Схема факела торкрет-бетону при нанесенні на горизонтальну поверхню пневмоопалубкі

Припустимо, що сопло торкрет-машини розташоване на фіксованій висоті над поверхнею пневмоопалубкі. Її повна (загальна) продуктивність () * складається з двох складових:

$$Q^* = Q_0 + Q \ , \tag{2.23}$$

де: - Q_0- продуктивність компресора, м3 / с;

Q - продуктивність подачі бетону в матеріалопроводи, м3 / с.

Частинки бетону, що вилітають з сопла торкретной установки, мають різні значення маси і, як наслідок, швидкості польоту. При фіксації різних параметрів процесу природно приймати деякі усереднені значення цих величин, замінюючи розгляд потоку різнорідних частинок вивченням факела, що складається з однакових статистично усереднених частинок.

Наприклад; можна обчислити середню швидкість і середню масу частинки бетонної суміші, що вилітає з сопла торкретной установки в залежності від

значень параметрів (?, £). За малий проміжок часу АХ з сопла установки «вистрілює» обсяг суміші, що дорівнює добутку продуктивності установки (} * на часовий проміжок. Цей обсяг дорівнює обсягу малого циліндра, що вилітає з сопла, пропорційному швидкості

частинок У0, площі перетину сопла 5 = -і, зрозуміло, часу АХ. Це означає, що справедлива формула

$$\frac{\pi D^2}{4} v_0 \Delta t = Q^* \Delta t \tag{2.24}$$

Скорочуючи обидві частини рівняння на АХ, отримаємо вираз для швидкості частинки У0, що вилітає з сопла установки:

$$v_0 = \frac{4Q^*}{\pi D^2} \tag{2.25}$$

Для обчислення маси частки зауважимо, що маса пропорційна її об'єму. У свою чергу природно вважати, що обсяг усередненої частки пропорційний добутку трьох лінійних вимірів цієї частки. Два вимірювання пов'язані з площею перетину Б сопла установки, а третій вимір («висота» розташування вилітає частки) пропорційно продуктивності установки. Отже, отримуємо формулу для усередненого значення маси ш частинки:

$$m = \beta\, Q\, D^2 \tag{2.26}$$

де b- числовий коефіцієнт

Далі вважаємо, що усереднена частка не змінює свою масу при проходженні відстані від сопла до зіткнення зі струною. А ось швидкість частинки протягом цього польоту зміниться має велике значення.

Зниженню швидкості сприяє опір повітря, сила дії якої може бути виражена відомою залежністю [14]:

$$F = \alpha v^2 \tag{2.27}$$

де а - коефіцієнт пропорційності.

Вирішуючи відповідне диференціальне рівняння, легко отримати закон зміни швидкості в залежності від пройденого шляху:

$$v(t) = v_0 exp^{-\eta s(t)} \tag{2.28}$$

В цілому, отримуємо такий вираз для швидкості частинки, подлетане до опалубки з висоти Н:

$$v_1 = v_0 \cdot E\ , \tag{2.29}$$

b - числовий коефіцієнт.

Формули (2.25) і (2.26) дозволяють записати кінетичну енергію усередненої частки, підлітає до пневмоопалубке, у вигляді формули:

$$E_k = \frac{mv_1^2}{2} = \alpha \frac{Q^3}{D^2} E^2 \tag{2.30}$$

де w - коефіцієнт пропорційності.

Вважаючи, що кінетична енергія $E_k = mv_1^2/2$ підлітає до струни частки бетону переходить в енергію пружного збурення струни, ползшім зв'язок спостережуваних параметрів Q, D, N. Н процесу торкретування с.параметром а:

$$\omega \frac{Q^3}{D^2} E^2 = N\left(\frac{C}{\sqrt{\sigma}} - R\right) \tag{2.31}$$

$$\omega \varsigma E^2 = (\frac{C}{\sqrt{\sigma}} - R) \tag{2.32}$$

З цього рівняння можна виразити величину а. Так само з цієї формули видно, що вдалося уточнити модель, яка відображатиме взаємодія частинки розчину і пневмоопалубкі, прийняту в роботі [4]. Прийнявши для опису поведінки напруженої пневмоопалубкі форму порушення струни у вигляді кривою Гаусса, ми, на відміну від [4] показали, що швидкість зміни напруженого стану струни, яка визначає швидкість зворотного руху опалубки, є функцією технологічних параметрів.

З формули (2.20) нас більше цікавить величина сг, пов'язана зі швидкістю У2 зворотного руху струни. Обчислення показують, що ця швидкість дорівнює:

$$v_2 = \frac{\delta}{\sigma^2} = \hat{C}(\mu + B)^4, \tag{2.33}$$

Отриманий результат не дає змоги встановити точне кількісне співвідношення між технологічними параметрами та міцністю торкрет-бетону, але дозволяє на якісному рівні визначити характер цієї залежності. Аналізуючи отриману залежність, можна зробити висновок, що крім відомих технологічних параметрів, таких як швидкість вильоту, діаметр сопла і т.д., на процес взаємодії струменя з поверхнею також значно впливає величина лінійного натягу тканини пневмоопалубки.

Таким чином, в результаті аналізу моделей процесу нанесення торкрет-бетону на горизонтальну деформовану поверхню в умовах непружного взаємодії

часток бетону і пневмоопалубки, теоретично обґрунтовано наступні основні технологічні параметри, які впливають на міцність торкрет-бетону:

- продуктивність нагнітальної машини Q;

- діаметр вихідного отвору сопла D;

- відстань від площини вихідного отвору сопла до оброблюваної поверхні H;

- сила натягу гнучкої пневмоопалубки N.

З отриманого виразу також випливає, що залежність між міцністю та основними технологічними параметрами не є пропорційною, і вона може бути визначена лише експериментальним шляхом.

У роботі автором були визначені напрямки подальших досліджень, одним з яких є застосування теорії струменів. Для визначення швидкості підльоту V1 вважається, що торкрет-струмінь є затопленим потоком з щільністю на виході з сопла 200-250 кг/м³. Для цього застосовуються закони розвитку повітряних струменів із певним коригуванням. Такі струмені мають початкову ділянку, де швидкість на осі постійна, і основну ділянку, де швидкість зменшується по ходу руху струменя, а кут розкриття залишаються постійним, складаючи в середньому 18°. Довжина початкової ділянки для торкрет-струменя буде більша, ніж для незатоплених струменів, наприклад, водяних, і складає (12-13) діаметр сопла D . За результатами досліджень, довжина початкової ділянки для торкрет-струменя становить (5-6) D.

Дослідження [4] показали, що тверді частинки бетону в струмені рухаються окремими конгломератами (порціями), що значно ускладнює обчислення швидкості підльоту бетону до поверхні торкретування. Використовується відома з аеродинаміки залежність [13] для розрахунку швидкості повітряного струменя, що містить яку-небудь речовину, на заданій відстані від витоку:

$$v_1 = \frac{n \cdot v_0 \cdot D \cdot \sqrt{\pi}}{2x} \tag{2.34}$$

де v_0 - швидкість на зрізі сопла, м / с;

D - діаметр сопла;

x - відстань від сопла до поверхні торкретування, м; n - коефіцієнт, що характеризує наявність в струмені різних субстанцій.

Величина коефіцієнта п залежить від багатьох параметрів і визначається залежністю:

$$n = 0{,}9 \cdot \theta / (c \cdot \varphi \cdot \sqrt{\pi}) \tag{2.35}$$

де в - коефіцієнт, що враховує відмінності щільності повітряного струменя і навколишнього простору (повітря);

с - експериментальна постійна величина, ймовірне значення якої - 0,082;

ср - коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу швидкості

при виході з сопла, $\varphi = \left[\int_0^4 (v/v_0)^2 d(F/F_0)^2\right]^{0,5}$.

Теоретично розрахувати коефіцієнт п за формулою (2.35) практично неможливо, тому цей коефіцієнт був визначений експериментальним шляхом і ймовірне значення його 80 - 90.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ТОРКРЕТ-БЕТОНУ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУ ПОВЕРХНЮ ПНЕВМАТИЧНОЇ ОПАЛУБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ ШЛЯХОМ

3.1 Розробка плану проведення експериментальних досліджень технологічних параметрів

У рамках розробки технології нанесення дрібнозернистої бетонної суміші на горизонтальні поверхні пневматичної опалубки було створено експериментальну установку на основі торкрет-машини Р-13, яка обрана як найбільш ефективна для подібних робіт (рисунок 3.1). Основною метою роботи стало дослідження і визначення оптимальних параметрів, що забезпечують необхідну міцність торкрет-бетону.

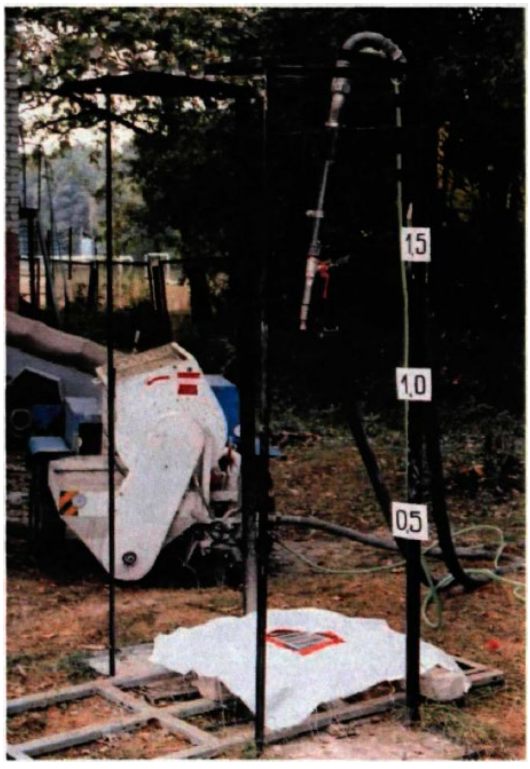


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд експериментальної установки

Під час попередніх випробувань торкрет-машини Р-13 було виявлено, що при технологічних перервах у роботі відбувається закупорка матеріалопроводу через втрату рухливості бетонної суміші. Це створювало труднощі при малих обсягах робіт або фрагментарному бетонуванні, наприклад, при замонолічуванні стиків елементів збірних конструкцій. Зупинка машини для переміщення сопла до наступної ділянки викликала необхідність промивання матеріалопроводу перед продовженням роботи. Альтернативний варіант переміщення сопла при працюючій машині призводив до значних втрат бетонної суміші, що знижувало ефективність і збільшувало матеріаломісткість.

