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**: «Технологія укріплення основ будівель та споруд термічним методом»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1923-пцб-дн
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
освітньої програми «Промислове і цивільне будівництво»
Альшаєв В.С.
Керівник доц., к.т.н. Шокарєв Є.О.
Рецензент ст. викл, к.т.н. Арутюнян Є.Е.

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

Альшаєв Вадим Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Технологія укріплення основ будівель та споруд термічним методом
Керівник роботи Шокарєв Євген Олександрович, 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 31.01.2025 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 вітчизняний та зарубіжний досвід технології укріплення грунтів основ будівель та споруд; обґрунтувати вибір генератора плазми для термічного зміцнення грунтових основ на будівельному майданчику; визначити параметри ефективного технологічного процесу поверхневого і глибинного термічного зміцнення грунтових основ*
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	Шокарєв Є.О., доц.		
Розділ 2	Шокарєв Є.О., доц.		
Розділ 3	Шокарєв Є.О., 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 Актуальні погляди на питання термічного зміцнення ґрунтів у будівельній галузі	27 листопада	
2	Розділ 2 Моделювання технологічних процесів термічного впливу на ґрунти з використанням концентрованих потоків низькотемпературної плазми	25 грудня	
3	Розділ 3 Обґрунтування оптимальних параметрів технологічного процесу термічного зміцнення ґрунтових основ	27 січня	

Студент _____ В.С. Альшаєв
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

Керівник роботи _____ Є.О. Шокарєв
(підпис) *(ініціали та прізвище)*

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

АНОТАЦІЯ

Альшаєв В.С. Технологія укріплення основ будівель та споруд термічним методом.

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

Розглянуто технологію термічного зміцнення ґрунтових основ за допомогою плазмотрона. Визначено ключові труднощі процесу: нерівномірна структура ґрунту, низька теплопровідність, висока теплоємність та теплові втрати. Запропоновано оптимальні параметри обробки тонких шарів пухкого ґрунту та методику глибинного зміцнення шляхом подачі ґрунту в лідерну свердловину. Регулювання пористості та міцності термогрунту досягається шляхом зміни технологічних режимів. Ефективність процесу забезпечується оптимізацією роботи плазмотрона та дотриманням вимог до його конструктивних елементів.

Ключові слова: укріплення основ, термічний метод, грунтозміцнення, будівельні технології, тепловий вплив, фізико-механічні властивості ґрунтів, осадка фундаментів.

Список публікацій магістранта:

Альшаєв В.С., Шокарєв Є.О. Технологія укріплення основ будівель та споруд термічним методом. 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. 515-517.

ABSTRAKT

Alshayev V.S. Technology of strengthening the foundations of buildings and structures by the thermal method.

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

The technology of thermal strengthening of soil foundations using a plasma torch is considered. The key difficulties of the process are identified: uneven soil structure, low thermal conductivity, high heat capacity and heat loss. The optimal parameters for processing thin layers of loose soil and the method of deep strengthening by feeding soil into a leader well are proposed. Regulation of porosity and strength of thermal soil is achieved by changing technological modes. The efficiency of the process is ensured by optimizing the operation of the plasmatron and compliance with the requirements for its structural elements.

Keywords: foundation reinforcement, thermal method, soil reinforcement, construction technologies, thermal impact, physical and mechanical properties of soils, foundation settlement.

List of master's publications:

Alshayev V.S., Shokaryev E.O. Technology of strengthening the foundations of buildings and structures by the thermal method. 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. 515-517.

ЗМІСТ:

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1 АКТУАЛЬНІ ПОГЛЯДИ НА ПИТАННЯ ТЕРМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ҐРУНТІВ У БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ 9

1.1 Основні стадії еволюції теорії та впровадження термічного зміцнення ґрунтів у будівництві 9

1.2 Методики поверхневого й глибинного термічного зміцнення ґрунтових структур і масивів 16

1.3 Застосування плазмових технологій для термічного зміцнення ґрунтів 27

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ НА ҐРУНТИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕНТРОВАНИХ ПОТОКІВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ 41

2.1 Обґрунтування вибору генератора низькотемпературної плазми 41

2.2 Розробка моделі технологічного процесу глибинного термічного оброблення ґрунтів 50

РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ҐРУНТОВИХ ОСНОВ 60

3.1 Планування та проведення експериментальних досліджень, використання полум’яного обладнання 60

3.2 Аналіз технологічних параметрів процесу термічного зміцнення ґрунтових основ 68

3.3 Встановлення оптимальних режимів експлуатації плазмотрона та підвищення його надійності 90

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 99

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 100

ВСТУП

Актуальність теми. Темпи будівництва в багатьох регіонах України гальмуються через нестачу місцевих будівельних матеріалів та значну віддаленість будівельних майданчиків від індустріальних баз у умовах недостатньо розвиненої транспортної інфраструктури. Одним із можливих рішень цієї проблеми є застосування місцевих ґрунтів у якості основи для багатоповерхових житлових будинків і споруд, попередньо стабілізованих або зміцнених за допомогою поверхневих чи глибинних методів. На сьогодні активно використовуються різноманітні підходи до покращення будівельних властивостей ґрунтів, зокрема їх ущільнення, введення хімічних реагентів або застосування в'яжучих матеріалів. Проте кожен із цих методів має свої обмеження, які залежать від гідрологічних та ґрунтових умов, структурних і текстурних характеристик ґрунтів, а також їхнього походження та складу.

Метод термічного зміцнення вигідно вирізняється своєю технічною, економічною та екологічною ефективністю. Однією з ключових переваг цього підходу є низька матеріаломісткість отриманих конструкцій, оскільки основним ресурсом для їх створення є місцевий ґрунт. При цьому енерговитрати на його обробку залишаються відносно невисокими.

Метою **магістерської роботи** є Оптимізація процесів створення надійних та економічно вигідних основ для будівель і споруд шляхом термічного зміцнення ґрунту безпосередньо на будівельному майданчику. Для цього використовуються мобільні плазмові установки, які забезпечують нагрівання ґрунту до стану плавлення.

Для досягнення даної мети були додатково поставлені і вирішені наступні **завдання**:

Для цього потрібно було вирішити такі **завдання**:

- дослідити вітчизняний і міжнародний досвід використання технологій зміцнення ґрунтів, які застосовуються для основ будівель і споруд;

- обґрунтувати вибір оптимального генератора плазми, який забезпечить ефективне термічне зміцнення ґрунтових основ безпосередньо на будівельному майданчику;

- встановити ключові параметри ефективного технологічного процесу для реалізації поверхневого та глибинного термічного укріплення ґрунтів.

Об'єкт дослідження — технологічний процес зміцнення ґрунтових основ за допомогою плазмових установок.

Предмет дослідження — складові елементи технологічної системи, оптимальне поєднання яких забезпечує розробку ефективних конструктивно-технологічних рішень для термічного укріплення ґрунтів.

Методи досліджень включали систематизація та аналіз досвіду укріплення ґрунтів основ споруд в Україні та за кордоном, дослідження сучасного стану теорії та практики організаційно-технологічної підготовки ремонтно-будівельного виробництва, оцінка технологічних рішень, що застосовуються у цьому напрямі, проведення теоретичних досліджень і обробка отриманих результатів.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що обґрунтовані оптимальні технологічні методи, параметри та режими термічної обробки ґрунтів, які забезпечують цілеспрямовану та незворотну зміну їх стану, структури та конфігурації для створення укріплених основ із заданими характеристиками.

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 101 сторінки. Включає 30 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел з 20 пунктів.

1 АКТУАЛЬНІ ПОГЛЯДИ НА ПИТАННЯ ТЕРМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ҐРУНТІВ У БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

1.1 Основні стадії еволюції теорії та впровадження термічного зміцнення ґрунтів у будівництві

Термічне зміцнення є одним з фізичних методів покращення будівельних властивостей ґрунтів. Воно ґрунтується на впливі теплового поля, яке викликає незворотні зміни в складі, структурі та фізико-механічних характеристиках ґрунтів. Дослідження та аналіз історичних аспектів розвитку теорії та практики термічного зміцнення ґрунтів дозволили систематизувати отримані дані і виділити три основні етапи еволюції цієї проблеми. У запропоновану систематизацію увійшли технологічні чинники, що визначають можливість досягнення певних результатів — щільність теплового потоку та температура джерела теплової енергії.

Найдовшим був перший етап історичного розвитку, що розпочався ще в далекі часи, приблизно до 15-го тисячоліття до н.е. Уже тоді була відома здатність змінювати фізико-механічні властивості глинистих ґрунтів за допомогою тепла. Основними продуктами, які отримували при випалюванні в простих печах, були різноманітні гончарні вироби та керамічна цегла. Археологічні дослідження показали, що в 700 році до н.е. для мощення вулиць, будівництва осель і храмів активно використовували обпалену цеглу та плити. Розкопки в ряді російських міст підтвердили, що в XI-XIII століттях деякі площі та двори були вимощені цеглою. Подібні покриття також були виявлені в Грузії. Одна з перших доріг з клінкерним покриттям була побудована в 1809 році в Голландії. В Росії з 1844 року розпочалося будівництво доріг з клінкерної бруківки, а до кінця 30-х років XX століття протяжність таких доріг вже вимірювалася тисячами кілометрів.

Перша спроба термічної обробки ґрунтів на будівельному майданчику була зафіксована наприкінці XIX століття. У 1887 році було проведено випал глинистого ґрунту для отримання баласту при спорудженні земляного полотна залізниці. У 1896-1898 роках Ф.І. Кнорринг здійснив роботи з укладання підпірної стінки на зсувній схилі. Існують окремі свідчення щодо першого випалювання глини безпосередньо на дорожньому полотні, яке мало місце в США в долині річки Міссісіпі в 1906 році. Випал здійснювався в траншеях, що перекривалися, або в великих купах, висотою до 3 м і діаметром до 16 м, і тривав щонайменше три дні. Вже в 1927 році громіздкий процес випалу в купах був замінений на використання портативних підлогових печей.

У всіх цих випадках обпалений матеріал являв собою шматки ґрунту з перепалами і недожогом, які набували червоного кольору під впливом високої температури. Після охолодження печей матеріал розсипався по поверхні дороги, починаючи з більших шматків і поступово переходячи до дрібних, які ущільнювались.

Визначимо кілька характерних рис першого етапу розвитку науки і практики термічного зміцнення ґрунтів у будівництві:

1. В основному виготовляли штучні будівельні матеріали за допомогою стаціонарних нагрівальних пристроїв, а випал ґрунтів безпосередньо на будівельному майданчику був не таким поширеним.

2. Нагрівання ґрунту здійснювалося за допомогою спалювання вугілля, деревини, а іноді й нафти.

3. Через відсутність механізованих засобів і значну трудомісткість процесів, продуктивність випалу ґрунтів і виготовлення виробів була низькою.

4. Перед випалюванням природний ґрунт завжди подрібнювався, а потім обпалювався у вигляді окремих часток або виробів, виготовлених із подрібненого матеріалу.

5. Інформація про термічну обробку ґрунтів мала уривчастий, описовий характер, а сам процес дослідження цієї проблеми протікав дуже повільно й емпірично.

Значення експериментальних досліджень першого етапу полягає в тому, що вони продемонстрували реальну можливість застосування термічного зміцнення ґрунтів, в тому числі в умовах будівництва, та забезпечили перші відомості про процеси, що супроводжують випал ґрунтів.

Перехід до другого етапу розвитку проблеми термічного зміцнення ґрунтів був закономірним і зумовлений кількома факторами.

Період 20-30 років XX століття відзначався стрімким розвитком промисловості, сільського господарства та будівництва. Водночас збільшились темпи як промислового, так і цивільного будівництва, що вимагало створення надійних фундаментів та великої кількості стінових матеріалів. Автомобіль поступово став основним видом транспорту, замінивши гужовий. Це спричинило підвищення навантажень на колеса і інтенсивності руху, а також потребу в автомобільних дорогах з поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Такі зміни були характерні для всіх видів транспортного будівництва.

З розвитком науково-технічного прогресу значно прискорився обмін інформацією та досвідом. З'явилися нові, потужніші джерела теплової енергії, розроблені за оригінальними конструкціями.

Початок комплексних і систематичних досліджень з розробки методів зміцнення ґрунтів в Росії був покладений у 1925 році в Москві під керівництвом професора І.М. Філатова і в Ленінграді під керівництвом професора В.В. Охотіна. В цей час науковою основою розроблених методів став принцип обліку та максимального використання характеристик ґрунтів, що визначаються їх гранулометричним і хіміко-мінералогічним складом.

Важливим фактором розвитку технічної меліорації стало вчення К.К. Гедройца, а також роботи П.А. Земятченського, С.С. Морозова, В.М. Безрука та їх учнів. У 1928 році була опублікована одна з перших робіт, присвячених термообробці ґрунтів – «Поліпшення глинистих ґрунтових доріг випалюванням» (М.М. Філатов). Дослідження щодо прогріву ґрунтів проводились у лабораторіях Дорн (пізніше СоюздорНІІ) та САДИ. Розробка теоретичних основ випалу ґрунтів розпочалася в провідних наукових установах, таких як НДІБК Держбуду

СРСР, НПОПС, Гії Фундаментпроект, МІСД ім. В.В. Куйбишева, ХабПЖТ та інших.

У процесі проведених досліджень були розроблені методи та пристрої, які дозволяють здійснювати термічне зміцнення ґрунтів не лише на поверхні, але й у глибині. При цьому поверхневе зміцнення передбачало обробку ґрунтів з порушеною структурою, а глибинне — з незмінною.

У 30-40 роках з'явилися перші машини для поверхневої термообробки ґрунтів. Це були мобільні газогенераторні печі (Ірвін, 1931 рік), машини для електричного плавлення (Н.В. Буров, 1933 рік), а також комбайни для випалу (С.С. Бекнев, 1934 рік). Також є відомості про експерименти з випалювання ґрунтових поверхонь у США (1932 рік), Німеччині (1949 рік) та інших країнах. Незважаючи на конструктивні відмінності, ці пристрої мали спільні характеристики: машини повільно переміщувались по поверхні ґрунту, випалюючи його за допомогою пальників, розташованих під теплоізоляційними кожухами. Технологія обробки ґрунту проводилась до моменту спікання на глибину 3-5 см.

Перші дослідження та розробки способу глибинного зміцнення ґрунтів з непошкодженою структурою розпочалися у 1934 році під керівництвом Н.А. Осташева. У 1947 році І.М. Литвинов отримав авторське свідоцтво на винахід нового способу глибинного зміцнення ґрунтів, який здобув широку популярність у практиці будівництва. У розробці цього методу також брали участь співробітники ЮжНІ-ІПС А.Б. Беляков, П.К. Черкасов та інші.

З 1928 року почалися систематичні дослідження по створенню штучних пористих заповнювачів, таких як керамзит, аглопорит, спучений перліт та інших. Окрім того, в цей період були опубліковані теоретичні роботи, що роз'яснювали структуру та властивості скла, зокрема гіпотеза Лебедєва (1921 рік) та гіпотеза Захаріансена (1932 рік). У 1930 році був створений Державний експериментальний інститут скла.

Оцінюючи підсумки другого етапу розвитку методів термічного зміцнення ґрунтів, можна зробити низку висновків:

1. Дослідження вийшли на більш високий рівень якості. Була створена велика кількість наукових установ, що активно працюють в цій галузі. В результаті можна стверджувати, що виник окремий напрямок науки, який займається вивченням причин і наслідків термічних процесів у ґрунті.

2. Напрями як теоретичних, так і експериментальних досліджень значно розширились. Окрім традиційних тем, таких як штучні керамічні вироби, були включені нові напрямки: глибинне зміцнення ґрунтів, виготовлення випалювальних наповнювачів та інші.

3. Переміщення експериментальних досліджень безпосередньо на будівельний майданчик стало важливим кроком у розвитку. З’явилися перші механізовані засоби для випалювання ґрунтів, що призвело до збільшення продуктивності технологічних процесів.

4. Для обігріву ґрунтів почали широко застосовувати нафтові продукти та газ. Також з'явилися спеціалізовані нагрівальні пристрої, такі як форсунки та пальники, а також теплові генератори.

5. За відносно короткий час було створено значний науково-технічний потенціал, який став основою для подальшого розвитку термічного зміцнення ґрунтів у будівництві.

Кінець 50-х років став відправною точкою для третього етапу розвитку цієї проблеми, який триває й досі. Цей етап характеризується подальшим поглибленням знань у сфері термічних перетворень силікатних матеріалів. На цей період припадає створення нових високоміцних скловидних силікатних матеріалів, таких як ситалл (1957 рік, МХТИ ім. Д. І. Менделєєва), пірокерам у США, вітрокерам у Німеччині та девітрокерам у Японії. Відкриття методу спрямованої кристалізації скла стало однією з важливих подій XX століття.

У 1950 році був заснований Інститут хімії силікатів АН СРСР, а також розпочато виробництво нових матеріалів, таких як керамзитовий гравій (1956 рік), аглопорит (1959 рік) і спучений перліт (1960 рік). До 1965 року СРСР став лідером у світі з виробництва керамзиту.

У 1960-ті роки в країні утворилися великі наукові колективи, що успішно працювали над створенням та вдосконаленням різноманітних методів зміцнення ґрунтів. Важливу роль у координації досліджень та обміні інформацією почали відігравати всесоюзні наради, що зосереджувались на закріпленні та ущільненні ґрунтів. Одним з важливих етапів стало впровадження глибинного термічного зміцнення лісових ґрунтів (І.М. Литвинов). Все частіше для термообробки ґрунтів стали використовувати електронагрівне обладнання, яке розробляли фахівці, такі як Д.С. Слободкін (1959 рік), Г.Д. Чупрунов, Р.Г. Погасян (1965 рік), А.С. Трегуб (1975 рік). Водночас відбулося значне вдосконалення конструкцій паливних пальників та були розроблені нові методи випалювання ґрунтів.

У 1959 році була опублікована монографія, присвячена високочастотному нагріванню матеріалів, в якій були узагальнені результати досліджень, що проводилися з 1930-х років, та показана принципова можливість термообробки ґрунтів за допомогою ВЧ та СВЧ-нагрівання. Планомірні роботи в цій галузі продовжувались у Ленінградському НІІТВЧ. У 1971 році В.С. Шибаєва отримала авторське свідоцтво на метод термічного зміцнення ґрунтів у СВЧ-полі. З 1980 року під керівництвом Л.В. Гончарової на кафедрі інженерної геології МДУ проводяться дослідження з НВЧ-нагріву ґрунтів. Аналіз літератури та власні дослідження підтверджують, що застосування НВЧ-енергії є перспективним методом термічного зміцнення, хоча й супроводжується певними труднощами.

Кожен етап розвитку методів термічного зміцнення ґрунтів відзначається заміною джерел теплової енергії. Третій етап характеризується переходом від використання палива до електротермічних установок. Цей процес є об'єктивним і відповідає загальним тенденціям. Зокрема, у всьому світі спостерігається зменшення використання газу та нафтопродуктів як палива, водночас зростає виробництво електричної енергії на АЕС та ТЕС, що використовують низькосортне вугілля. Так, частка АЕС у виробництві електроенергії становить: 21% у США, 65% у Франції, 40% у Швеції, 20% у Росії. Крім того, неможливо очікувати значних інновацій чи революційних рішень у традиційних системах спалювання газу та рідких палив. Великі наукові центри, що працювали над

рідинними та газовими пальниками у Франції, Нідерландах і Німеччині, припинили свою діяльність через відсутність замовлень. Теоретична та практична межа температури тривалої роботи оптимальних пальників становить 2700-3000 К, що недостатньо для прискорення процесу термічної обробки ґрунтів.

Електротермічні пристрої мають низку переваг порівняно з полум'яними установками: можливість концентрації значної потужності в компактному обсязі, досягнення високих температур, простота в регулюванні температурного режиму, герметизація робочого простору, зручність автоматизації та механізації, поліпшення умов праці та компактність обладнання. Завдяки цим перевагам електронагрівні установки дозволяють досягати температури розплаву ґрунту вже при перших експериментах (1959 рік) на будівельних майданчиках.

Близько 35 років тому розпочалися дослідження щодо застосування генераторів низькотемпературної плазми в будівельних технологіях. Важливий внесок у розвиток плазмового обладнання для цієї галузі внесли вчені Інституту технічної фізики СО РАН під керівництвом М.Ф. Жукова, А.С. Аніакова, А.Н. Тимошевського, а також інші фахівці, серед яких Г.Г. Шиманович, А. Л. Моссе, Н.В. Пашацький, В.С. Безсмертний та ін.

Протягом більше 20 років в ТГАСУ проводяться значні дослідження в галузі плазмових будівельних технологій, де сформувалася провідна наукова школа, очолювана такими фахівцями, як Г.Г. Волокітін, В.Н. Єфименко, Н.К. Скрипникова. Важливим вкладом у розвиток методів термічного зміцнення ґрунтів стали роботи Г.А. Задворнева та Б.М. Зарубіна, проведені спільно з Інститутом технічної фізики СО РАН. Вперше термообробка ґрунтів за допомогою генераторів низькотемпературної плазми була проведена не тільки в лабораторних умовах, але й на будівельних майданчиках.

Перспективні наукові дослідження з плазмової обробки гранульованого глинистого ґрунту при виробництві керамічного матеріалу (кераміту) здійснюються під керівництвом В.М. Єфименка. Наукові роботи в галузі

плазмової термообробки ґрунтів для дорожнього будівництва ведуться під керівництвом В.П. Нікітіна.

Отже, на третьому етапі розвитку методів термічного зміцнення ґрунтів, результати фундаментальних досліджень були успішно реалізовані в ефективні будівельні технології, які базуються на електротермічних методах впливу. Це дозволяє значно інтенсифікувати процеси термообробки ґрунтів, впроваджувати автоматизацію, створювати компактне, екологічно чисте та енергоефективне обладнання та технології.

1.2 Методики поверхневого й глибинного термічного зміцнення ґрунтових структур і масивів

Початкові експерименти з поверхневого зміцнення ґрунтів на будівельних майданчиках були проведені близько 100 років тому в транспортному будівництві. Перші спроби використовувати тривале спалювання дров та вугілля на поверхні ущільненого земляного полотна не дали значних позитивних результатів. Під впливом вогню на поверхні з'являлася тріщини, а товщина обпаленої шкіри не перевищувала 3-4 см. Проте досліди не припинилися і були продовжені.

Зокрема, по всій ширині попередньо розпушеного земляного полотна вирили канави, які перекривали дровами для формування піддувала. Зверху укладали шари матеріалів, починаючи з глиняних грудок, далі йшли дрібні гілки, потім знову більш дрібні грудки, і так далі. Завершувалося це насипом подрібненого ґрунту. Гарячі гази, що виникали при горінні палива, нагрівали верхні та бокові шари грунту. Після вигоряння палива і охолодження поверхні протягом 2-4 діб, обпалений матеріал висипався в канави, після чого його розрівнювали і дробили для подальшого ущільнення.

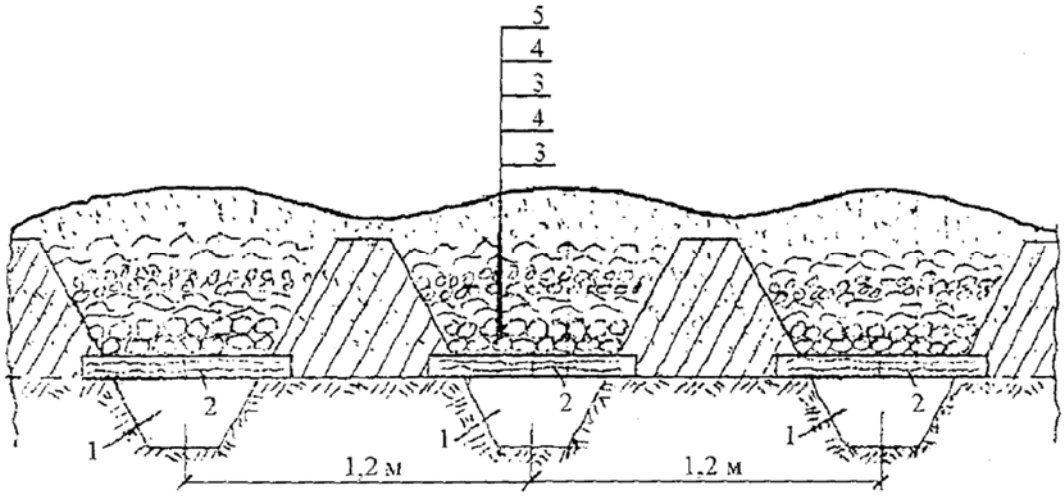


Рисунок 1.1 – Схема випалу глинистого грунту на земляному полотні

Глинисті грунти обпікалися в купах і підлогових печах різноманітної конструкції (рис. 1.2).

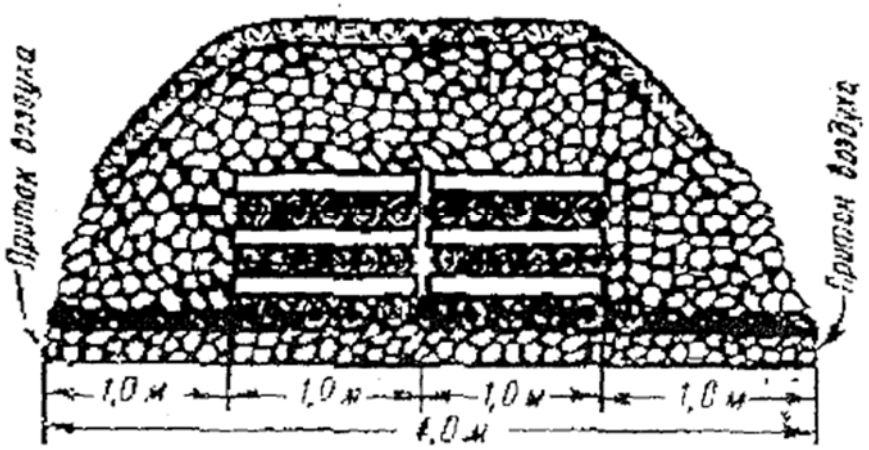


Рисунок 1.2 – Випал грунтів в купах

У одній з ранніх робіт у галузі термічного зміцнення ґрунтів В.М. Безрук довів, що при випалюванні глинистого ґрунту збільшується частка піщаних фракцій через зменшення вмісту глини. Він також зазначив, що гранулометричні зміни в оброблених ґрунтах завершуються при температурі 800 К, і подальше підвищення температури не змінює складу, але веде до руйнування поглинаючого комплексу. М.М. Філатов запропонував терміни для опису ступеня випалу глинистих ґрунтів, зокрема «опесочення» та «окірпічення»

ґрунту. Спроби механізованої обробки ґрунтів на земляних полотнах тривають і сьогодні, причому обробляються як щільні, так і пухкі поверхневі шари.

Однією з перших машин, розроблених для випалу ґрунту, була гартівна піч, що пересувалася по земляному полотну й використовувала газогенераторний газ (Австралія, 1931 рік). Перша російська випалювальна машина складалася з шести ланок загальною довжиною близько 20 м і пересувалася по рейках зі швидкістю від 10 до 40 м/день. Випал здійснювався за допомогою форсунок, які подавали нафту в топку. У цих машинах поверхня ґрунту нагрівалася до температури близько 1300 К, утворюючи обпалений тріщинистий шар товщиною 3-5 см, який був підстелений шаром опесоченого ґрунту.

У літературі можна знайти ще кілька десятків варіантів машин для поверхневого випалу ґрунтів. Наприклад, термогазодинамічна машина, де ніж зрізає ґрунт, який потім подається транспортером у бункер, а далі піддається впливу надзвукової газової струмені. Розігрітий гранульований ґрунт потрапляє на екран і потім на земляне полотно, де його вирівнюють скребком і обжимають катком. Остаточне формування шару відбувається при ущільненні трамбівкою. Усе обладнання монтується на масивному саморушному шасі.