Для вирішення цієї проблеми було розроблено транспортну систему із застосуванням регулювального пристрою, який дозволяє повертати бетонну суміш у приймальний бункер установки для її перемішування (рисунок 3.2). Основні елементи експериментальної установки включали:

- Торкрет-машину Р-13 з бункером (3) для прийому та перемішування компонентів бетонної суміші.

- Регулювальний пристрій (7), що забезпечує підтримку рухливості бетонної суміші.

- Матеріалопроводи прямої (6) і зворотної подачі (11).

- Повітропровід (12) для подачі стисненого повітря.

- Сопло (10), підключене до регулювального пристрою та повітропроводу.

- Дослідний зразок пневмоопалубки (13).

Принцип роботи експериментальної установки:

1. Бетонна суміш із бункера (3) торкрет-машини подається насосом по матеріалопроводу прямої подачі (6) до регулювального пристрою (7), де змішується зі стисненим повітрям із повітропроводу (12).

2. Через відкрите сопло (10) бетонна суміш наноситься на дослідний зразок (13), при цьому вентиль (9) відкритий, а вентиль (8) закритий.

3. Під час переміщення сопла (10) до наступної ділянки бетонування вентиль (9) закривається, і бетонна суміш спрямовується по матеріалопроводу

зворотної подачі (11) назад у бункер торкрет-машини, де безперервно перемішується.

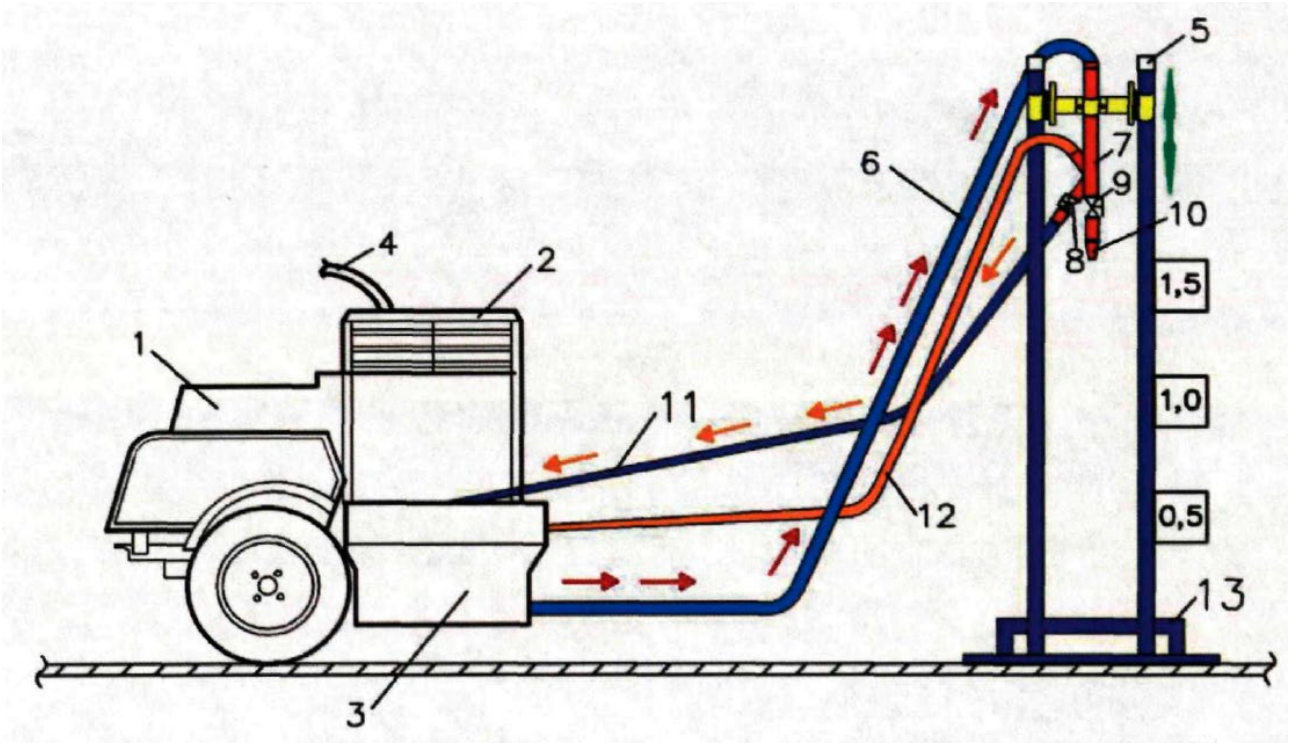


Рисунок 3.2 – Схема експериментальної установки:

1 - торкрет-машина Р-13 (2 - бетономішалка; 3 - бункер); 4 - шланг для подачи води; 5 - спеціальна рама; 6 - матеріалопроводи прямої подачі бетону;7 - регулювальний пристрій; 8,9- вентилі регулювального пристрою; 10 - сопло; 11 - матеріалопроводи зворотної подачі бетону; 12 - повітропровід; 13 - дослідний зразок пневматичної опалубки

4. Після встановлення сопла (10) на новій ділянці бетонування вентиль (9) знову відкривається, а вентиль (8) закривається для продовження нанесення бетонної суміші.

Такий підхід дозволяє значно підвищити ефективність роботи, мінімізувати втрати матеріалу та уникнути закупорки матеріалопроводів.

Розроблена технологічна транспортна система з регулювальним пристроєм значно підвищила ефективність процесу торкретування. Завдяки її застосуванню усунуто необхідність зупинки торкрет-машини під час переходу на нові ділянки

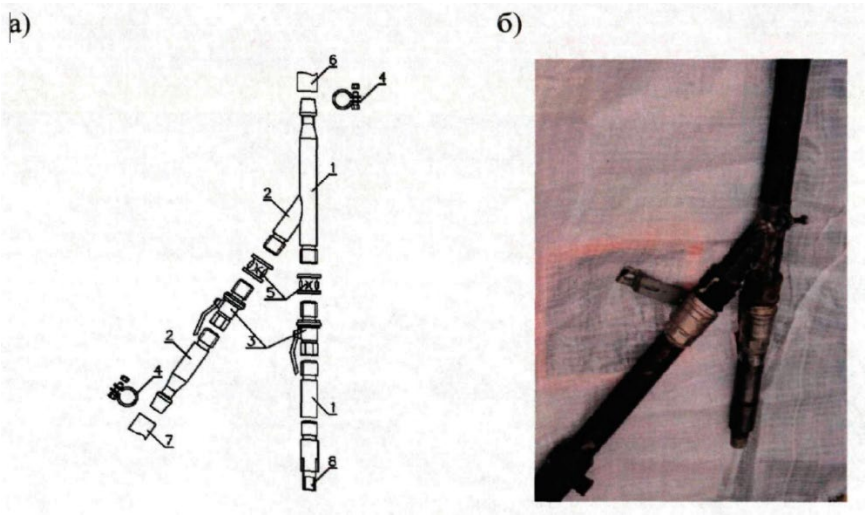


Рисунок 3.3 – Регулювальний пристрій

а) схема регулювального пристрою: 1 - сталева труба прямої подачі бетонної суміші; 2 - сталева труба зворотної подачі бетонної суміші; 3 - вентиль; 4 - затискний хомут для кріплення; 5 - муфта пряма; 6 - з'єднувальні частини розтруба; 7 - матеріальний трубопровід прямої подачі бетону; 8 - матеріальний трубопровід зворотної подачі бетону; 9 - сопло; б) загальний вигляд регулювального пристрою

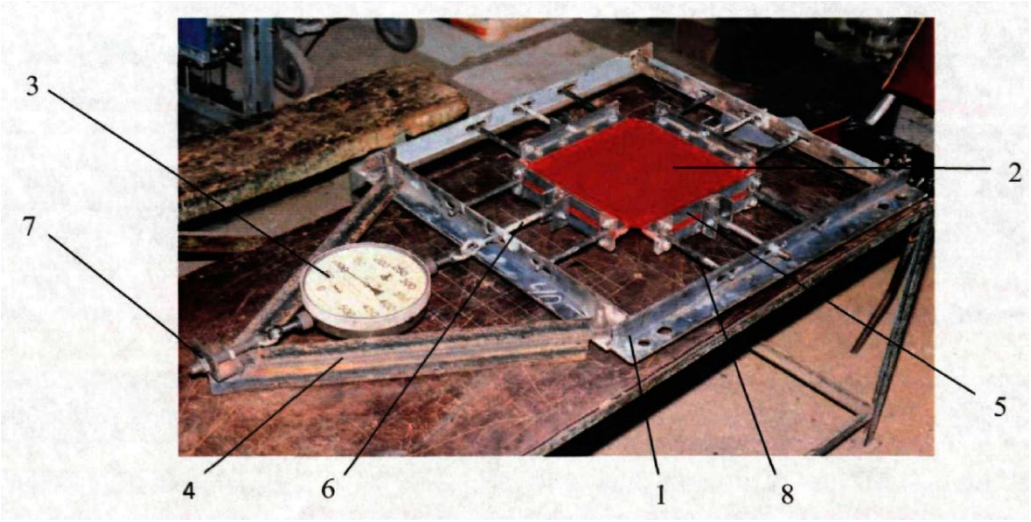


Рисунок 3.4 – Експериментальний стенд для моделювання податливою опалубного поверхні

1 - металева рама; 2 - дослідний зразок; 3 - динамометр; 4 - переставна трикутна рамка; 5 - планки; 6 - рухлива штанга; 7 - натяжна гайка; 8 - направляючі

бетонування. Система дозволяє зворотньо подавати невикористану бетонну суміш у бункер, де вона підтримує свою рухливість завдяки безперервному перемішуванню. Це виключає закупорку матеріалопроводів, мінімізує втрати суміші, а також запобігає забрудненню поверхонь, які не потребують обробки. Розроблена технологічна транспортна система дозволяє максимально швидко перейти на наступну ділянку бетонування без додаткових трудовитрат на зупинку машини і ліквідацію «пробок» в матеріальних трубопроводах шляхом їх промивання. У режимі холостого ходу постійно підтримуються необхідні технологічні властивості бетонної суміші. Розроблений регулювальний пристрій дозволяє підвищити продуктивність праці, ліквідувати втрати бетонної суміші при переміщенні сопла по ділянках бетонування і, як наслідок, знизити матеріаломісткість, підвищити ефективність і надійність роботи установки, підвищити безпеку ведення робіт.

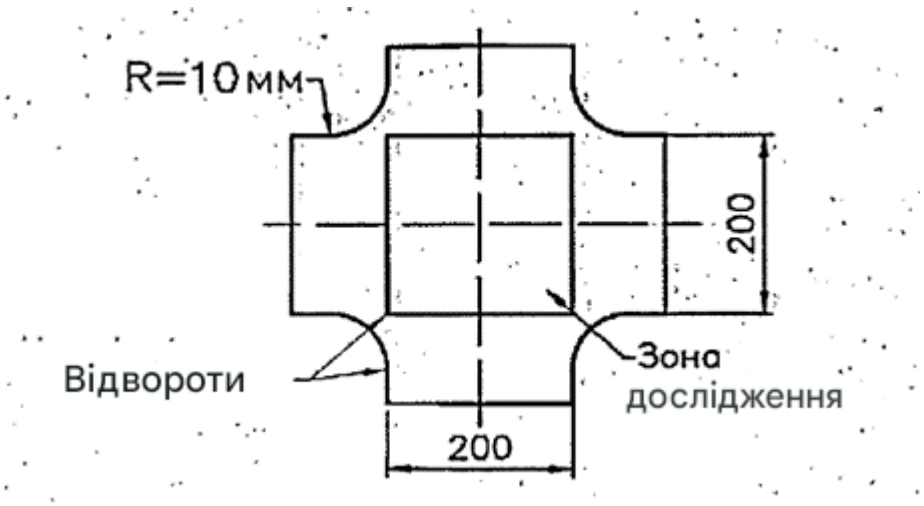


Рисунок 3.5 – Схема дослідного зразка тканини пневмоопалубки

Для моделювання податливої опалубної поверхні автором розроблений і виконаний експериментальний стенд, що представляє собою металеву раму, в середній частині якої розташовується тканинний зразок. Створення двостороннього напруженого стану дослідного зразка, відповідного надлишковому тиску всередині пневмокаркасного модуля, здійснюється за допомогою рухомої штанги і трикутної переставної рамки з динамометром. За допомогою натяжної гайки здійснюється натяг тканинного зразка через рухому

штангу. При досягненні необхідної величини натягу на рухомій штанзі затягується гайка, яка фіксує положення тканинного зразка. По чотирьох сторонах тканинного зразка розташовуються прямокутні відвороти, за допомогою яких тканина закріплюється на металеві планки. Двовісне натяг у дослідних зразках податливої опалубної поверхні варіюється в межах, що відповідають практично застосовним режимам надлишкового тиску всередині пневмокаркасних модульних опалубок. Для виготовлення дослідного зразка використовувалася прогумована тканина, яка застосовується в пневмоопалубках.

В експериментальних дослідженнях застосовувався дрібнозернистий бетон, який використовується при торкретуванні монолітних залізобетонних конструкцій і рекомендований до застосування паспортом торкретної установки Р-13. Вологість піску повинна знаходитися в діапазоні від 2 до 8% по відношенню до абсолютно сухої суміші, так як при зниженій вологості погіршується якість бетону, а при абсолютно сухих заповнювачах структура дрібнозернистого бетону виходить шаруватою. Піски з вологістю 2 - 8% при попередньому перемішуванні компонентів обволікаються цементним порошком, в результаті чого забезпечується найкраща змочуваність суміші з водою і достатня однорідність суміші. В якості в'яжучого використовувався портландцемент ПЦ - 500 ВАТ «Осколцемент». Для з'ясування особливостей процесу ущільнення торкрет-бетону виконувалися дослідження макро- і мікроструктури зразків. Макроструктура вивчалася по фотографіях поверхні зразків, отриманих на різних режимах торкретування. Це дозволило визначити оптимальні технологічні параметри нанесення суміші.

Після випробування зразків на вигин проводилися дослідження мікроструктури торкрет-бетону за допомогою електронного мікроскопа «IEOL JSM 6380LV», який має роздільну здатність 5 нм. Це дало можливість детально вивчити пористу структуру матеріалу в широкому діапазоні. Для вивчення динамічної дії бетонної суміші на натягнуту тканину дослідного зразка до складу експериментальної установки був включений спеціально розроблений стенд. Його загальний вигляд представлений на рисунку 3.6. Під рамою з дослідним

зразком на металевому столі було встановлено віброграф Гейгера, який записував параметри коливального руху зразка у вигляді віброграм.

Таблиця 3.1 – Характеристики мілкого наповнювача

№ п/п	Найменування показників	Розмір показників
1	Модуль крупності	2,59
2	Справжня щільність, кг/м^3	2650
3	Насипна щільність, кг/м^3	1400
4	Порожнеча, %	47
5	Вміст пилоподібних та глинистих частинок, %	10



Рисунок 3.6 – Стенд для дослідження впливу струменя торкрет-бетону на пневмоопалубку

1 - опорна рама стенда; 2 - металевий стіл; 3 - вібрографа Гейгера; 4 - рама з опитним зразком

Нанесення торкрет-бетону здійснювалося в умовах, наближених до виробничих. Температура та вологість повітряного середовища систематично вимірювалися за допомогою баротермогігрометра БМ-2. Перед початком подачі бетону на дослідний зразок бетон протягом 10 хвилин перекачувався по

замкнутому циклу в експериментальній установці, що забезпечувало необхідну рухливість суміші на рівні 80 мм. Для визначення рухливості бетонної суміші використовувався конус СтройЦНІІЛ.

В експериментах витримувалися умови, що відповідали експлуатаційним натягам тканини дослідних зразків пневмокаркасних опалубок. Було прийнято режим навантаження зразків у напрямку основи тканини з діапазоном натягу від 0 до 5 кН/м, від 0 до 15 кН/м та від 0 до 25 кН/м. Навантаження в напрямку, перпендикулярному основі тканини, змінювалося в діапазонах від 0 до 2,5 кН/м, від 0 до 7,5 кН/м та від 0 до 12,5 кН/м.

З огляду на те, що в теоретичній частині вдалося встановити форму залежності між основними технологічними параметрами процесу торкретування і факторами, що впливають на ущільнення торкрет-бетону, програма випробувань складалася з декількох серій. У цих серіях технологічні параметри розглядалися як аргументи функції, що визначає міцність торкрет-бетону. Оскільки технічно було неможливо варіювати параметри послідовно, для аналізу застосовувалися методи математичної статистики. Використовуючи отримані експериментально точки, автор методом математичної статистики із застосуванням ЕОМ вивів рівняння поверхні, яка охоплює всі випадки поєднань параметрів.

Це рівняння дозволило побудувати сімейство площин, яке включає всі точки, що відповідають оптимальним умовам ущільнення для різних значень технологічних параметрів. Побудувавши рівняння регресії для цього сімейства, було отримано залежність, яка може бути використана для практичних розрахунків і визначення комбінацій параметрів, що забезпечують задану міцність торкрет-бетону.

Достовірність отриманих результатів експериментальних даних в значній мірі залежить від мінливості окремих показників дисперсії О2 і коефіцієнта варіації Кв:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n}(x_i - x)^2}{n-1}};$$

(3.1)

$$К_в = \frac{\sigma}{\bar{x}},$$

(3.2)

де q - середньоквадратичне відхилення;

x1 значення величини 1-го виміру із серії експериментів;

- середнє значення виміряної величини; п - кількість зразків із серії; п - 1 - число ступенів свободи;

n - коефіцієнт варіації.

Мінімально допустима кількість зразків пт; п в одній серії визначається за формулою:

$$N_{\min} = \frac{к_в^2 \cdot t}{\varepsilon^2}$$

(3.3)

де t - нормоване відхилення, яке залежить від заданої надійності (довірчої ймовірності у);

Статистична обробка попередньо проведених пошукових-експериментів при визначенні міцності зразків торкрет-бетону показала, що для, отримання, достовірних даних при довірчій, ймовірності у = 0,95 і 5% - м, рівні значущості досить відчувати 4 зразка * з кожної серії. При цьому коефіцієнт варіації склав Кв = 5% ^ показник точності вимірювань г = 5%, а нормоване відхилення прийнято t = 2.

Для проведення експериментальних досліджень основними змінними величинами були визначені параметри, що безпосередньо впливають на якість нанесення торкрет-бетону. До них належать продуктивність установки, діаметр вихідного отвору сопла, відстань до оброблюваної поверхні та сила натягу

тканини пневмоопалубки. Межі варіювання значень цих параметрів були визначені на основі технічних характеристик обладнання та попередніх досліджень.

Продуктивність установки змінювалась у межах від 1,5 до 4,8 м³/год відповідно до паспорта торкрет-машини Р-13. Цей діапазон забезпечує максимальну ефективність при роботі установки.

Діаметр сопла було прийнято в межах від 10 до 30 мм. Мінімальне значення визначене для запобігання засміченню сопла частинками торкрет-бетону. Максимальний діаметр встановлено з урахуванням того, що збільшення розміру сопла понад 30 мм спричиняє зниження швидкості повітряного потоку і зменшення ефективності торкретування.

Відстань до оброблюваної поверхні варіювалася від 0,5 до 1,5 м. Менші відстані призводять до підвищеного відскоку бетонної суміші, а більші — до неоднорідності розподілу матеріалу в зоні бетонування.

Сила натягу тканини була встановлена у межах від 5 до 25 кН/м, що відповідає внутрішньому надлишковому тиску від 30 до 50 кПа в пневмокаркасному модулі. Ці значення були підтверджені експериментальними дослідженнями Воронезького державного архітектурно-будівельного університету.

Водно-цементне відношення прийняте постійним і становило 0,55. Склад бетонної суміші у пропорції 1:2 та марка цементу М500 також залишались незмінними протягом усіх експериментів.

Для оптимального вибору технологічних параметрів у визначених межах було застосоване математичне планування експерименту. Це дозволило мінімізувати кількість необхідних експериментів, визначити їх порядок проведення та встановити раціональні значення факторів, що забезпечують задану міцність торкрет-бетону на стиск.