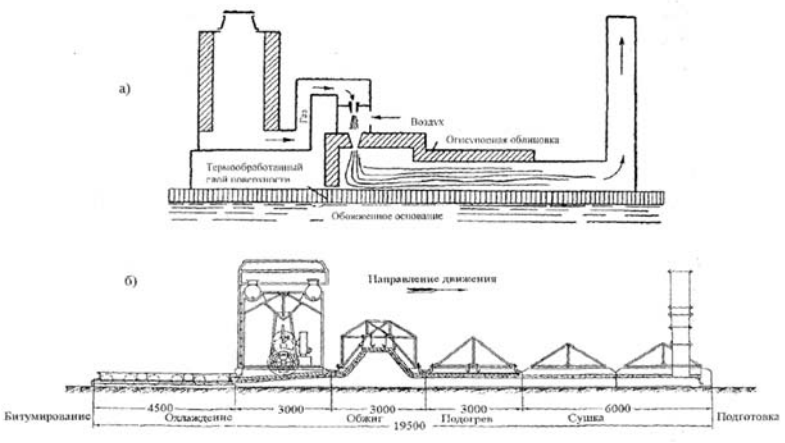


Рисунок 1.3 – Схема газогенераторної печі (а) і обпалювальної машини (б)

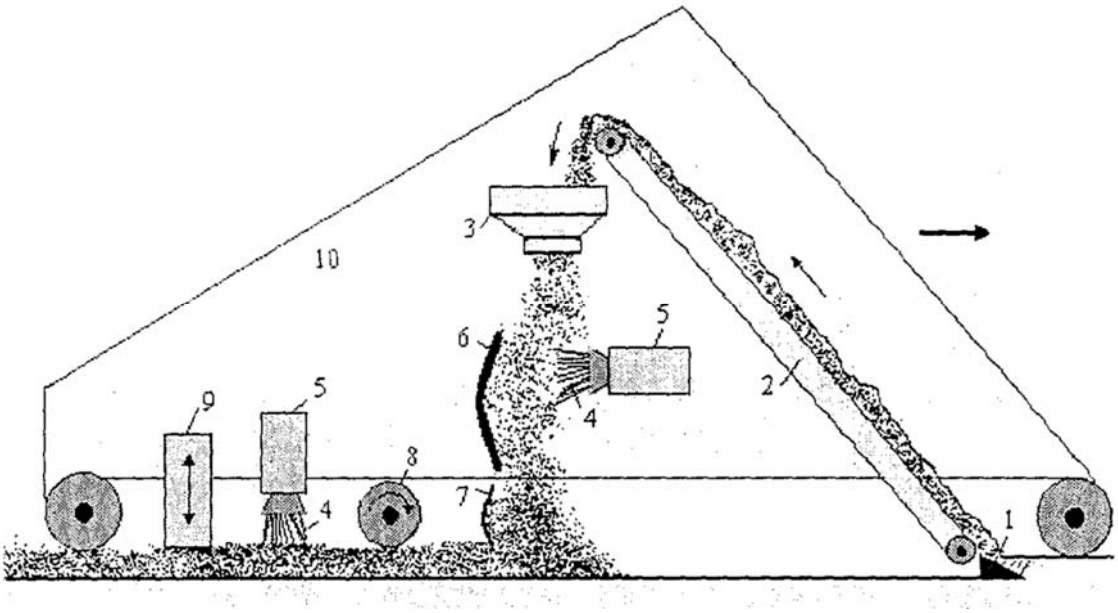


Рисунок 1.4 – Термогазодинамічна машина

Ще одним прикладом розвитку машин для поверхневого випалу ґрунтів є установка Ю.В. Варламова. Особливість роботи цієї установки полягає в обробці зрізаного, гранульованого (1-2 см) та збагаченого добавками ґрунту. Для цього використовуються генератори ультразвукових коливань, що оснащені магнітострикційними вібраторами. Процес термообробки ґрунту складається з двох етапів: попереднього (700-1000 К) і основного (1200-1700 К). Завершальний етап формування шару з обпалених гранул полягає в ущільненні, яке здійснюється за допомогою вібраційного катка.

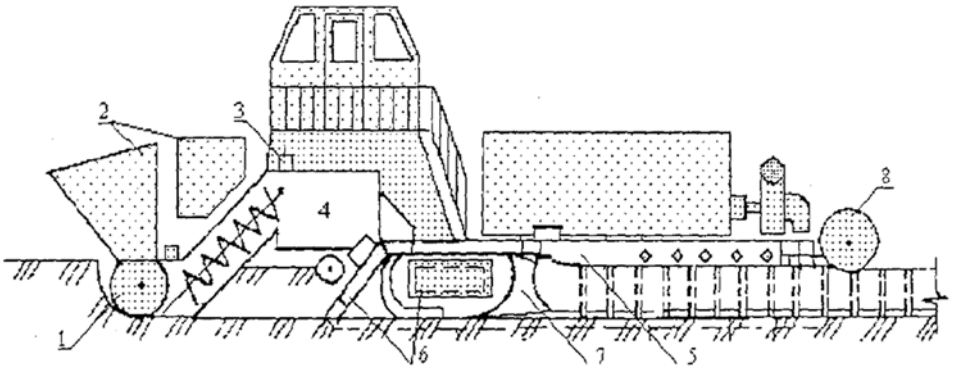


Рисунок 1.5 – Установка для термічного зміцнення верхнього шару основи: 1 шнек; 2-бункери для добавок; 3-форсунки; 4-гранулятор; 5 камера випалу; 6 - магніто-стрікціонний і ультразвукової вібратори; 7 - дрени; 8 - вібраційний каток

У цій магістерській роботі ми не приділяємо великої уваги виробництву матеріалів із термооброблених ґрунтів, отриманих на заводах чи в напівстаціонарних установках кар'єрів (таких як керамзит, аглопорит, керамдор тощо). Ці питання детально розглянуті в численних публікаціях і є окремим напрямом у сфері термічної обробки ґрунтів. Іншим самостійним напрямком є виробництво штучних керамічних виробів. Однак значний обсяг теоретичних та практичних знань з випалювання керамічних матеріалів, представлених у монографіях і статтях, має важливе значення і був врахований при вивченні плазмової термообробки ґрунтів. Огляд наукових публікацій у сфері термічного зміцнення ґрунтів дозволив узагальнити основні результати досліджень, що було візуалізовано на схемі, яка показує шляхи покращення ефективності технологічного процесу термічного зміцнення ґрунтів.



Рисунок 1.6 – Структурна схема шляхів підвищення ефективності механізованої термообробки грунтів

Підвищення ефективності термічного зміцнення ґрунтових основ може бути досягнуте через поліпшення машин та механізмів, зміну властивостей ґрунтів, а також оптимізацію технологічних процесів термічної обробки. Ці напрямки були реалізовані в ході досліджень, проведених у рамках магістерської роботи.

Глибинне зміцнення. Вважається, що перші дослідження в сфері глибинного термічного зміцнення ґрунтів були розпочаті в 1934 році (Н.А. Осташев), а результати були опубліковані в 1935 році. Однак є інформація, що подібні роботи з випалювання ґрунтів у траншеях, з одночасним зміцненням навколишнього ґрунтового масиву, проводилися ще в XIX столітті. Цей процес також можна віднести до глибинної термообробки ґрунтів.

Метод, запропонований Н.А. Осташевим, полягав у нагнітанні повітря, нагрітого до температури 550...800 К, в пористу лісову породу через свердловини. Повітря нагрівалося в спеціальних печах, що працюють на рідкому паливі, і подавалося в свердловини через жаротривкі труби.

А.А. Стороженко запропонував підвищити температуру повітря до 850...1200 К і подавати його в свердловини під тиском 0,15...0,18 МПа. Завдяки фільтрації нагрітих газів через ґрунтовий масив останній втрачає свої просадочні властивості, зміцнюючи територію радіусом 1...1,5 м навколо свердловини.

Удосконалений метод був запропонований в 1947 році А.Ф. Беляковим, І.М. Литвиновим і П.К. Черкасовим. Цей метод, відомий як «Метод Литвинова», полягає в тому, що зміцнення масиву лесових просідаючих ґрунтів здійснюється через нагрів газами, отриманими від спалювання рідких або газоподібних палив безпосередньо в гирлі або стовбурі свердловини, через форсунки або пальник.

Герметизація свердловини дозволяла підвищити тиск до 0,02...0,05 МПа, що значно підвищувало ефективність процесу. Метод Литвинова отримав визнання і почав використовуватись на будівельних об'єктах України з 1953 року. З деякими удосконаленнями цей метод застосовується й сьогодні.

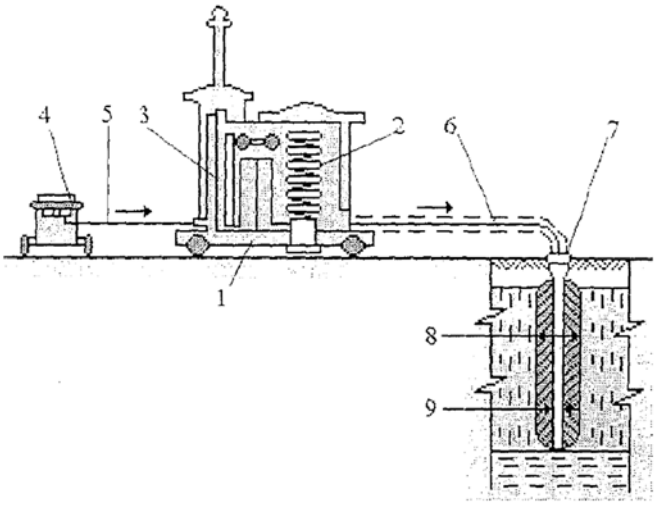


Рисунок 1.7 – Схема глибинної термообробки грунтів за методом Н.А. Осташева:

1-агрегат для нагрівання повітря; 2 піч зі змійовиком; 3 економайзер для попереднього підігріву повітря відходять продуктами згоряння; 4 компресор; 5 трубопровід холодного повітря; 6 Термоізольований трубопровід гарячого повітря; 7- затвор свердловини; 8- зона зміцненого грунту; 9-свердловина

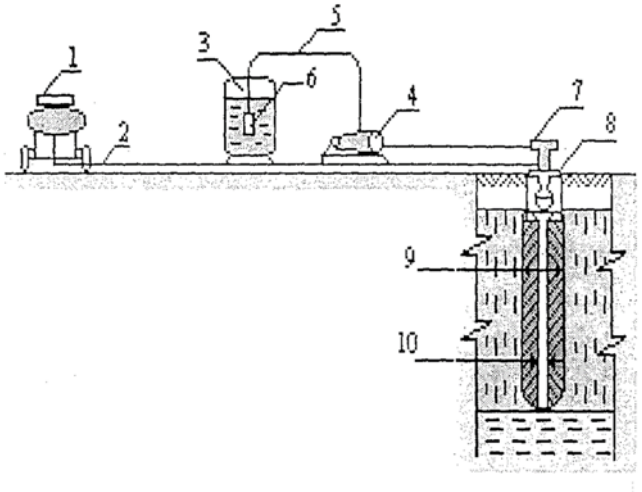


Рисунок 1.8 – Схема глибинної термообробки грунтів за способом І.М. Литвинова: 1 компресор; 2 трубопровід холодного повітря; 3 ємність для рідкого пального; 4 насос для подачі пального в свердловину; 5 трубопровід для пального; 6 фільтр; 7- форсунка; 8- затвор з камерою згоряння; 9-зона термічного зміцнення грунту; 10 свердловина

Ключовою умовою ефективного застосування розглянутого методу є здатність передавати тепло в ґрунтовий масив через конвективний теплообмін, при якому розпечені гази проникають у пори зміцнюючої породи. Цей метод підходить для зв'язкових ґрунтів з макропористістю понад 40%, низьким рівнем вологості (менше 15%) і високою газопроникністю (більше 200 мкм-м²-МПа). Відхилення від цих умов значно знижують ефективність або роблять застосування методу неможливим.

Нагрівання ґрунтового масиву за методом Литвинова вимагає контролю температури в свердловинах, щоб уникнути надмірного підвищення температури, що може призвести до збільшення тиску на стінки та зниження їх газопроникності. Процес виконання робіт на одній свердловині триває кілька діб. Існують численні вдосконалення, розроблені на рівні винаходів, що дозволяють розширити можливості методу, багато з яких зосереджені на підвищенні швидкості фільтрації газів.

Зміна властивостей ґрунтів по глибині свердловин і їх газопроникності створює неоднорідність термогрунтового стовпа, що ускладнює контроль за параметрами термогрунтового тіла. Для зменшення цих проблем застосовуються різноманітні технічні та технологічні заходи. Ускладнене управління процесом горіння пальників у загерметизованих свердловинах вимагає високої кваліфікації операторів.

Перехід до електричного нагрівання газів через електричний тепловий генератор не змінив основні принципи глибинного термічного зміцнення, запропоновані Литвиновим, але надав ряд переваг порівняно з використанням паливних форсунок, таких як покращена технологічність, пожежна та вибухова безпека, екологічність і можливість дистанційного контролю температури.

Збільшення щільності теплового потоку і температури теплоносія може бути досягнуто за допомогою потужних пальників. Однак основною перешкодою для підвищення ефективності методу Литвинова є технологічне обмеження верхньої температурної межі в свердловинах.

Удосконалення методів глибинного термічного зміцнення ґрунтів в основному передбачає ускладнення технологій, таких як додавання потужних систем вакуумування, ультразвукових технологій або поєднання випалу з камуфлетним вибухом. Однак приріст ефективності таких удосконалень має тенденцію до зниження. Реалізація нових ідей стикається з численними технічними труднощами, які ще не подолані.

Д.С. Слободник у 1959 році запропонував використання електротермічних установок для глибинного зміцнення ґрунтів до стадії плавлення. Він провів термообробку вологих ґрунтів під час проходки шахти на комбінаті «Тулауголь», застосовуючи П-подібні елементи, занурені в масив і працюючі на принципі омічного нагріву (рис1.9).

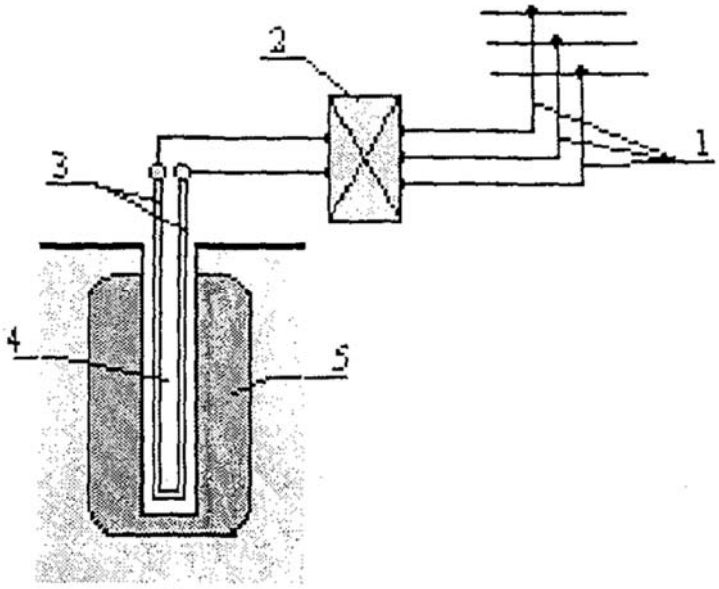


Рисунок 1.9 – Схема термообробки грунтів за методом Д.С. Слободника:
1 - зовнішня електрична мережа; 2 - трансформатор; 3 - електронагрівачі;
4 - свердловина; 5 - термогрунтовое тіло

Після 10 хвилин нагріву температура провідника-нагрівача досягала 2300 К, що призводило до активного випаровування води з пливуна, її часткового віджимання в масив і подальшого розкладу. Зневоднений ґрунт нагрівався, спікався і розплавлявся. При плавленні склоподібна маса ущільнювалася та

стікала вниз, утворюючи порожнину в верхній частині масиву. Проте в літературі немає інформації про подальше використання цього методу через проблеми із зануренням електродів і неможливістю їх повторного використання.