Області варіювання технологічних факторів, використаних у дослідженнях, зведені у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Умови планування експерименту

Чинники		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
Відстань нанесення H, м	x_1	0,5	1	1,5	0,5
Діаметр сопла D; мм	x_2	10	20	30	10
Продуктивність установки Q, $м^3$/год.	x_3	1,5	3	4,8	…
Натяг тканини №, кН/м	x_4	5	15	25	20

Значення факторів зручно задавати в кодованих величинах: верхній рівень фактора дорівнює +1, нижній -1, середній або основний 0. Продуктивність: торкрет-машини по паспорту може: брати тільки значення: 1,5, 3,0 і 4; 8 м3 / година. Тому, для факторах через неоднакового відстані від основного до нижнього і верхнього уровней- перед кодуванням;

$$x_3^* = -0{,}0572\, x_3^2 + 1{,}3909\, x_3 - 0{,}4576 \qquad (3.4)$$

Для визначення оптимальних значень основних технологічних параметрів торкретування було необхідно побудувати регресійну залежність міцності торкрет-бетону на стиск R, МПа, від досліджуваних факторів. Ця залежність має нелінійний характер, що випливає з аналізу області варіювання параметрів (таблиця 3.2). Для реалізації експериментального дослідження було прийнято трирівневий композиційний план типу. Цей план дозволяє виконувати всі можливі нерепетитивні варіанти дослідів на визначених рівнях факторів.

У таблиці 3.3 представлена матриця планування експерименту, яка визначає порядок і комбінації досліджуваних параметрів. Щоб уникнути систематичних помилок, експерименти виконувалися у випадковій послідовності, яка встановлювалася залежно від умов проведення випробувань.

Таблиця 3.3 – Матриця трирівневого композиційного плану В4

Крапки плану.		Матриця планування				Квадрати змінних.				Взаємодія факторів						Вихідний параметр y_i
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	
N_1	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_1
	2	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	y_2
	3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	Вуз
	4	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	y_4
	5	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
	6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	y_6
	7	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	y_7
	8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	y_8
	9	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	y_9
	10	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	y_{10}
	11	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	y_{11}
	12	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_{12}
	13	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	y_{13}
	14	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	y_{14}
	15	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	y_{15}
	16	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_{16}
N_α	17	+1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{17}
	18	-1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{18}
	19	0	+1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{19}
	20	0	-1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{20}
	21	0	0	+1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	y_{21}
	22	0	0	-1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	y_{22}
	23	0	0	0	+1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	y_{23}
	24	0	0	0	-1	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	y_{24}

Після нанесення торкрет-бетонної суміші і досягнення нею 50% міцності проводилися випробування. З масиву бетону вирізалися зразки розміром 160х 40х40 мм. Зразки бралися з центральної частини масиву, що мінімізувало вплив крайових ефектів на показники міцності та однорідності матеріалу. Надалі ці

зразки витримувалися протягом 28 діб у нормальних температурно-вологісних умовах, відносна вологість 60–65%).

Для кожної серії експериментів відбиралися дев’ять зразків, що забезпечувало дев’ятикратну повторюваність і достатню точність отриманих результатів. Після цього зразки випробовувалися на міцність. Міцність на вигин визначали на випробувальній машині МИИ-100, схема якої представлена на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Випробувальна машина МИИ - 100

$$R = \frac{P \cdot l}{a \cdot b^2} \tag{3.5}$$

де Р - руйнівне навантаження, кгс / см ";

а, видання, 1 - відповідно ширина і висота поперечного перерізу балочки і відстань між опорами при випробуванні зразків, см.

Міцність бетону на стиск визначалася шляхом випробування зразків розміром 80х40х40 мм на гідравлічному пресі ПСУ - 125 (рисунок 3.8). На рисунку 3.9 показаний характер руйнування досвідченого зразка.

Межа міцності на стиск визначався як відношення руйнує сили до початкової площі поперечного перерізу зразка і обчислювався за формулою:

$$R_\sigma = \frac{P}{F} \tag{3.6}$$

Під час випробування зразок-балочка встановлювався на опорній плиті преса таким чином, що зусилля стиснення створювалося в потрібному напрямку потоку бетонної суміші, а сам зразок центрована по його вертикальної геометричній осі, яка збігалася з центром розмічальних ліній преса. Навантаження на зразок зростала рівномірно зі швидкістю не більше 0,2 МПа в секунду, що відповідає вимогам.

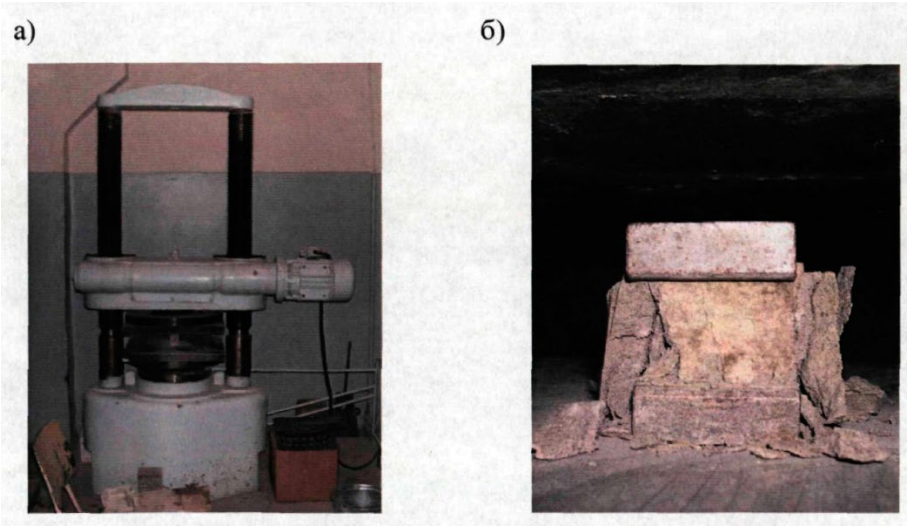


Рисунок 3.8 – Випробування зразків на
стиснення на гідравлічному пресі
ПСУ – 125; руйнування зразка при стисканні

Рівняння регресії, отримане по матриці планування експерименту, має вигляд полінома другого порядку:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 \quad (3.7)$$

3.2 Виконання експериментальних досліджень технологічних параметрів процесу та оцінка отриманих даних

На основі наявного наукового досвіду, міцність торкрет-бетону за умови постійного гранулометричного складу і водоцементного відношення визначається якістю ущільнення суміші в процесі укладання. У межах експериментального дослідження було приділено увагу вивченню конфігурації факела бетонної суміші (рисунок 3.10) під час нанесення на горизонтальну поверхню пневмоопалубки для забезпечення оптимальних умов ущільнення.

Згідно з теоретичною механікою, процес нанесення частинок торкрет-бетону на деформовану поверхню відбувається наступним чином: під час вильоту частинки торкрет-бетону, завдяки тиску стисненого повітря, набувають високої швидкості. Далі вони рухаються в факелі, який розширюється під впливом повітряного потоку, поступово втрачаючи швидкість.

Експериментальні дослідження дозволили отримати дані про параметри факела торкрет-бетону, що нанесений на горизонтальну поверхню пневмоопалубки. Основними змінними параметрами були:

- відстань H між соплом і оброблюваною поверхнею;
- діаметр сопла D (від 10 до 30 мм);
- кут розкриття факела;
- продуктивність установки Q ;

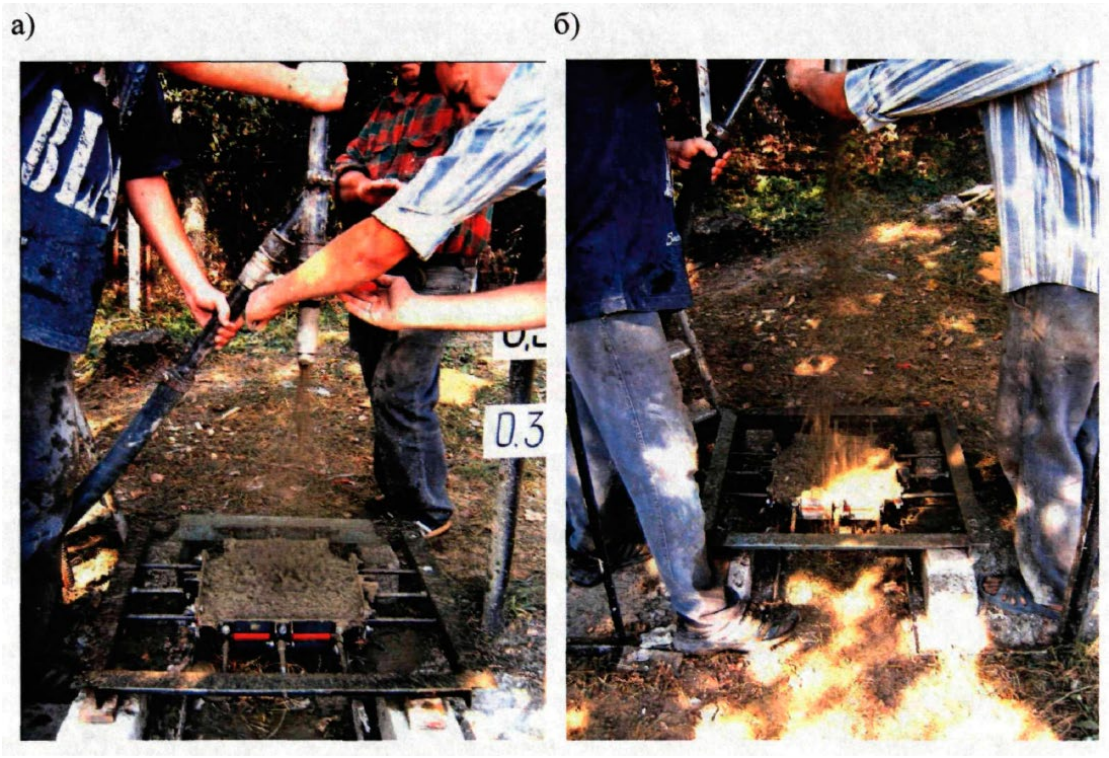


Рисунок 3.10 – Конфігурація струменя торкрет-бетону
а) - при відстані від сопла до поверхні пневмоопалубкі 0,5 м .; б) - при відстані від сопла до поверхні пневмоопалубкі 1,5 м.

- діаметр плями d .

Результати досліджень (таблиця 3.4) показали, що діаметр плями змінюється лінійно залежно від зазначених параметрів Q), H, D, N. Окрім цього, виявлено специфічні особливості «невидимого відскоку», характерного для торкретування горизонтальних поверхонь. Зіткнення частинок із тканиною пневмоопалубки має непружний характер, а матеріальні втрати при такому способі торкретування практично відсутні.

Дослідження розподілу бетонної суміші у плямі показало, що основна частина суміші концентрується вздовж зовнішнього контуру плями. Це пояснюється тим, що частинки в розширюваному повітряному потоці мають високу кінетичну енергію, яка перетворюється на потенційну, витісняючи бетонну суміш у сусідні зони. Вимірювання товщини шару бетону, нанесеного протягом короткого періоду (приблизно 2 с.), дозволило виявити розподіл бетонної суміші, схему якого представлено на рисунку 3.11.