Ідея заповнення стовбура свердловини ґрунтовим розплавом набула подальшого розвитку. У 80-х роках були видані кілька авторських свідоцтв на винаходи, засновані на цій ідеї. Як джерело теплової енергії пропонувалося використовувати паливні пальники, а для додаткового нагріву рекомендовано вводити вугілля до складу ґрунтових сумішей. Однак ця ідея досі не отримала конкретних технічних рішень.

На основі узагальнення публікацій і результатів наших досліджень пропонується класифікація різних методів глибинної термообробки ґрунтів (рис.1.10).

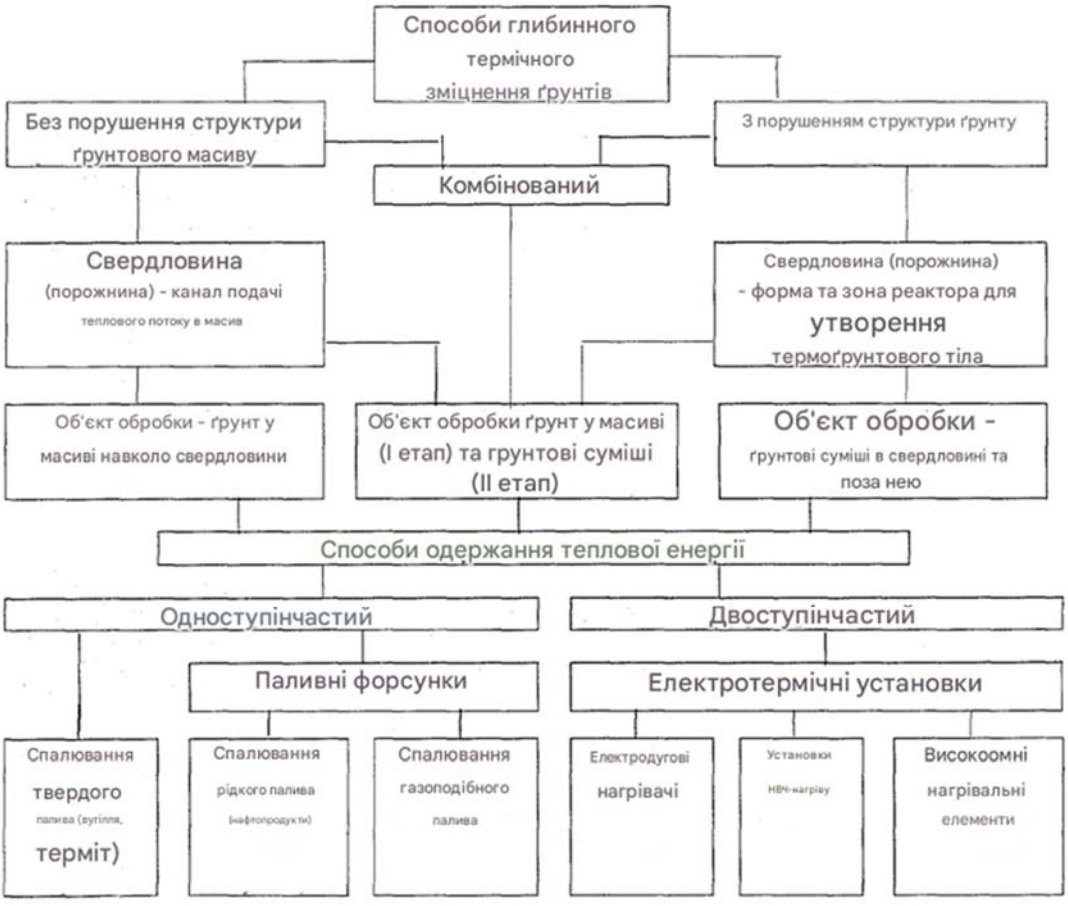


Рисунок 1.10 – Класифікація способів глибинного термічного зміцнення ґрунтів

На початкових етапах досліджень термічного зміцнення ґрунтових основ на будівельних майданчиках існувала думка, що глибинна термообробка охоплює зміцнення ґрунтів з ненарушеною структурою в масиві, а поверхнева — обробку ґрунтів з порушеною структурою. Сучасний розвиток цієї проблеми дозволяє внести певні уточнення. Перехід від термообробки масиву до обробки ґрунтів з порушеною структурою (сумішей) вимагає принципово іншого підходу до функції свердловини (шурфу, прорізу, шпуру тощо) у цих процесах.

У першому випадку свердловина служить каналом, через стінки якого нагріті гази проникають у масив. У другому випадку роль конвективного термічного оброблення ґрунту є другорядною. В свердловині нагрівається подрібнений ґрунт або заздалегідь підготовлена ґрунтова суміш, яка подається через гирло в зону термообробки. Таким чином, свердловина виступає як порожнина для формування термогрунтового тіла заданої форми, а також є частиною реактора для термічних перетворень ґрунтів. Можливо також застосування комбінованого підходу, при якому спочатку обробляється масив, а на другому етапі — ґрунт у свердловині.

У магістерській роботі під поверхневим термічним зміцненням ґрунтів розуміється метод обробки, який передбачає вплив на ґрунт температурного поля, що спричиняє незворотне підвищення міцності ґрунту та створення площинних конструкцій на поверхні. У випадку глибинного зміцнення формується термогрунтове тіло (паля, стовп, стіна, оболонка тощо) в глибині ґрунтового масиву. У обох випадках може здійснюватися обробка як самого ґрунту, так і спеціально підготовлених сумішей різного складу.

Іншим критерієм для запропонованої класифікації є метод отримання теплової енергії. У будівельному виробництві способи отримання теплової енергії можна розділити на одно- та двоступінчасті. В одноступінчатих методах енергія отримується шляхом спалювання палива, тоді як в двоступінчастих застосовується електрична енергія, що виробляється на стаціонарних або мобільних електростанціях.

Аналіз методів глибинного термічного зміцнення ґрунтів у будівництві показав, що дослідження в цій галузі набули значного розвитку та практичного застосування. Методи глибинного термічного впливу мають суттєву перевагу завдяки більшій ефективності використання теплової енергії, що отримується від генераторів.

1.3 Застосування плазмових технологій для термічного зміцнення ґрунтів

Ідея використання електротермічного генератора для термічного перетворення ґрунтів до стадії плавлення була висловлена ще в 1933 році Н.В. Буровим. Він припускав, що пропускаючи ґрунт через «вольтову дугу» і плавлячи його, можна створити міцне покриття для «шосейної дороги». Хоча ця ідея не включала конкретних технічних рішень, вона стала основою для розвитку електроплазменних технологій термічного зміцнення ґрунтів у будівництві.

Значні дослідження в галузі термічного зміцнення гранульованих зв'язкових ґрунтів за допомогою електродугових генераторів низькотемпературної плазми були проведені в ТГАСУ під керівництвом В.М. Єфименка. Основна концепція цих досліджень полягала в швидкісній термічній обробці гранул, виготовлених із глинистих ґрунтів, для створення штучного кам'яного матеріалу (кераміту), який використовувався б у дорожньому будівництві. Під час цих досліджень були розроблені основи технології виготовлення цього матеріалу, теплофізичні та фізико-хімічні моделі його поведінки під впливом плазми, визначено механізм фазових і структурних перетворень, а також виявлені області застосування цього штучного кам'яного матеріалу в дорожньому будівництві.

Автором було встановлено, що гранула кераміту складається з трьох основних зон з характерними мінеральними складом та мікроструктурою.

Периферійна зона (тонка оболонка) має аморфну речовину зі скловатною мікроструктурою. Далі слідує подложка з обоженого ґрунту з кришталево-тонкозернистою мікроструктурою. Основний обсяг гранули, який проходив термообробку при 1 170...1770 К, має поліагрегатну структуру.

Кераміт виготовляється в вертикальному напівстаціонарному реакторі з електродуговим плазмотроном лінійної схеми. Технологічний процес виготовлення включає такі етапи: видобуток і доставка сировини, розпушування матеріалу, дозування зв'язуючого ґрунту, переробка ґрунтової маси за допомогою вальців грубого помелу, гліномішалки та дірчастих вальців, формування ґрунтової маси, опудрювання серцевих гранул, їх сушка, випалювання, гартування і охолодження.

Штучний кам'яний матеріал є ефективним для створення додаткових морозозахисних і дренажних шарів дорожніх покриттів, як у чистому вигляді, так і у суміші з глинистими ґрунтами. Його модуль пружності в шарах складає 105 МПа, кут внутрішнього тертя — 32-34 градуси, зчеплення — 0,008 МПа, пористість — 30%, насипна щільність — 0,97 г/см³, водопоглинання — 23-25% за масою, коефіцієнт фільтрації — 3-6 м/день, морозостійкість — 25 циклів і більше. Кераміт, змішаний з мінеральним або органічним в'яжучим матеріалом, може бути використаний для верхніх шарів дорожніх конструкцій.

Різноманітні питання у сфері плазмових будівельних технологій були досліджені в Тольяттінському вищому військовому будівельному командному училищі (ТВВСКУ) під керівництвом Г.А. Задворнева, у співпраці з вченими ІТФ СО РАН. У результаті цих досліджень була запропонована плазмова технологія для відтавання ґрунтів. Також був отриманий високоміцний матеріал — металобетон для несучих будівельних конструкцій. Технологія виготовлення цього матеріалу включає підготовку форми, яка є частиною плазмохімічного реактора, укладання та підігрів заповнювачів (щебеню, керамзиту та ін.), плавлення металу (заліза, алюмінію, свинцю), який виступає в ролі в'яжучого, заповнення порового простору розплавом, нарощування виробу і його охолодження.

Г.А. Задворнев та його учень Б.М. Зарубін першими здійснили глибинне термічне зміцнення ґрунтових основ на будівельному майданчику за допомогою генераторів низькотемпературної плазми.

Г.А. Задворний запропонував замінити традиційні паливні пальники на електродугові плазмотрони лінійного типу, встановлені на водоохолоджуваному щиті в гирлі свердловини (див. рис. 1.11а). Щит герметизує свердловину, де підтримується надлишковий тиск до 0,2 МПа. Технологічний процес складається з двох етапів. На першому етапі не допускається плавлення стінок свердловини.

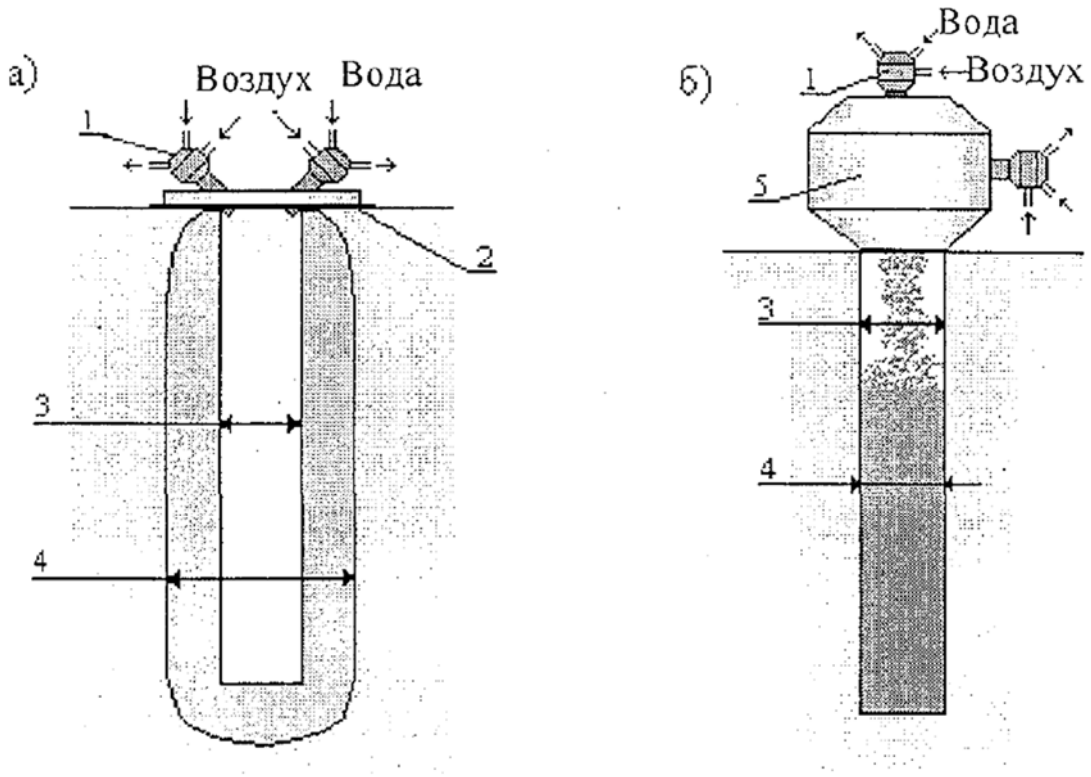


Рисунок 1.11 – Схеми термічногос зміцнення ґрунтів за методом Г.А. Задворнева (а) і Б.М. Зарубіна (б): 1 струменеві плазмотрони; 2 водоохолоджуваний щит; 3 свердловина; 4-термогрунтовое тіло; 5 -бункер - реактор

Газ, що утворює плазму, проходить через поровий простір ґрунту, що оточує свердловину, нагріваючи та зміцнюючи його. На другому етапі температура обробки підвищується, і свердловина заповнюється ґрунтовим

розплавом, що утворюється при його стіканні з стінок. При охолодженні цей розплав перетворюється на склоподібний матеріал, міцність якого залежить від хімічного складу ґрунту, що плавиться, і може перевищувати міцність цементобетону (міцність змінюється від 80 до 130 МПа).

Автор припускав, що за умови збільшення потужності або кількості плазмотронів та тривалості процесу, в результаті плазмового зміцнення ґрунтів можна отримати стовпчасті фундаменти висотою до 10–15 м і діаметром до 2–3 м.

Ці дослідження продовжив Б.М. Зарубін. Він запропонував метод створення стовпчастих фундаментів шляхом заповнення порожнин, витрамбованих в масиві, ґрунтовим розплавом. Плавлення ґрунтів відбувалося в бункері-реакторі, який встановлювався на гирлі свердловини (див. рис. 1.11 б). Після дослідження кількох варіантів, автор рекомендував бункер-реактор з певною конфігурацією та об'ємом, а також оптимальне розташування та кількість плазмотронів лінійного типу для забезпечення максимальної ефективності процесу.

Дослідження в галузі плазмових технологій термічного зміцнення ґрунтових основ, розпочаті Г.А. Задворнева, були продовжені в СибАДІ. У 1989 році був отриманий комплект плазмового обладнання ППС-300, виготовлений під керівництвом Г.А. Задворнева в ТВВСКУ, разом із відповідним методичним забезпеченням. У комплект входила плазмоутворююча станція з плазмотронами ПС-153 і ПС-206, які є однокамерними лінійними генераторами постійного струму. У наших дослідженнях також використовувалися плазмотрони ЕДП-187/100 і ПУН-1. На рис. 1.12 зображено зовнішній вигляд плазмотронів, а технічні характеристики наведені в таблиці 1.2. Схема плазмоутворюючої станції представлена на рис. 1.13.

Роботу плазмотронів забезпечували джерела постійного струму, спочатку некеровані (ЕМ-1 з баластними опорами), які пізніше були замінені на більш ефективні керовані джерела БЕЗ-80 та АПР-404 (див. таблицю 1.3). Для проведення експериментальних досліджень використовували різні стенди та

спеціальні пристосування. На рис. 1.14 - 1.16 показано схеми трьох стендів для термічної обробки ґрунтів.

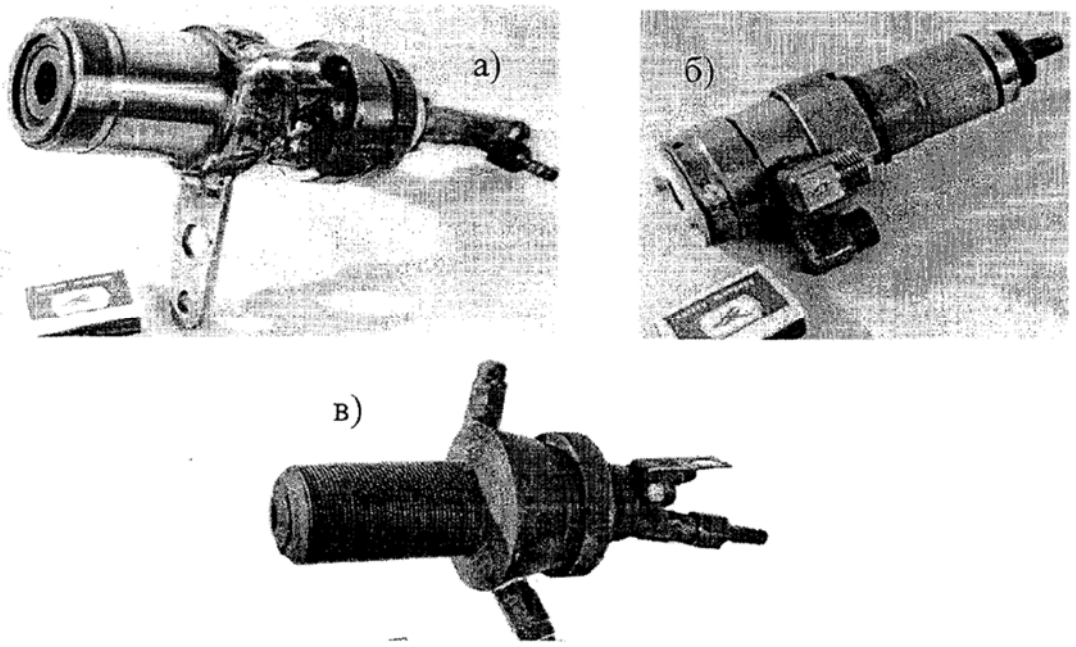


Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд плазмотрона:
а - ЕДП-187/100; б - ПУН-1; в - ПС-153

Свердловини для глибинної термообробки створювалися шляхом заповнення кожуха різними ґрунтами з послідовним ущільненням і нарощуванням висоти стенду (глибини свердловини) до 2 м. Верхня частина кожуха закривалася водоохолоджуваним щитом, на якому встановлювалися плазмотрони, а також дозатор для подачі ґрунтових сумішей в свердловину. Контроль температурних режимів здійснювався за допомогою набору термопар.

Дослідження, що тривали понад два роки, дозволили оцінити ефективність застосування струменевих плазмотронів лінійного типу для термічного зміцнення ґрунтових основ. Було проведено поверхневе термічне оброблення ґрунтів, термообробку ґрунтів у свердловинах, а також плавлення ґрунтів у спеціальних реакторах. Короткий огляд основних результатів цих досліджень наведено нижче.

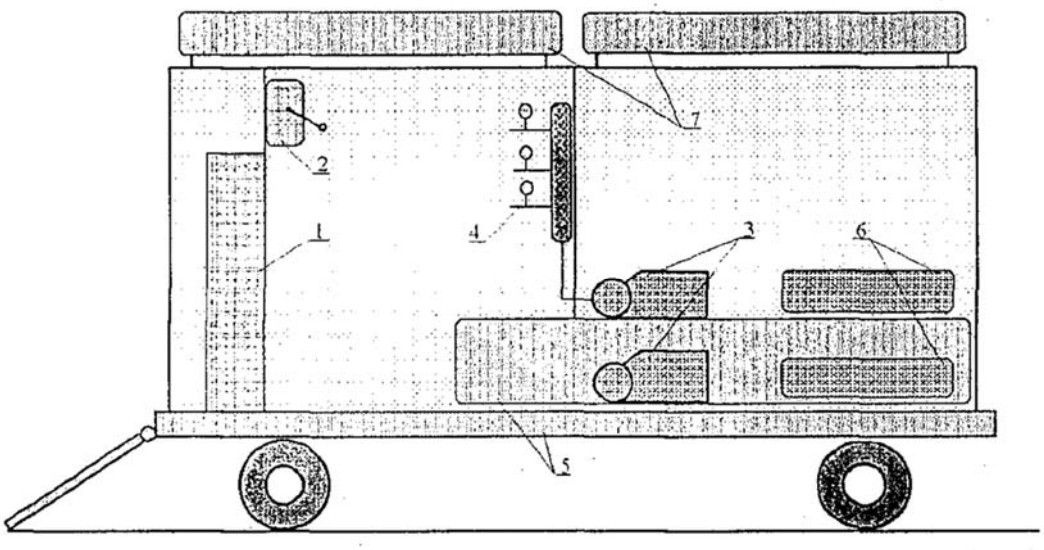


Рисунок 1.13 – Схема плазмоутворюючого станції ППС -300: 1 - блоки енергетичного живлення; 2 - силовий шафа; 3 - компресори; 4 - повітряна запірно-регулююча арматура; 5 - ємності з водою; 6 - гідронасоси; 7 - баластні опору

Табиця 1.2 – Основні характеристики генераторів низькотемпературної плазми

Найменування показників	Для плазмотронов			
	ПС-153	ПС-206	ЕДП 187/100	ПУН-1
Струм дугового розряду	Постійний			
Величина робочого струму, А	80 – 130	170 – 220	300-400	100 – 200
Напруга холостого ходу,	300 – 500	300 – 500	350-550	300 – 400
Робоча напруга,	150-250	150 – 300	250 – 300	150-250
Енергетична потужність, кВт	10 – 40	25 – 60	75 – 100	15 – 50
Спосіб теплопередачі об'єкту	Непрямий			
Взаємодія дугового розряду з плазмоутворюючим газом	Поздовжнє			
Вид плазмоутворюючого газу	Повітря, азот, пропан-бутан, вуглекислий газ			
Дуговий розряд	Одиночний			
Довжина дуги	Самоуста-навливаю-щаяся	Фіксована, менше самоустанавливающейся -		Самоуста-навливаю-щаяся
Стабілізація розряду	Газодинамічна (вихрова)			
Витрата плазмоутворюючого газу, г/с	4-10	6 – 15	3,5 – 10	10 – 20
Умови роботи катода	Гарячий, термоемісійний			
Конструкція електродів: катод анод	Точковий Трубчастий			
Матеріал електродів: катод анод	Гафній + мідь Мідь			
Система охолодження електродів	Примусова, водяна			
Довжина плазмотрону, м	0,24	0,26	0,27	0,15
Маса плазмотрону, кг	4,5	4,8	5,3	2,0

Таблиця 1.3 – Характеристика джерел живлення дугових плазмотронів

Найменування показників	Марка джерел		
	3 х ЕМ-1	БЕП-80	АПР-404
Керування параметрами	Ні	Є	Є
Енергопостачання джерела	Змінний, трифазний, 380 В, 50 Гц		
Номінальна потужність, кВт	3 х 100	105	96
Вид струму на виході	Постійний		
Напруга холостого ходу,	500	330	350
Робоча напруга,	250	140-260	150-250
Робочий струм, А	120	100 – 315	100-300
К.п.д., %	50	90	94
Маса, кг	120	780	934
Система охолодження	Повітряна	Примусова повітряна	

Поверхнева термообробка ґрунтів здійснювалася на різних типах ґрунтів, зокрема на глиняних та піщаних, при різних рівнях вологості. Параметри роботи плазмотронів змінювалися: сила струму, напруга, тиск газу, що утворює плазму (повітря). Проводився статичний прогрів ґрунтових поверхонь з варіаціями відстані та кута атаки плазмового струменя. Поверхня нагрівалася за допомогою рухомого плазмотрона.

При впливі плазмового струменя з високим коефіцієнтом зосередження та малим діаметром (до 20 мм) на ґрунтовій поверхні утворювався тонкий шар склоподібного матеріалу (1 ... 3 мм), а під ним знаходився видозмінений ґрунт товщиною 3 ... 4 мм. Інтенсивність плавлення ґрунту зростала пропорційно збільшенню потужності плазмотрона (за умови оптимального витрату газу, що утворює плазму), зменшенню вологості ґрунту та зменшенню відстані до оброблюваної поверхні. Найкращі результати досягалися при термообробці пухких шарів зв'язного ґрунту з плазмотроном, що знаходився в закритій камері (див. рис. 1.14), при оптимальному куті атаки плазмового струменя (40 ... 50 °) та швидкості руху камери по поверхні.

Попри виконання всіх рекомендованих умов термообробки, інтенсивність плавлення складає 10 ... 15 см³/хв. Висока швидкість витоку плазмового струменя (> 200 м/с) спричиняє роздування пухкого ґрунту. Обмежена ширина оброблюваної смуги за один прохід (20 ... 25 мм) та необхідність перекриття на

20 ... 30% не дозволяють досягти бажаних показників продуктивності в технологічному процесі поверхневої термообробки ґрунтів струменями плазмового потоку. Крім того, спостерігається недостатня надійність використовуваних плазмотронів при експлуатації в умовах відкритих будівельних майданчиків.

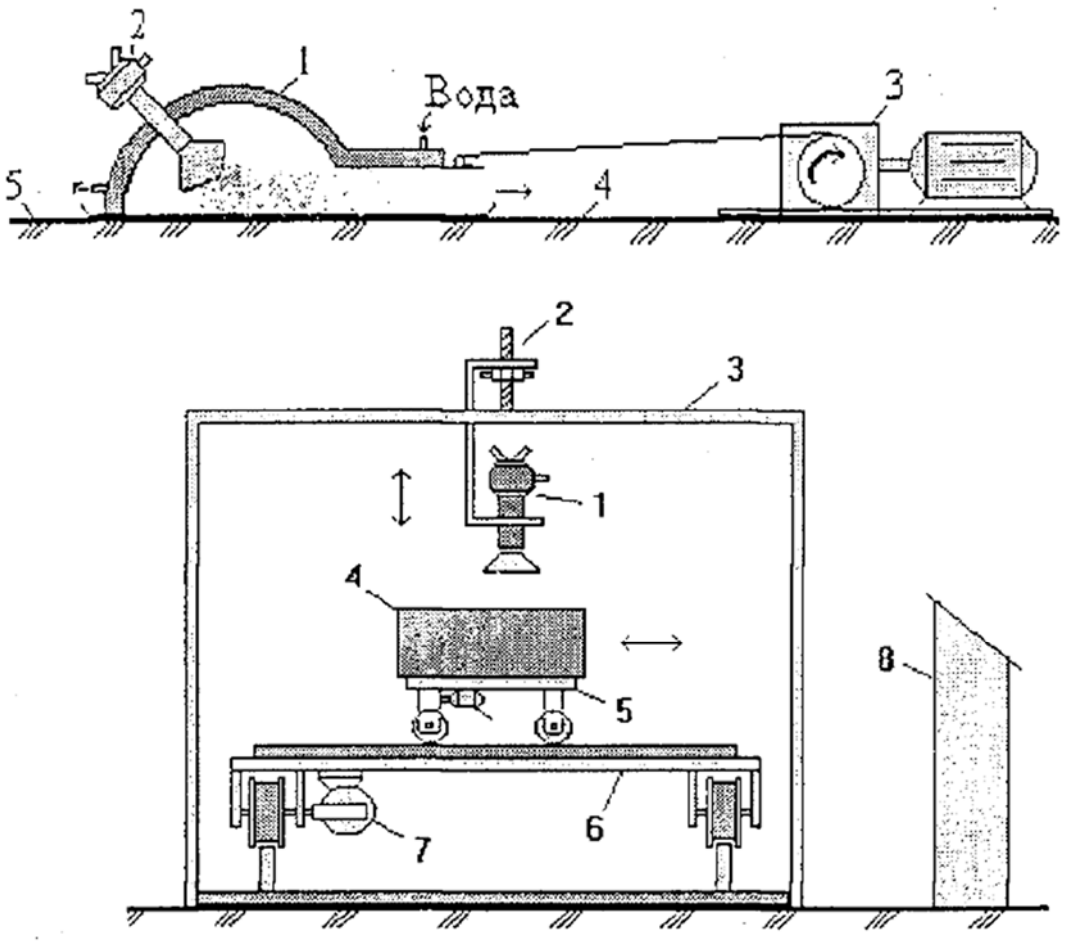


Рисунок 1.14 – Схема стенду для термообробки грунтів: 1 - водоохлаждаемая камера; 2 - плазмотрон; 3 - лебідка з електродвигуном; 4 - грунт земляного полотна; 5 теплообробний грунт

Глибинна термообробка ґрунтів проводилася за допомогою плазмотронів ПС-153 на спеціальному стенді (див. рис. 1.16) та в свердловинах, пробурених на експериментальній ділянці. У процесі досліджень змінювалися типи ґрунтів, їх щільність і вологість. Нагрівання виконувалося в свердловинах діаметром до 150

мм і глибиною до 2 м. Варіювали енергетичну потужність плазмотронів, їх кількість та розташування на водоохолоджуваному щиті, а також витрату газу, що утворює плазму. На початковому етапі свердловина служила як канал для передачі тепла в навколишній ґрунт (схема Литвинова). Далі проводилась термообробка різних типів ґрунтів з різною вологістю та ступенем подрібнення, що подавалися через дозатор.