Таблиця 3.4 – Параметри факела нанесеного торкрет-бетону на горизонтальну поверхню пневмоопалубкі

Відстань між соплом і поверхнею, що обробляється, Н, див.	Діаметр сопла, мм.					
	10		20		30	
	Середній розмір плями, d, див.	Кут розкриття факелу, а, град.	Середній розмір плями, d, див.	Кут розкриття факелу, а, град.	Середній розмір плями, d, див.	Кут розкриття факелу, а, град.
Продуктивність Q = 1,5 м / год						
20	8	18	11	19	14	20
30	12	18	15	19	18	20
40	16	18	19	19	22	20
50	20	18	23	19	26	20
60	24	18	27	19	30	20
80	32	18	35	19	34	20
100	42	18	45	19	48	20
120	50	18	54	19	56	20
140	56	18	59	19	64	20
150	60	18	64	19	66	20
Продуктивність Q = 3,0 м^3/год						
20	11	21	14	22	17	24
30	15	21	18	22	21	24
40	19	21	22	22	26	24
50	23	21	26	22	30	24
60	27	21	30	22	34	24
80	35	21	34	22	43	24
100	45	21	48	22	51	24
120	54	21	56	22	60	24
140	59	21	64	22	65	24
150	63	21	65	22	68	24
Продуктивність Q = 4,8 м^3/год						
20	14	28	17	26	20	25
30	18	28	21	26	24	25
40	22	28	25	26	28	25
50	26	28	29	26	32	25
60	30	28	33	26	36	25
80	38	28	42	26	45	25
100	48	28	51	26	54	25
120	56	28	59	26	62	25
140	62	28	65	26	68	25
150	66	28	68	26	70	25

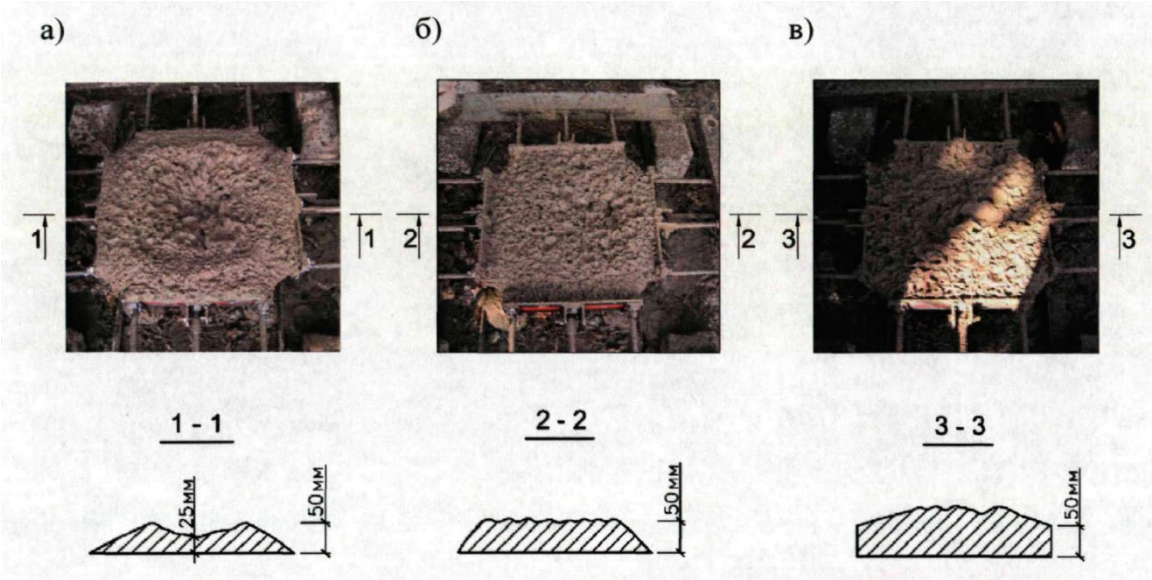


Рисунок 3.11 – Схема розподілу бетонної суміші в плямі торкрет-бетону в Залежно від висоти розташування сопла над торкретіруемим
а) при висоті сопла 0,5 м .; б) при висоті сопла 1,0 м .;
в) при висоті сопла 1,5 м

Аналіз форми «кратера» плями бетонування при зміні технологічних параметрів показав, що форма кратера є інформативним показником, який дозволяє оцінити оптимальність поєднання швидкості підльоту частинок і їх маси з точки зору забезпечення найкращих умов ущільнення.

Експерименти показали, що відстань між соплом і опалубкою суттєво впливає на процес ущільнення торкрет-бетону та його кінцеві властивості. При відстані 0,3–0,5 м спостерігалося інтенсивне розбризкування бетонної суміші, зумовлене високою кінетичною енергією частинок і значним відскоком від поверхні. В таких умовах товщина шару бетону по краях плями сягала 40–50 мм, тоді як у середній зоні — 20–25 мм, що створювало форму кратера.

Збільшення відстані до 1 м забезпечувало рівномірну поверхню плями торкрет-бетону, тоді як при відстані 1,5 м поверхня ставала нерівною та розпушеною. Таким чином, оптимальні умови ущільнення, які забезпечують рівномірну товщину шару та максимальну міцність торкрет-бетону, досягаються

при відстані 1 м між соплом і поверхнею. Подальше збільшення відстані спричиняє зниження кінетичної енергії частинок, що унеможливлює оптимальне ущільнення.

Контроль якості ущільнення здійснювався шляхом вивчення порової структури торкрет-бетону за допомогою електронного мікроскопа, що дозволило детально проаналізувати структуру матеріалу. Дослідження показали, що матеріал характеризується щільною структурою з пористістю не більше 5%. При висоті сопла 0,5 м пористість становила 2,5–3,0%, при 1 м — 2,3–2,5%, а при 1,5 м зростала до 3,0–4,0%. Таким чином, мінімальна пористість досягається при висоті нанесення торкрет-бетону 1 м.

Дослідження також виявили, що збільшення натягу тканини пневмоопалубки сприяє кращому ущільненню матеріалу, знижуючи пористість. Фотографії зразків, отримані при різних значеннях натягу (від 5,0 до 25 кН/м), підтверджують це спостереження.

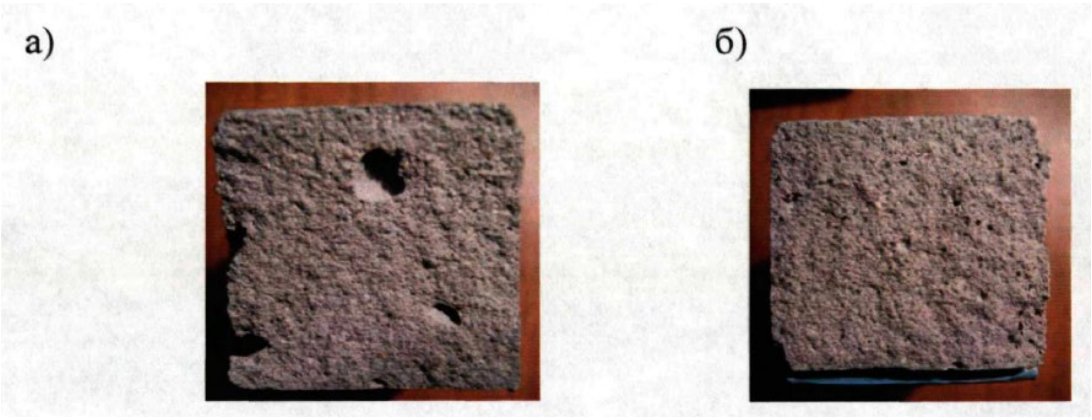


Рисунок 3.12 – Фотографії зразків при різному натягу тканини N
а) N = 5,0 кН / м; б) N = 25 кН / м

Вплив продуктивності установки на структуру торкрет-бетону також було досліджено. Збільшення продуктивності в межах 1,5–3,0 м³/год знижувало пористість матеріалу до мінімального значення при продуктивності 3,0 м³/год. Проте подальше підвищення продуктивності до 4,8 м³/год призводило до збільшення пористості та появи великих раковин у макроструктурі.

Оцінюючи розподіл пір по висоті зрізу, було встановлено їхню нерівномірність. Найбільша кількість пір спостерігається в нижній частині зрізу, де їхня кількість приблизно на 20% більша, ніж у верхньому шарі. Це підтверджує наявність «прихованого відскоку», який впливає на якість ущільнення.

Таким чином, оптимальне поєднання технологічних параметрів, таких як відстань до поверхні, продуктивність установки, діаметр сопла та сила натягу тканини пневмоопалубки, дозволяє досягти максимальної щільності торкрет-бетону з мінімальною пористістю, забезпечуючи проектну міцність матеріалу.

У дослідженні проведено серію експериментів, спрямованих на аналіз взаємодії торкрет-бетону з податливою поверхнею пневмоопалубки. Для цього застосовували спеціальний стенд, конструкція якого наведена на рисунку 3.6. Коливання тканини, натягнутої з різними зусиллями, реєструвалися за допомогою вібрографа Гейгера. Основна увага приділялася вимушеним вертикальним коливанням тканини в її середній частині. Висота розташування сопла була встановлена на рівні 1 м, а продуктивність установки — 3 м³/год. Характерна віброграма процесу наведена на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13 – Зразок торкрет-бетону при продуктивності торкрет-машини 4,8 м / ч, відстані від сопла 1 м., Натягу тканини пневмоопалубкі 25 кН / м

Аналіз віброграм показав, що коливання носять випадковий характер і на більшості ділянок значно відрізняються від гармонійних. Коливання швидко затухають до моменту потрапляння наступної порції бетону, що підтверджується високими коефіцієнтами загасання (від 1,5 до 3,25). Декремент коливань

знаходився в діапазоні від 0,41 до 1,17. Найвищі амплітуди спостерігалися при попаданні першої порції бетонної суміші на тканину, досягаючи 2,6 мм, тоді як наступні порції впливали менш інтенсивно.

Частоти коливань тканини змінювалися в широкому діапазоні навіть у межах однієї серії експериментів. Це пояснюється динамічним зростанням маси пневмоопалубки внаслідок наростання бетонного шару. Для тканин із натягом 5–15 кН/м частоти коливань варіювалися в межах 18–26,7 Гц, а для натягу 15–25 кН/м — у межах 26–40 Гц. Середнє значення частоти коливань при збільшенні натягу зростало в 2,05 рази. Це свідчить, що підвищення натягу тканини знижує амплітуду коливань, сприяючи ефективному ущільненню торкрет-бетону біля гнучкої опалубки.