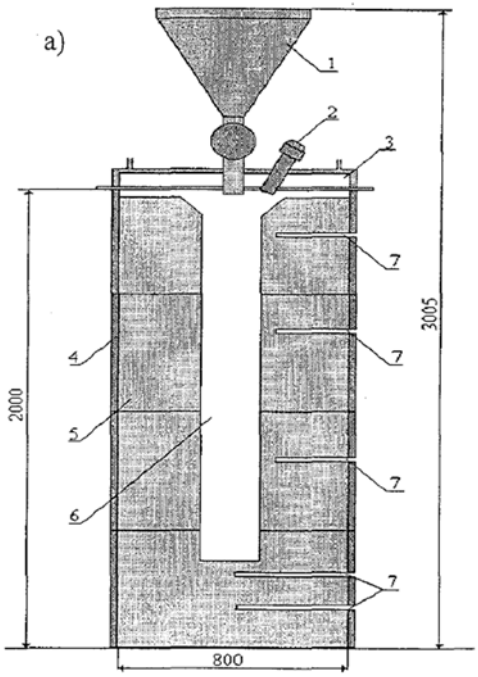


Рисунок 1.16 – Схема для глибинної термообробки грунтів: 1 - дозатор грунту; 2 - плазмотрони (3 шт.); 3 - водоохолоджуваний щит; 4 - металевий розбірний кожух; 5 - грунт; 6 - свердловина; 7 - місця закладки теомопао і датчиків

Після 3 ... 5 хвилин роботи плазмотрона спостерігалося значне оплавлення верхньої частини свердловини. Незважаючи на тривале випалювання (до 90 хв.), при діаметрі свердловини більше 120 мм товщина шару розплаву на бічних стінках становила лише 5 ... 7 мм, а обсяг зміненої маси ґрунту в радіальному напрямку не перевищував 5500 см³. В нижній частині свердловини прогрів був незначним (тільки до стадії осушення).

Зменшення діаметра та глибини свердловини підвищує ефективність термообробки ґрунту. Інтенсивне утворення розплаву (до 30 см³/хв) спостерігалося протягом перших 20 хвилин, після чого процес уповільнювався. Збільшення інтенсивності плавлення залежить від зростання щільності теплового потоку, оскільки площа бічної поверхні свердловини значно зменшується. При тривалому випалюванні обсяг зміненого ґрунту в радіальному напрямку від свердловини в 10 разів більший за обсяг розплаву. Повільне стікання силікатного розплаву з бічних стінок верхньої частини свердловини призводить до розширення її первісного діаметра до меж 100 ... 120 мм, після чого ріст припиняється.

Експерименти з трьома працюючими плазмотронами та подачею ґрунту через дозатор в свердловину показали значну неоднорідність температурного поля при глибині свердловини більше 1,5 м (див. рис. 1.17).

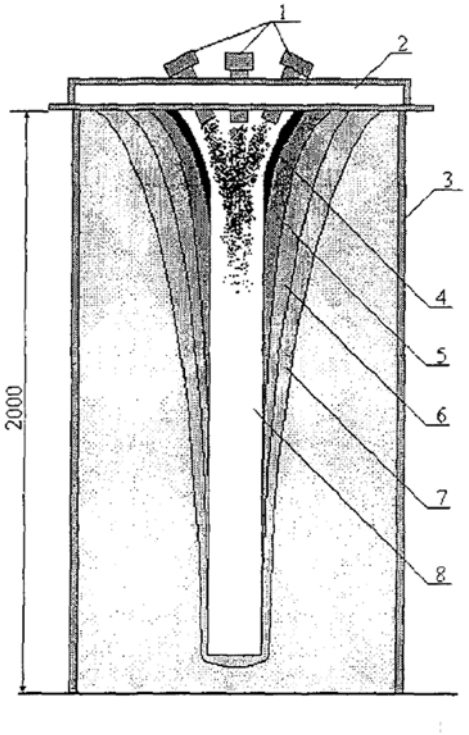


Рисунок 1.17 – Зони розподілу температури грунту по перетину свердловини: 1 плазмотрони; 2 водоохолоджуваний щит; 3 металевий розбірний кожух; 4 - Т> 1500 К; 5 - 1200 <Г <1500 К; 6 - 900 <Т <1200 к; 7 - Т <900 К; 8 - свердловина

У верхній частині свердловини (до 50 см) процес нагрівання та плавлення ґрунту відбувається швидко. Це починається через 2 ... 3 хвилини після запуску плазмотронів. Силікатний розплав, стікаючи по стінках свердловини, охолоджується, і коли його температура знижується до рівня менше 1200 ... 1400 К, він не просувається нижче 60 ... 70 см.

При подачі пухкого ґрунту в свердловину він швидко проходить через верхню високо температурну зону, не встигаючи достатньо прогрітися. У нижній частині свердловини температура не досягає рівня, необхідного для спікання ґрунтової суміші. Тому додаткове подавання ґрунту дає відчутний ефект лише для коротших свердловин.

Покращення результатів спостерігається при герметизації свердловини та підвищенні надлишкового тиску розпечених газів до 0,1 ... 0,15 МПа. При глибині свердловини до 1 м процес заповнення силікатним розплавом триває 80 ... 90 хвилин, після чого утворюється термогрунтове тіло у вигляді конуса висотою до 80 см (див. рис. 1.18).

Зі збільшенням вологості ґрунту час формування палі подовжується, а товщина шарів ґрунту з різними рівнями термічної модифікації, що оточують палю, зменшується.

Після завершення випалу та охолодження розплаву проводиться вимірювання вологості ґрунту в кількох точках радіально від свердловини (див. рис. 1.9). На відстані до 90 мм від стінки свердловини вологість ґрунту була нульовою. Віддаляючись від стінки, вологість поступово збільшувалася до вихідного рівня, і на відстані 250 ... 350 мм спостерігалося різке підвищення вологості до межі плинності.

Цей ефект виникає через переміщення рідкої та пароподібної вологи з гарячої зони в холоднішу частину. Надлишковий тиск у свердловині стимулює цей процес. Конденсація вологи в периферійній зоні ґрунтового масиву відбувається через зниження тиску і температури до критичних значень. Після вирівнювання температурного градієнта в ґрунті, зворотний рух вологи відбувається дуже повільно, протягом кількох діб. Ґрунт на відстані 60 ... 80 мм

від стінки свердловини залишався на рівні гігроскопічної вологості протягом усіх спостережень (7 діб).



Рисунок 1.19 – Зміна вологості грунту в масиві

Зміна вологості ґрунту в дозаторі в межах від 3 до 10% майже не впливає на результати термообробки. Це зумовлено тим, що гази в дозаторі досягають температури 470 ... 500 К вже після 10 ... 15 хвилин роботи плазмотронів, що забезпечує висушування ґрунту до його подачі в свердловину.

Замінюючи суглинок на глину, ефективність термообробки підвищується. Висота термогрунтового тіла збільшується, а час, необхідний для його формування, зменшується на 15 ... 20%.

Технологічний процес стає більш ефективним при використанні двоступеневого режиму: на першому етапі свердловина прогрівається плазмотроном низької потужності, на другому — ґрунти плавляться за повної потужності плазмотронів. Однак цей процес все одно займає кілька годин. Оптимізація геометричних параметрів свердловини, її герметизація, застосування легкоплавких ґрунтів та збільшення потужності плазмотронів допомагають прискорити термообробку, але питомі енергетичні витрати не опускаються нижче 6 (Вт·год) / см.

Для плавлення ґрунтів у спеціальному реакторі були проведені дослідження, згідно з рекомендаціями. Термогрунтові палі формувалися шляхом заповнення витрамбованих порожнин ґрунтовим розплавом, отриманим у спеціальному реакторі, встановленому на гирлі порожнини.

Бункер-реактор заповнювався ґрунтом, і всередині сформованої маси створювалися канали для подачі розпечених газів. В нижній частині розташовувався отвір, що закривався заслінкою. Для нагрівання ґрунту використовували три плазмотрони типу ПС-153. Після 3 ... 5 хвилин нагріву з'являвся ґрунтовий розплав, який витікав через нижній отвір і одразу твердів, утворюючи «язики».

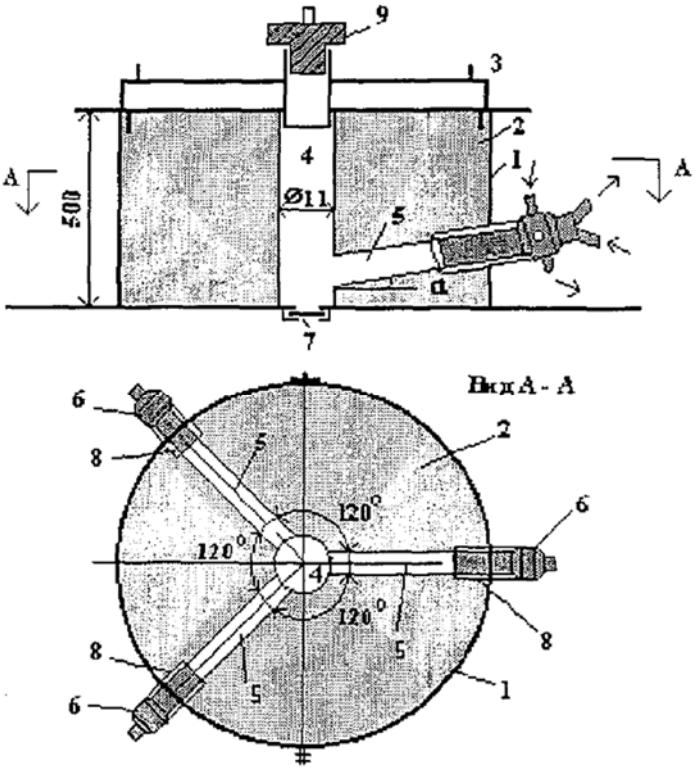


Рисунок 1.20 – Схема плазмового реактора для плавлення грунтів:
1 металевий кожух; 2-вихідний грунт; 3 водоохолоджуваний щит; 4 порожнину; 5 бічні канали; 6 - плазмотрони; 7- засувка тічки; 8- металеві стакани

Прогрів ґрунту із закритою заслінкою не дав бажаного результату. Підключення четвертого плазмотрона в верхній частині реактора замість пробки та збільшення діаметра вихідного отвору дещо покращили процес плавлення, але проблема перекриття тічки охолоджуючим силікатним розплавом залишалася.

Зменшення розмірів реактора та використання легкоплавкої глини сприяло поліпшенню результатів. Температура розплаву підвищувалася, його в'язкість

знижувалася, а випадки перекриття тічки охолодженим розплавом стали рідшими.

Розплав, що виходив з реактора, подавався в свердловину діаметром 110 мм і глибиною 1,5 м. Однак, навіть після вдосконалення реактора, не завжди вдавалося отримати монолітне термогрунтове тіло довжиною понад 1 м. Головною причиною цього було швидке охолодження отриманого розплаву. Глибокі свердловини заповнювалися окремими шматками охолодженого склоподібного матеріалу. Часто силікатний розплав стікав по стінках свердловини на глибину 30 ... 50 см, остигаючи там і перекриваючи доступ до нижньої частини свердловини. Тільки після тривалого прогріву свердловини і реактора (більше 3 ... 4 годин) вдавалося досягти бажаних результатів.

Отже, аналіз публікацій і проведені дослідження показали, що заміна паливних пальників на струменеві генератори низькотемпературної плазми не призводить до суттєвих покращень при використанні традиційних технологічних методів поверхневої термообробки ґрунтів.

Відомий метод глибинного термічного зміцнення ґрунтів з верхнім розташуванням плазмотронів лінійної схеми має істотний недолік: не реалізується головна перевага плазмового нагріву — висока щільність теплового потоку, що веде до швидкого оплавлення стінок свердловини і припинення міграції розпечених газів в ґрунтовий масив. Крім того, ця технологія є не зовсім ефективною і не усуває обмежень, властивих традиційним методам глибинної термообробки ґрунтів.

З цього можна зробити висновок, що розв'язання складної, але перспективної задачі розробки ефективної плазмової технології для поверхневого та глибинного термічного зміцнення ґрунтових основ на будівельних майданчиках має велике теоретичне та практичне значення.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ НА ҐРУНТИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕНТРОВАНИХ ПОТОКІВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ

2.1 Обґрунтування вибору генератора низькотемпературної плазми

Розробка інноваційних технологій зазвичай ґрунтується на створенні або виборі ефективних інструментів, які дозволяють цілеспрямовано впливати на об'єкт праці. На сьогодні генератори низькотемпературної плазми є одними з найбільш потужних, універсальних та ефективних засобів для термічного оброблення будівельних матеріалів.

Генератори низькотемпературної плазми (плазмотрони) представляють собою електричні пристрої, які нагрівають гази до температури, що викликає їх іонізацію, перетворюючи гази на плазму. Розрізняють два типи плазми: високотемпературну та низькотемпературну. Високотемпературна плазма повністю іонізована і має температуру не менше 100 000 К, тоді як низькотемпературна плазма, що утворюється при електричних розрядах, характеризується частковою іонізацією газів і більш низькими температурами.

Існують численні конструкції плазмотронів, чия енергетична потужність варіюється від кількох кіловат до десятків мегават. Вони здатні створювати низькотемпературну плазму з середньою температурою до 4000-6000 К для багатоатомних газів та до 10 000 К для одноатомних газів. ККД таких генераторів залежить від типу плазмоутворюючого газу, параметрів роботи та конструкцій і варіюється в межах від 50% до 90%. Ресурс роботи плазмотронів може досягати 1000 годин.

Правильний вибір типу та конструкції генератора плазми має велике значення не лише для ефективності процесу, але й для досягнення поставленої мети. Зважаючи на специфіку роботи в умовах будівельного майданчика, до

вимог до генераторів низькотемпературної плазми можна віднести такі: температура плазми повинна бути не менше 3000 К, а щільність теплового потоку — не менше 2-10 Вт/м²; параметри плазми мають забезпечувати оптимальні умови для термічної обробки і бути керованими; потужність генераторів повинна бути в межах 100–500 кВт; генерація плазми повинна бути безперервною протягом кількох годин (7–24 год.); конструкція плазмотронів повинна бути надійною, з високим ресурсом роботи електродів або з дешевими та легко змінюваними електродами; бажано використовувати плазмотрони, що працюють на повітрі як плазмоутворюючому газі; доцільно застосовувати генератори з широким плазмовим факелом (10–40 см); ККД перетворення енергії в теплову енергію плазми має бути високим (80–95%); віддається перевага генераторам, які працюють при відносно низькому робочому напрузі та струмовій частоті; кількість кабелів, проводів і шлангів, що підключаються до плазмотрона, має бути мінімальним.

Під час вивчення літератури щодо плазмових генераторів ми не знайшли універсальної класифікації плазмотронів. Генератори розрізняються за різними характеристиками та конструктивними особливостями, причому класифікація може мати різний рівень деталізації. Одним із найбільш загальних підходів є поділ плазмотронів залежно від способів нагріву газів до стану плазми. За цим критерієм генератори можна поділити на високочастотні, паливно-плазмові та електродугові.

Високочастотні плазмотрони. Плазма, будучи провідною середовищем, реагує на змінне магнітне поле. Цей принцип використовують плазмотрони, які застосовують електромагнітну енергію високочастотних струмів для іонізації та дисоціації газів. Збільшення частоти поля спричиняє зростання втрат енергії в плазмі, що дозволяє ефективно передавати енергію вже при температурах газу в межах 3500–4000 К.

Високочастотні плазмотрони можуть бути як електродними (коронні, факельні), так і безелектродними (ВЧІ, ВЧЕ, СВЧ). Основні переваги безелектродних плазмотронів включають великий ресурс роботи (тисячі годин),

відсутність забруднень плазми через ерозію електродів, а також можливість роботи з агресивними газами, що утворюють плазму. Процеси в ВЧ та СВЧ плазмотронах мають подібну фізичну основу, але конструктивні відмінності. Високочастотні плазмотрони працюють з генераторами на частотах від кількох сотень кілогерц до десятків мегагерц, тоді як надвисокочастотні – на ще вищих частотах, до сотень гігагерц. На сьогодні отримали популярність такі види плазмотронів, як високочастотні індукційні (ВЧІ), ємнісні (ВЧЕ), факельні (ВЧФ) та надвисокочастотні (НВЧ).

Високочастотні плазмотрони знайшли своє застосування в малотоннажних та «чистих» плазмохімічних процесах і технологіях. Проте, незважаючи на свої переваги, використання цих генераторів у будівельних технологіях є обмеженим. Високочастотна енергія відноситься до одного з найдорожчих типів енергії. На сьогодні промисловість виготовляє порівняно надійні ВЧ і НВЧ-генератори потужністю до 50–100 кВт. Джерела живлення більшої потужності мають невеликий ресурс, є менш надійними, потребують великих витрат на охолодження чистою водою, а їхня вартість є дуже високою. Загальний ККД установок, що використовують високочастотний нагрів, не перевищує 40–60%. Трансмісія високочастотної енергії від генератора до робочого органу ускладнена і супроводжується значними втратами. ВЧ і СВЧ плазмотрони більше підходять для використання в стаціонарних умовах або закритих приміщеннях.

Паливно-плазмові генератори займають проміжне місце між традиційними пальниками та плазмотронами. В літературі такі пристрої зазвичай називають електротоплівними пальниками. У найпростішому варіанті, електротоплівний пальник є пристроєм, схожим на швидкісний пальник, з додатковими конструктивними елементами для створення електричного розряду. Основними елементами пальника є мідний водоохолоджуваний електрод, розташований по центру, та заземлений анод, що служить вихідним соплом.

Однак, вуглеводневе паливо не забезпечує достатню електричну провідність паливо-повітряної суміші. Для підвищення провідності палаючого

факела можна використовувати кілька методів: термічну іонізацію з додаванням спеціальних присадок в факел разом з окислювачем, введення твердих дрібнодисперсних частинок або накладення високочастотного електричного поля на міжелектродний проміжок.

Одним із простих способів підвищення електропровідності є додавання присадок, таких як КС1 або К2СО3, у кількості 0,1–0,01% від витрат продуктів згоряння. У паливно-плазмових пальниках формуються дифузні несамостійні розряди при високій напрузі (1,0–5,0 кВ) і низькій силі струму (4–30 А).

Вольтамперна характеристика таких пальників зазвичай має спадний вигляд. Критичний рівень питомої енергетичної потужності становить 400–500 Вт/см. Коефіцієнт надлишку повітря для традиційних пальників коливається від 2 до 0,6. Додавання електричного розряду до паливного факела дозволяє працювати з більш багатими сумішами, з коефіцієнтом надлишку 0,3–0,4. У результаті температура полум'я збільшується на 25%, а тепловіддача від факела зростає в 2–3 рази.

Паливно-електричні пальники можуть бути ефективними для деяких будівельних технологій, особливо у стаціонарних умовах, таких як виготовлення мінеральних в'яжучих матеріалів, термодекорування поверхонь виробів, а також для різання і руйнування гірських порід. Проте, використання таких пристроїв для термообробки ґрунтів на будівельних майданчиках є недоцільним. Для їх роботи необхідно чотири основні компоненти: паливо, окислювач, електрична енергія та іонізуючі присадки. Температура газів і щільність теплового потоку в пальниках в 2–3 рази нижчі, ніж у плазмотронів. Крім того, використання високовольтного джерела енергії безпосередньо на будівельному майданчику ускладнює технологічний процес. Це також підвищує пожежну небезпеку. Враховуючи економічні та санітарні вимоги, необхідно впроваджувати системи для збору та повернення в цикл присадок, які додаються для стимуляції і організації дифузійного розряду.

Електродугові плазмотрони. Один із найбільш ефективних способів нагрівання газу до високих температур – це пропускання його через дугу

постійного або змінного струму. Такий метод використовують у дугових плазмотронах, які часто називають електричними нагрівачами газу. Ці пристрої можуть працювати як у стаціонарному, так і в імпульсному режимах, але в даній роботі розглядаються лише генератори, що функціонують в стаціонарному режимі.

Простий варіант нагрівача газу – це дуговий розряд, що протікає між двома торцевими електродами і обдувається газом. В результаті утворюється потік частково іонізованої плазми. Якщо такий нагрівач помістити в камеру з соплом, можна отримати базову модель електродугового плазмотрона. Однак ефективність цієї конструкції обмежена через те, що частина газу не контактує з розрядом, а також через виникнення нерухомих приелектродних областей, які значно знижують ресурс електродів. Для отримання газових потоків з високою температурою необхідно оптимізувати подачу газу в плазмотрон, щоб більша частина газу взаємодіяла з дуговим розрядом. Теплові потоки залежать від різних параметрів, таких як швидкість і щільність газу, що обдуває розряд, довжина дугового стовпа та інші.

Загальна потужність, що виділяється в дуговому розряді, дорівнює добутку напруги на силу струму. Напруга в дуговому розряді залежить від падіння потенціалу на аноді та катоді, а також від довжини дугового стовпа. Обдув розряду газом збільшує кількість електричної потужності, що виділяється на одиницю об'єму розряду. Однак підвищення інтенсивності обдування не завжди веде до збільшення температури газу на виході з плазмотрона. Крім того, інтенсивне охолодження може порушити стабільність роботи генератора. Для оптимізації роботи енергообміну між дуговим розрядом і газом необхідно забезпечити максимальну сумарну ентальпію газу на виході. Це є основним принципом удосконалення конструкції плазмотронів і технологічних процесів їх експлуатації.

Розрахунки показують, що в зонах, які не контактують безпосередньо з дуговим розрядом, тепловий потік до бічних стінок плазмотрона становить 5-10 Вт/м². Ці частини потребують охолодження за допомогою проточної води. У

місцях опорних точок дугового розряду (катодних і анодних) тепловий потік до стінок електродів може досягати значень 10-10 Вт/м². Очевидно, що такі високі теплові навантаження не можуть бути ефективно зняті лише зовнішнім охолодженням електродів, навіть якщо воно буде інтенсивним. Тому другий принцип функціонування плазмотронів вимагає забезпечення тривалої роботи електродів без їх руйнування, оскільки надійність електродів є вирішальним фактором для стабільної роботи генератора в цілому. Для досягнення цього в сучасних дугових генераторах застосовують два підходи: використання матеріалів з високою температурою плавлення (таких як вольфрам, цирконій, гафній, графіт) і рівномірний розподіл опорних точок на поверхні електродів.

Отже, застосування дугового розряду для створення джерел гарячих газів, тобто плазмотронів, пов'язано, насамперед, з вирішенням таких задач, як: охолодження електродів; формування геометрії розрядних камер і пристроїв для ефективної подачі газів через розряд; розробка систем, що дозволяють переміщувати розряд і його пріелектродні області; забезпечення стабільного горіння дугового розряду; ефективне перетворення електричної енергії в теплоту високотемпературного потоку. Рішення цих завдань призвело до розробки численних типів плазмотронів з різними схемами, які наразі використовуються в різних виробничих галузях.

На основі аналізу опублікованих даних і результатів власних досліджень була розроблена класифікація електродугових генераторів для стаціонарної низькотемпературної плазми.

Ця класифікація представляє собою метод пошуку найбільш ефективної конструкції електродугового плазмотрона. В її основі лежать результати різних досліджень. У класифікації узагальнені найважливіші характеристики, ступінь деталізації яких збільшується з переходом до нижчих рівнів. Її можна доповнити більш детальними підкатегоріями, що стосуються конкретних видів плазмотронів, таких як плазмотрони з лінійною схемою або такі, що працюють на змінному струмі, а також багатодугові системи.

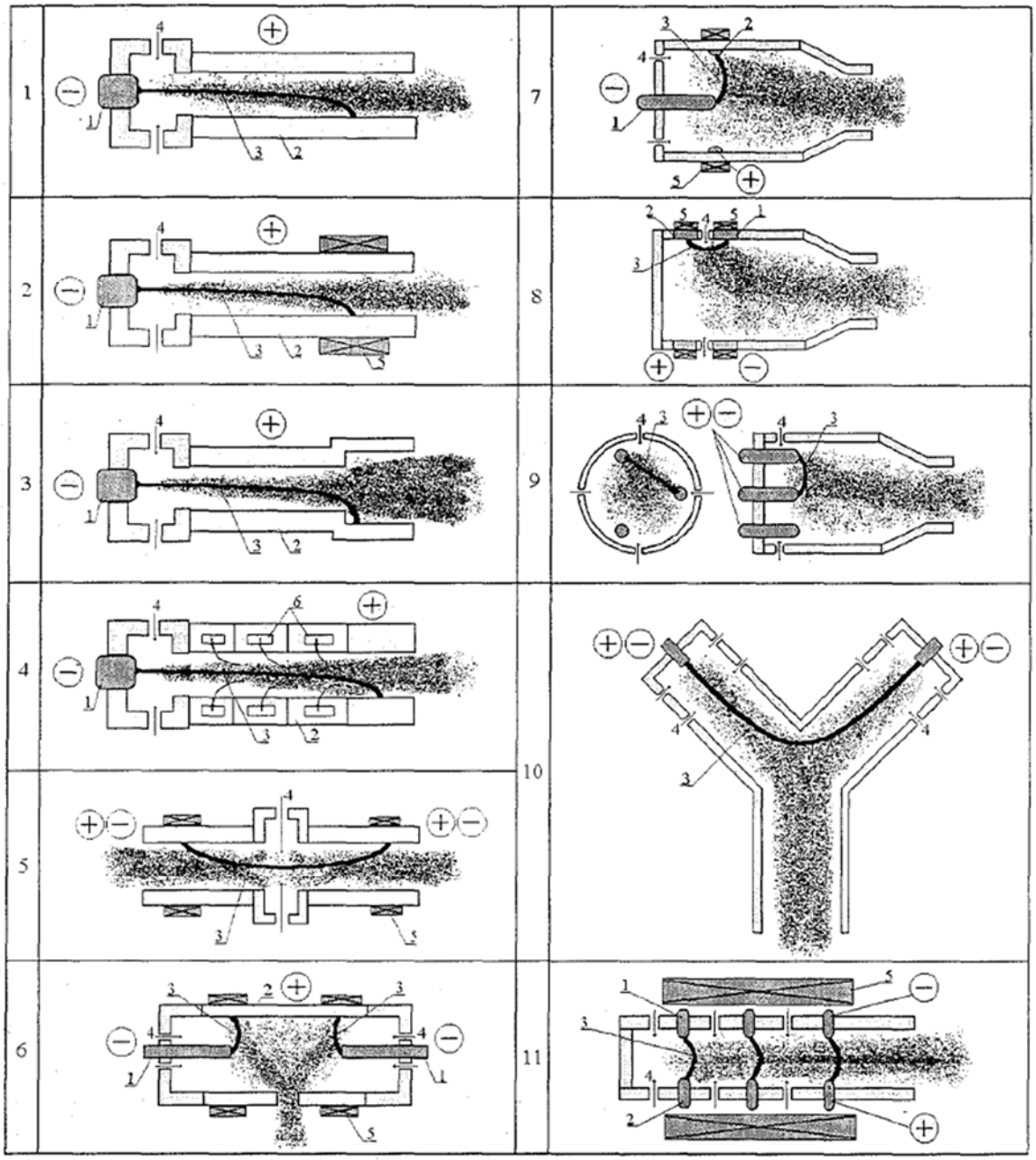


Рисунок 2.1 – Схеми електродугових плазмотронів: 1 катод; 2 анод; 3 дугового розряд; 4 підведення плазмообразующего газу; 5 котушки електромагніта; 6 міжелектродні вставки

Згідно з цією класифікацією, розглянемо основні типи генераторів плазми, їх переваги та недоліки. Більшість досліджень в області плазмових технологій базуються на дугових плазмотронів, що працюють на постійному струмі до 400 А та напругою до 500 В. В реальних умовах, для ефективної роботи плазмотронів

на високих потужностях, найбільш продуктивними є генератори, що працюють на змінному струмі або універсальні пристрої.