Для визначення оптимальних технологічних параметрів торкретування бетонної суміші на горизонтально розташовану пневмоопалубку було заплановано та реалізовано чотирифакторний експеримент із використанням D-оптимального трирівневого композиційного задуму типу B4. Як критерій оптимальності технології торкретування прийнято властивості міцності отриманих конструкцій, що узгоджується з підходами, застосованими для торкретування твердих поверхонь.

У проведеному дослідженні визначено основні технологічні параметри, які впливають на міцність торкрет-бетону. Розглядались такі фактори:

- Відстань від вихідного отвору сопла до ділянки бетонування на горизонтально розташованій пневмоопалубці (H, м).

- Діаметр вихідного отвору сопла (D, мм).

- Продуктивність торкрет-машини (Q, м³/год).

- Натяг тканини пневмоопалубки (N, кН/м).

Межі варіювання цих факторів визначалися на основі апріорної інформації для охоплення області можливих оптимальних значень. Значення факторів задавались у кодованих величинах із верхнім рівнем (+1), нижнім (-1) і середнім (0). Перехід до кодованих величин здійснювався згідно з методикою [10], параметри якої наведені в таблиці 3.2.

Для проведення експерименту використовувався план, результати якого представлено в таблиці 3.6. Аналіз даних включав:

- Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії методом найменших квадратів.
- Перевірку значущості коефіцієнтів за критерієм Стьюдента.
- Оцінку адекватності моделі за критерієм Фішера.

Отримано рівняння регресії для міцності торкрет-бетону:

На основі гістограми ранжування факторів встановлено значущість окремих факторів, а рівняння регресії може бути використано для практичних розрахунків у виробничих умовах.

Таким чином, експериментальні дослідження підтвердили, що оптимальні умови для торкретування досягаються при продуктивності торкрет-машини м³/год, що забезпечує найбільшу міцність торкрет-бетону незалежно від інших параметрів у межах їхніх оптимальних значень.

Аналіз залежності представленої на рисунку 3.19, дозволив встановити, що лінії відгуку по обидва координатним осях мають незначну кривизну. При цьому максимальні значення Ясж отримуємо при висоті Н = 1,0 м і діаметрі Б = 10 мм.

З розгляду рисунків 3.16-3.18 слід, що найбільші значення міцності торкрет-бетону відповідають висоті Н = 1,0 м, силі натягу N = 25 кН / м і діаметром сопла 0 = 10 мм.

У дослідженні проведено аналіз залежності міцності торкрет-бетону від ключових технологічних параметрів. З графіків (рисунки 3.22-3.24) встановлено такі закономірності:

1. Залежність міцності бетону від продуктивності установки (рисунок 3.22):

Міцність бетону спочатку зростає зі збільшенням продуктивності до точки перегину, після чого знижується. Оптимальне значення продуктивності становить 3,0 м³/год. Міцність у точці перегину залежить від висоти Н:

- Н = 0,5 м: R = 23,0 МПа.
- Н = 1,0 м: R = 23,8 МПа.
- Н = 1,5 м: R = 22,5 МПа.

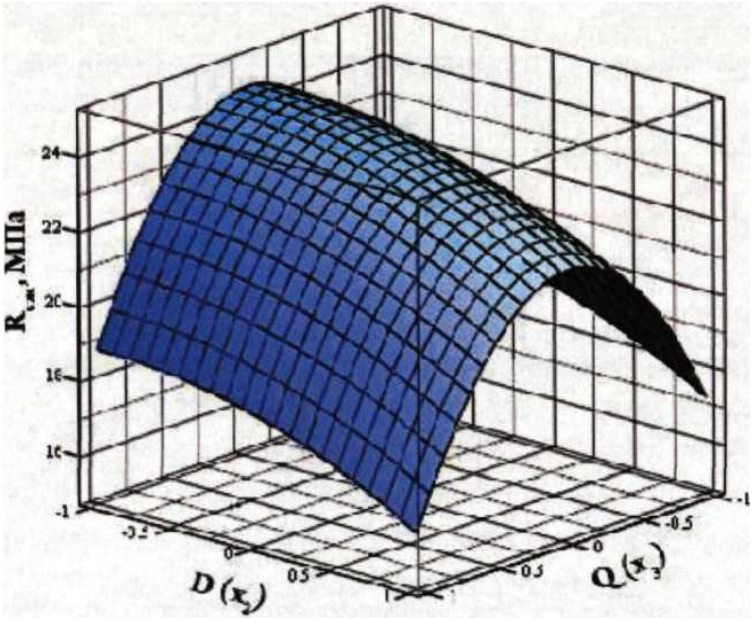


Рисунок 3.16 – Залежність міцності торкрет-бетону від продуктивності торкрет-машини Q і діаметра сопла D при відстані від сопла H = 1,0 м, і натягу пневмоопалубкі N = 25 кН / м

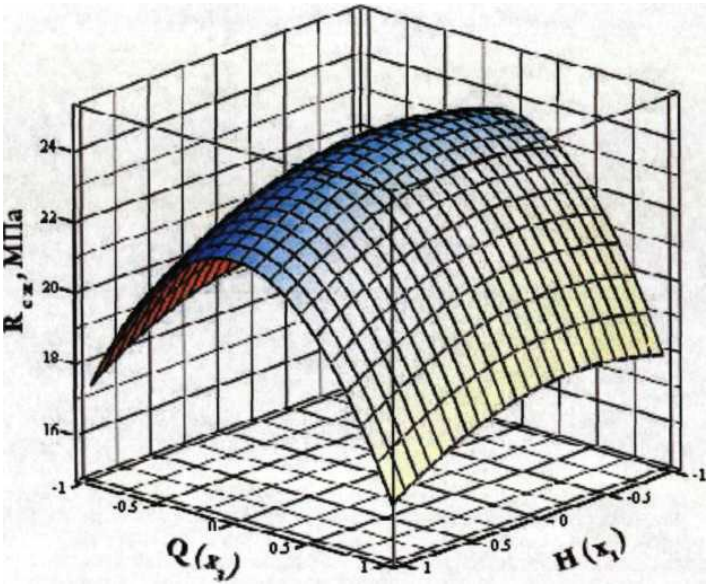


Рисунок 3.17 – Залежність міцності торкрет-бетону від продуктивності торкрет-машини Q і відстані від сопла H при діаметрі сопла D = 10 мм, і натягу пневмоопалубкі N = 25 кН / м

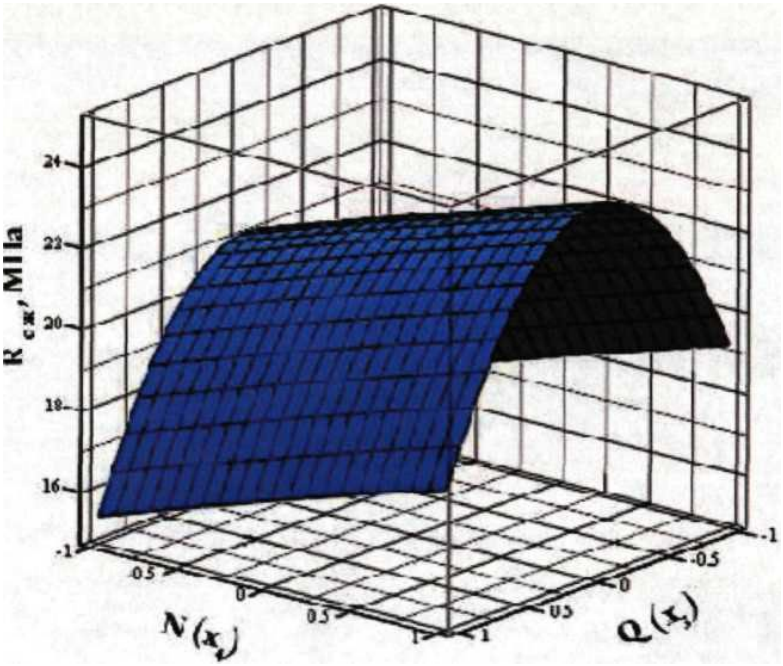


Рисунок 3.18 – Залежність міцності торкрет-бетону від продуктивності торкрет-машини Q і натягу пневмоопалубкі N при відстані від сопла H = 1,0 м, і діаметрі сопла D = 10 мм.

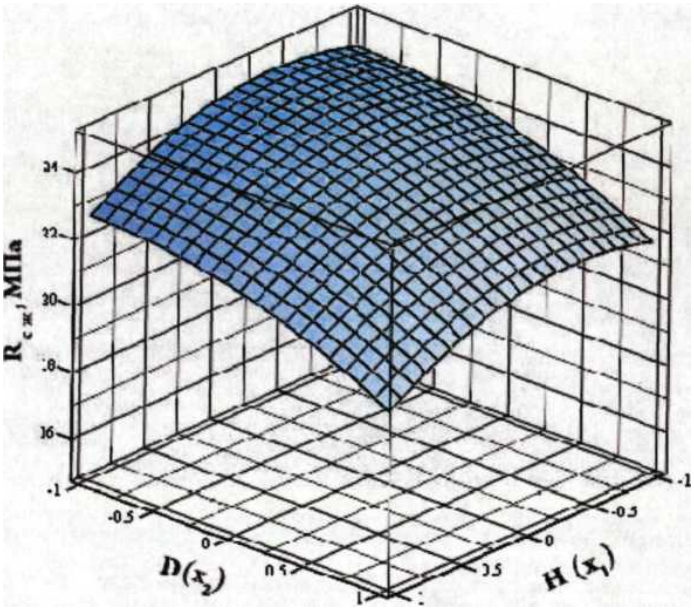


Рисунок 3.19 – Залежність міцності торкрет-бетону від відстані від сопла H і діаметра сопла D при продуктивності торкрет-машини Q = 3,0 м3/ч і натягу пневмоопалубкі N = 25 кН / м

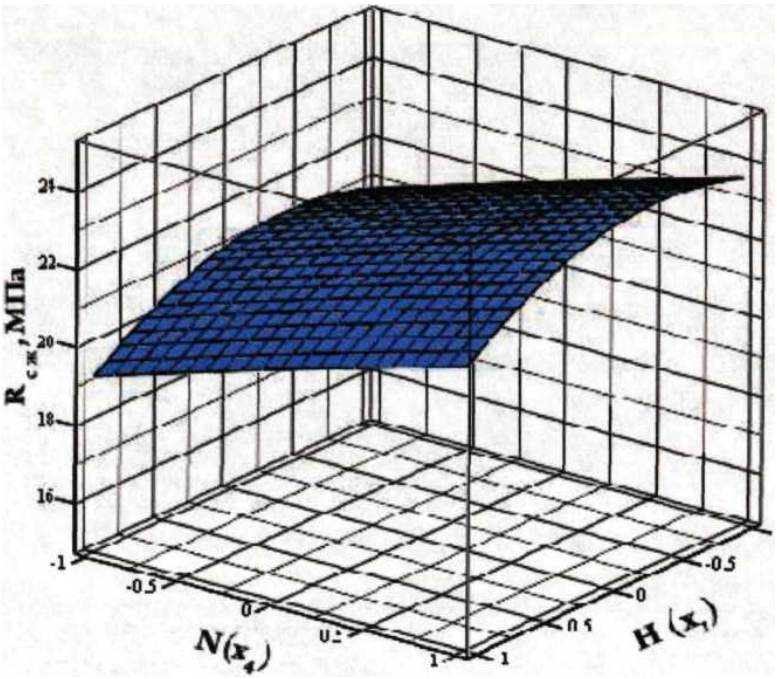


Рисунок 3.20 – Залежність міцності торкрет-бетону від натягу пневмоопалубкі N і відстані від сопла H при діаметрі сопла D = 10 мм. і продуктивності торкрет-машини Q= 3,0 м3 / год.

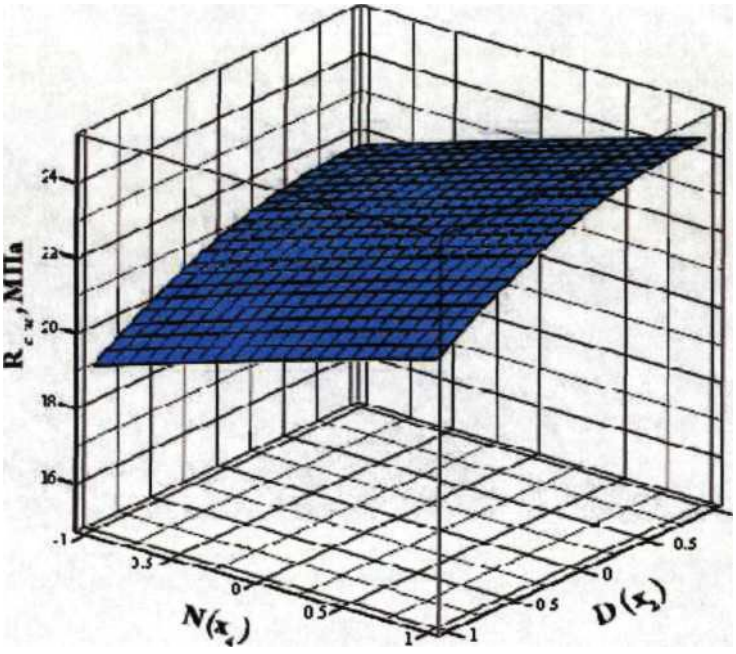


Рисунок 3.21 – Залежність міцності торкрет-бетону від натягу пневмоопалубкі N і діаметра сопла D при відстані від сопла H = 1,0 м, і продуктивності торкрет-машини Q= 3,0 м3 / год.

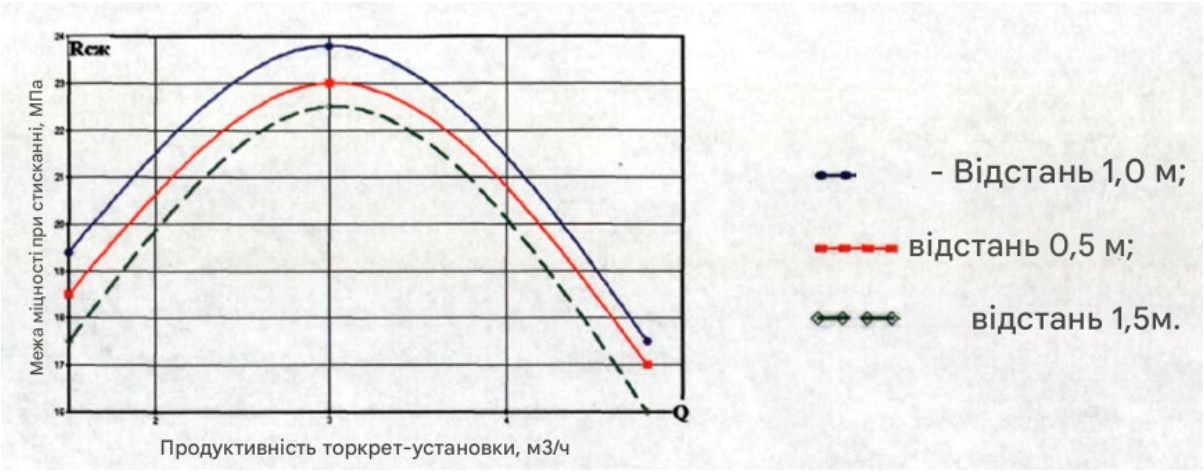


Рисунок 3.22 – Залежність міцності Rсж торкрет-бетону від продуктивності установки Q при максимальному натягу марки N = 50 кН / м, діаметрі сопла D = 20мм і різних відстанях H до пневмоопалубкі

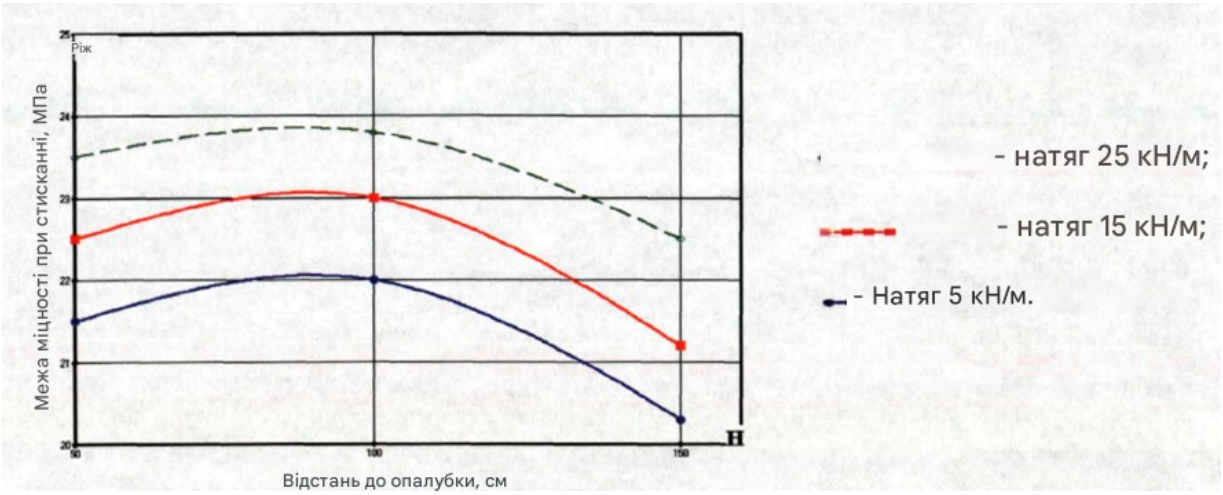


Рисунок 3.23 – Залежність міцності R торкрет-бетону від відстані H до пневмоопалубки при продуктивності установки Q = 3м^3 / г, діаметрі сопла D = 10 мм при різних значеннях натягу тканини N.

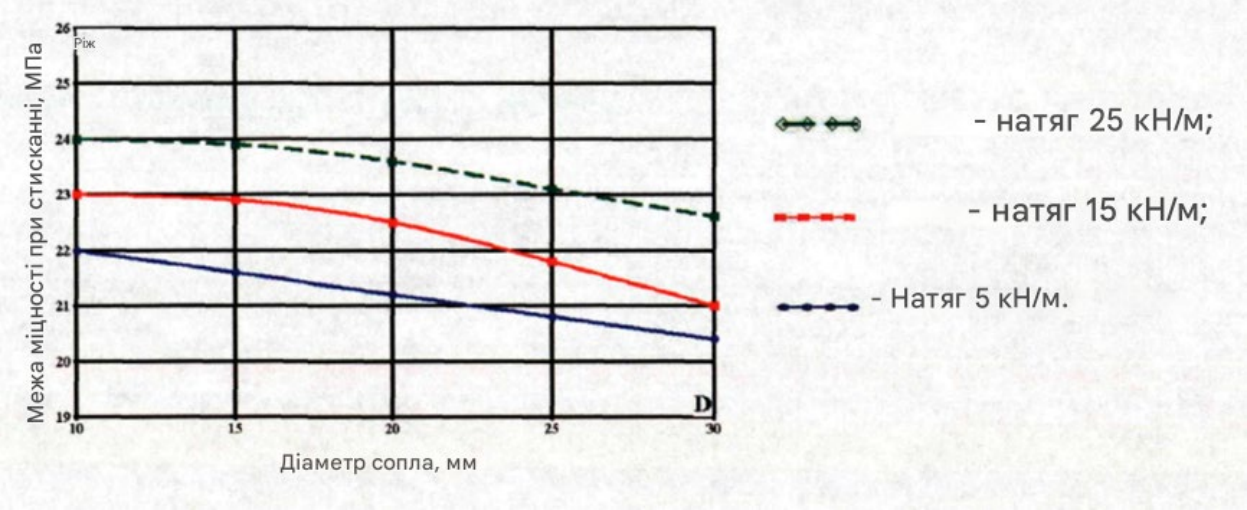


Рисунок 3.24 – Залежність міцності R торкрет-бетону від діаметра сопла D при продуктивності установки Q= 3м^3 / г, відстані до пневмоопалубки H = 1,0 м при різному натягу тканини N

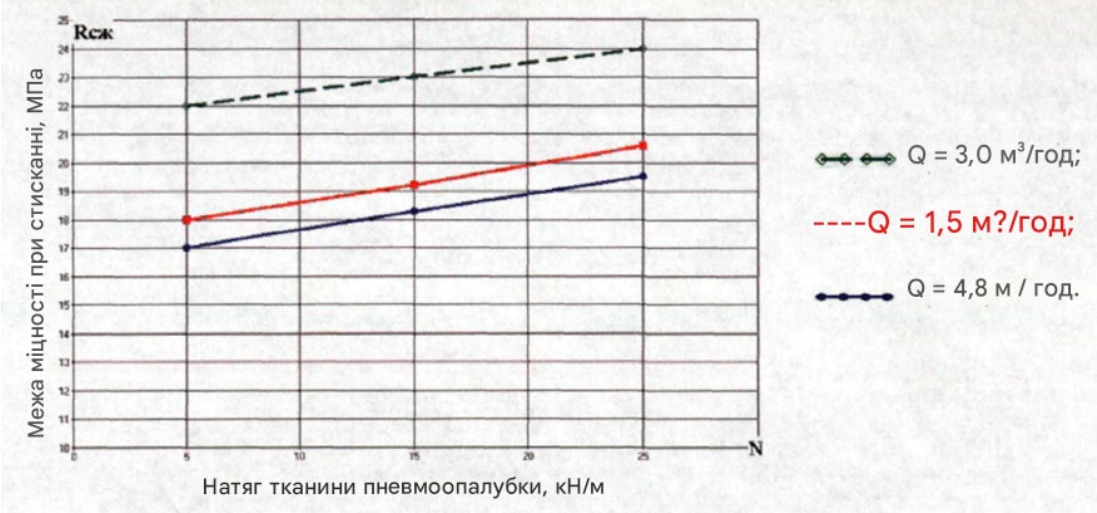


Рисунок 3.25 – Графіки залежності міцності Rвід сили натягу тканини N при діаметрі сопла D = 10 мм, відстані до марки H = 1 м і різних значеннях продуктивності установки Q

Максимальне значення міцності відповідає відстані H = 1,0 м, що забезпечує оптимальні умови ущільнення суміші.

2. Залежність міцності бетону від відстані до оброблюваної поверхні при різному натягу тканини (рисунок 3.23):

Найбільша міцність досягається при H = 1,0 м для всіх рівнів натягу тканини:

- N = 5 кН/м: R = 18 МПа.

- N = 15 кН/м: R = 19,2 МПа.

- N = 25 кН/м: R = 20,6 МПа.

Збільшення натягу тканини на 20 кН/м підвищує міцність на 14,4%. Це підкреслює необхідність забезпечення максимального натягу пневмоопалубки.

3. Залежність міцності бетону від діаметра сопла (рисунок 3.24):

Міцність бетону зменшується зі збільшенням діаметра сопла, що пояснюється зниженням швидкості потоку суміші. При діаметрі сопла від 10 до 30 мм міцність бетону зменшується до 8%. Графіки також показують, що вищий натяг тканини сприяє підвищенню міцності.

Загальні висновки:

- Для досягнення оптимальної міцності бетону необхідно встановлювати висоту H = 1,0 м і продуктивність установки Q = 3,0 м³/год.

- Максимальний натяг тканини пневмоопалубки забезпечує кращі умови ущільнення і підвищення міцності торкрет-бетону.

- Збільшення діаметра сопла знижує міцність бетону, тому його розмір повинен бути мінімально достатнім для уникнення закупорки.

Експериментально встановлено, що величина міцності торкрет-бетону залежить від сили натягу тканини м'якої опалубки. На рисунку 3.25 показано сімейство графіків) при різних значеннях продуктивності установки: 1,5; 3,0; 4,8 м '/ год.

Аналіз графіків на цьому рисунку показує, що вони мають лінійний характер: чим більше сила натягу марки, тим більше міцність бетонної суміші.

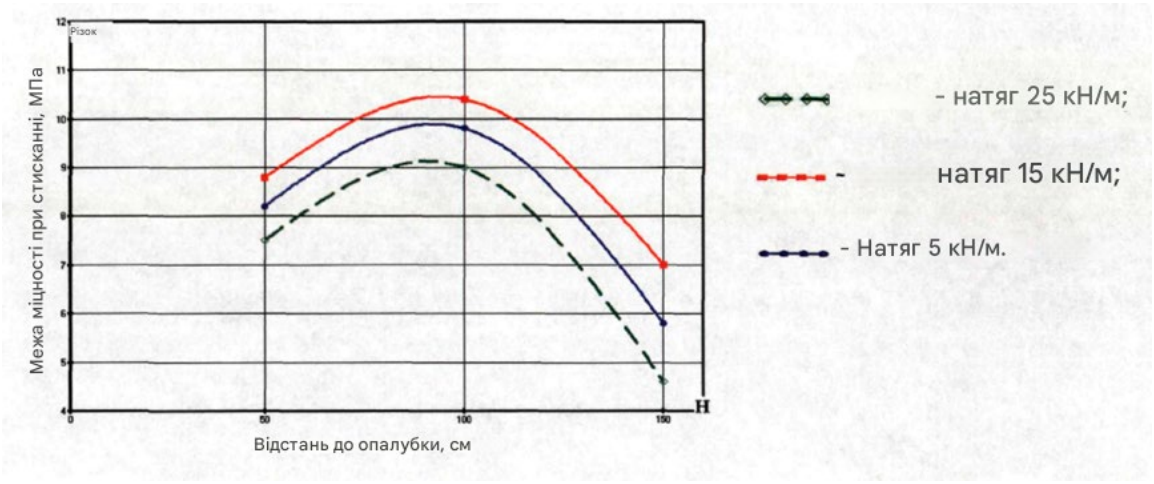


Рисунок 3.26 – Графіки залежності міцності R при діаметрі сопла D = 20 мм, продуктивності установки Q = 3 м^3/г, натягу 5, 15, 25 кН / м. при різному натягу тканини N

В ході експериментальних досліджень впливу різних технологічних параметрів на міцність торкрет-бетону була проведена серія експериментів з визначення міцності зразків торкрет-бетону на вигин. На рисунку 3.26 представлені у вигляді графічних залежностей дані міцності на вигин Яізг при зміні відстані від сопла до оброблюваної поверхні для гнучкої тканини з різним натягом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень, який підтвердив ефективність застосування технології торкретування бетонних сумішей із використанням горизонтально розташованих пневмокаркасних опалубних модулів у будівництві.

2. Розроблено фізико-математичну модель, яка враховує особливості поведінки частинок торкрет-бетону при їх взаємодії з горизонтальною пневмоопалубкою, залежно від основних технологічних параметрів:

- продуктивність торкрет-машини;
- діаметр сопла;
- відстань від сопла до поверхні нанесення;
- натяг тканини пневмоопалубки.

3. Створено модель установки з системою транспортування бетонної суміші по замкнутому циклу, що забезпечує:

- підвищення продуктивності праці;
- підвищення ефективності та надійності роботи;
- зниження матеріаломісткості;
- підвищення безпеки проведення робіт.

4. У ході експериментальних досліджень визначено раціональні значення технологічних параметрів, що забезпечують оптимальну міцність торкрет-бетону:

- продуктивність торкрет-машини: 3,0 м³/год;
- висота розташування сопла: 0,9–1,1 м;
- діаметр сопла: 10 мм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ К.: Мінрегіонбуд, 2009. 48 с. (національний стандарт України).

2. EN-206:2013. Concrete–Specification, Performance, Production and Conformity; European Committee for Standardization (CEN): Belgium, Brussels, 2013.

3. Гембарський Л.В., Стовпник С.М., Вапнічна В.В. Технологія, механізація та організація геотехнічного будівництва: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 160 с.

4. Артюх В.Г., Санніков І.В. Торкрет-бетон у цивільних будинках, що реконструюються". Журнал "Будівництво України", 2007. №3. С. 11-14.

5. Дюженко М.Г., Кацман А.Я., Барчук А.С., Павлов А.П. Набризк-бетонні роботи в будівництві: навчальний посібник. Київ: Будівельник, 2010. 120 с.

6. Мостков В.М., Воллер І.І. Торкретування в будівництві: навчальний посібник. Київ : ВШ, 2008. 263 с.

7. ДСТУ EN 206:2018 Бетон. Технічні вимоги, експлуатаційні характеристики, виробництво та критерії відповідності (EN 206:2013 + A1:2016, IDT) [чинний з 01.01.2019] ДП Київ «УкрНДНЦ»).

8. Осипов О.Ф., Осипов С.О. Основи формалізації факторів, що впливають на технологію відновлення будівельних конструкцій. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2022. No 50(2). С.12–20.

9. Giacomo Di Foggia Energy efficiency measures in building for achieving sustainable development goals. Heliyon. 2018. Vol. 4, Issue 11.

10. Г Тонкачеєв, К Носач. Вплив властивостей бетонної суміші на технологію влаштування стовпчастих фундаментів. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах ринкових відносин. 2020. № 45. С.102–111.

11. І Rudnieva, І Priadko, N Priadko, Н Tonkacheiev. Особливості та

перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2020 № 7, С. 12–22

12. Шарикіна Н. В. Технологічні особливості ремонту залізобетонних онструкцій. Будівельне виробництво. Київ: ДП «НДІБВ», 2020. Вип № 69. С. 28–34.

13. Дорошенко О. Ю. Розробка технології ремонту бетонних покриттів транспортних споруд в умовах глобального потепління. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології», 2018. Вип.32. Т.2 С. 26–31.

14. Коваленко О. В. Особливості відновлення та захисту бетону гідротехнічних споруд водогосподарсько-меліоративного комплексу. Меліорація та водне господарство. Київ, 2016. Вип. 104. С. 126–132.

15. Офіційний сайт Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: https://mtu.gov.ua/.

16. V. Chandana, C. Venkatasubramanian. An Experimental Study on the Repair of Concrete Crack by Shotcrete Technique. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Vol. 9, Issue 5, May 2018, pp. 611–617

17. Спосіб ремонту будівельних конструкцій .Пат. Україна № 26905. МПК E04G 23/00. Дата подання 31.05.2007 Дата публікації 10.10.2007. 4 с.

18. Кононенко А.Н. Анализ основных деградационных процессов в бетоне и арматуре железобетонных конструкций. Науковий вісник будівництва. Вип №38. Харків: ХДТУБА. 2007. С. 251–255.

19. Соколов Г.К. Технологія та організація будівництва: посібник. Дніпро: центр .2006. 528с.

20. Пашечко О. А. Виробництво робіт з влаштування монолітних залізобетонних конструкцій. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія: Економіка*. 2013. Вип. 24. С. 39-43.

21. Сердюк В.Р., Франишина С.Ю. Технологія індустріального будівництва з монолітного бетону. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2009. №4. С.17-21.

22. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [На заміну ДСТУ Б В.2.7-46-96; чинний з 01.09.2011]. Київ: ДП «Орган з сертифікації цементів «СЕПРОЦЕМ», 2011. 13 с

23. Шишкіна О.О., Шишкін О.О. Вплив змінних навантажень і температур на адгезію гіпсоцементного бетону. Нові технології в будівництві. Вип. № 38 2020 С.44–50.