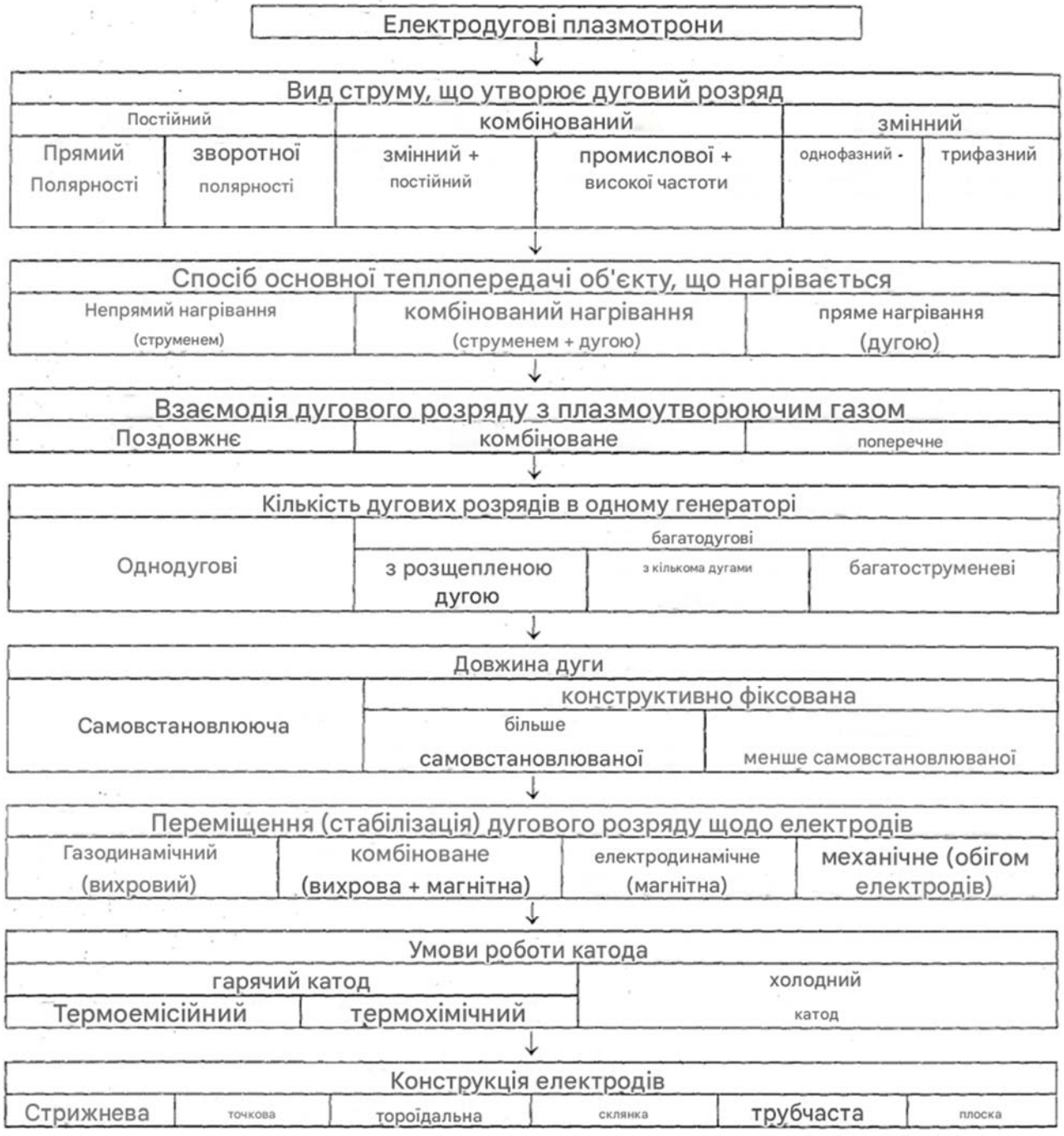


Рисунок 2.2 – Класифікація електродугових генераторів стаціонарної низькотемпературної плазми

Плазмотрони змінного струму промислової частоти можна поділити на три основні групи: однофазні, трифазні однокамерні та трифазні багатокамерні. Ці пристрої мають певні переваги в порівнянні з генераторами постійного струму:

проста схема електроживлення без необхідності випрямлячів, використання стандартного обладнання з високим ККД та можливість плавного регулювання робочого струму. Однак, при зміні полярності електродів і переході через нуль, може відбуватися згасання заряду, що вимагає додаткових заходів для підтримки стабільного горіння дуги.

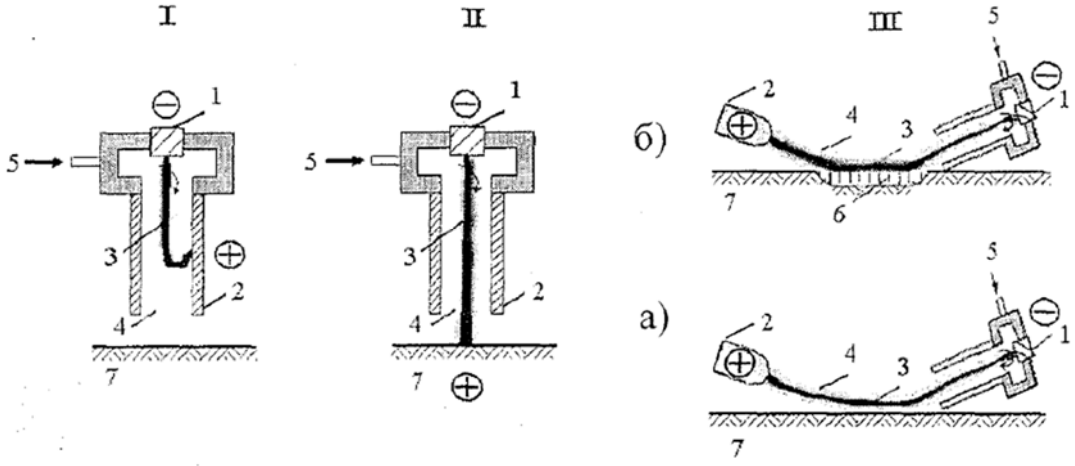


Рисунок 2.3 – Три принципу нагріву матеріалів дуговими плазмотронами: 1 - катод; 2 - анод; 3 - дуга; 4 - плазмовий струмінь; 5 - подача плазмообразуючого газу; 6 - струмопровідний розплав; 7 - нагрівається матеріал

Плазмотрони змінного струму зазвичай мають укорочену поперечну дугу, хоча існують і лінійні варіанти, які характеризуються більшою пульсацією струменя плазми. Основні конструктивні особливості плазмотронів постійного струму також застосовуються до плазмотронів змінного струму, такі як типи електродів, способи стабілізації дугового розряду, переміщення опорних точок на електродах тощо.

За методом передачі тепла нагріваному матеріалу плазмотрони поділяються на генератори прямої, непрямої та комбінованої дії. У випадку непрямого нагріву, плазмовий струмінь передає енергію до виробу через два етапи: спершу газ нагрівається в плазмотроні, потім передає енергію виробу. Цей тип плазмотронів широко використовується завдяки універсальності і добре відпрацьованим схемам, хоча ефективність нагріву дещо знижується через двоступеневу передачу енергії. Непрямі плазмотрони особливо ефективні в

технологіях, де потрібно поступове конвективне нагрівання, таких як в процесі виробництва керамічних виробів.

Прямий нагрів дугою є більш економічним, оскільки виріб, що нагрівається, слугує одним з електродів, до якого приєднується дуга. В такому разі значну частину тепла виріб отримує безпосередньо від дугового розряду. Цей метод особливо підходить для матеріалів, які є хорошими провідниками струму, і отримав широке застосування в металургії та машинобудуванні.

2.2 Розробка моделі технологічного процесу глибинного термічного оброблення ґрунтів

Комбінований метод нагріву (III) здійснюється за допомогою стабілізованої дуги, яка виводиться назовні, та плазмового струменя. Цей метод характеризується високим коефіцієнтом корисної дії, який порівняний з ефективністю прямого нагріву. Спочатку (III, а) дуговий розряд запалюється між електродом, що формує (катодний вузол), та виведеним електродом (анодним вузлом). На другому етапі (III, б), коли нагрівається поверхня діелектрика (основа), утворюється «калюжа» розплавленого силікату, що має знижене питомий опір. Частина струму дугового стовпа відгалужується та проходить через цей розплав. Збільшена іонізація часток біля розплаву, разом з електродинамічними силами, притискають дугу до оплавляючої поверхні, що дозволяє ефективно шунтувати дугу. Комбіноване плазмово-дугове нагрівання все частіше застосовується в будівельних технологіях.

Багато конструкцій плазмотронів мають лінійну схему, де розряд взаємодіє з плазмообразуючим газом поздовжньо. Це пояснюється ефективним теплообміном у дузі, яка обдувається газом поздовжньо. Окрім лінійних плазмотронів, існують конструкції коаксіальних генераторів з поперечним обдувом дугового розряду. Особливістю таких плазмотронів є коротша довжина

дугового розряду. Зазвичай ці генератори використовуються для нагрівання великих обсягів газу при атмосферному тиску до порівняно низьких температур (5000–7000 К). Їх недоліком є менша економічність через великі водоохолоджувальні поверхні та низьке вольтамперне співвідношення дуги. Тепловий коефіцієнт корисної дії коаксіальних плазмотронів за класичною схемою дещо нижчий, ніж у лінійних, хоча сучасні моделі майже не поступаються цим параметром. Наявність нерухомої точки опори на торцевому електроді призводить до перегріву. Заміна торцевого електрода на кільцевий або стаканоподібний тип дозволяє краще управляти переміщенням точок опори та дугового стовпа, що сприяє подовженню ресурсу безвідмовної роботи плазмотрона. Коаксіальна схема компоновки характерна для багатьох плазмотронів, що працюють на змінному струмі.

Збільшення потужності технологічної установки можна досягти кількома способами: підвищенням потужності одного генератора, установкою кількох плазмотронів або розробкою генераторів з розщепленою дугою в розрядному каналі. Багатодуговими плазмовими пристроями є генератори плазми та інші прилади, в яких є щонайменше дві дуги, що функціонують як окремі електричні дуги. Серед таких конструкцій можна виділити три основних типи, що відрізняються функціонуванням електричного розряду. Перший тип — це багатодугові плазмотрони з розщепленою дугою, де кілька однакових ділянок об'єднані в одну дугу. Другий тип передбачає плазмотрони з кількома окремо палаючими дугами, кожна з яких стабілізована індивідуально, а спільні електроди можуть бути загальними для всіх дуг. Третій тип — це багатодугові та многоплазменні пристрої, в яких кілька окремих плазмотронів працюють разом в одній системі. Сюди входять плазмохімічні реактори, технологічні печі та інші подібні пристрої.

Для підвищення ефективності тепловіддачі та стабілізації дуги в багатьох сучасних плазмових генераторах використовуються два основних методи: вихрова та магнітна стабілізація дугового розряду. Вихровий потік газу в каналі плазмотрона створюється за допомогою спеціальних камер з тангенціальною

подачею плазмообразуючого газу. Газ, що витікає з вихрової камери, потрапляє в міжелектродний зазор, захоплюючи дугу та витягуючи її в напрямку сопла. Основна частина дуги стабілізується на осі електрода. Подовження дуги збільшує різницю потенціалів між осьовою частиною і електродом, що може призвести до пробою дугового розряду. Газодинамічний вплив змушує анодне пляма пульсувати вздовж сопла, обертаючись по радіусу. Плазмотрони цього типу називаються «з самовстановлювальною довжиною дуги». У такій конструкції торцевий електрод може бути виконаний у вигляді стрижня або склянки: у першому випадку термокатод працює з нерухомим плямою, а в другому — з плаваючим і обертовим. Плазмотрони з самовстановлювальною довжиною дуги мають знижену вольтамперну характеристику, що часто є енергетично неефективним, оскільки це вимагає додаткових баластних опорів (з втратами до 50% потужності) або спеціальних джерел живлення.

Для досягнення висхідних вольтамперних характеристик використовують два основних методи: введення міжелектродних вставок або формування уступу в соплі плазмотрона. Міжелектродні вставки ефективно працюють у діапазоні струмів, коли довжина самовстановлювальної дуги менша за довжину вставки, що дозволяє отримати більш значне падіння напруги. Для зменшення теплових втрат та поліпшення охолодження між секціями або через пористі вставки подається холодний газ. Інший метод передбачає фіксацію анодного плями за допомогою різкої зміни діаметра полого електрода (сопла).

Електродинамічне управління дуговим розрядом здійснюється шляхом накладення зовнішнього магнітного поля соленоїда на електромагнітне поле дуги. Взаємодія радіальної складової струму дуги з осьовою складовою магнітної індукції спричиняє появу тангенціальної сили, яка обертає дуговий розряд навколо осі електродів. Частота обертання залежить від струму дуги, магнітної індукції соленоїда і кута перетину дуги та магнітних силових ліній.

Комбіновані плазмотрони, що поєднують вихрову та магнітну стабілізацію дугового розряду, мають значні переваги. Вони дозволяють реалізувати розряд з високим та керованим вольтамперним відношенням, підвищують працездатність

електродів, а також дають змогу регулювати довжину та точку прив'язки дугового розряду. Більшість потужних плазмотронів працює саме за такою схемою.

Переміщення опорного плями дуги по поверхні електродів може здійснюватися шляхом обертання самих електродів. Цей метод збільшення ресурсу роботи електродів менш популярний, оскільки ускладнює конструкцію плазмового генератора.

Ресурс роботи плазмотрона, а також стійкість і характер електричної дуги значною мірою залежать від умов експлуатації, конструкції та матеріалу катода. Катоди, виготовлені з матеріалів з високою температурою плавлення, таких як графіт (3900 K), вольфрам (3700 K), молібден (~2900 K), гафній (2400 K) та цирконій (2100 K), називають «гарячими», а катоди з металів з нижчою температурою плавлення, наприклад заліза (1800 K) чи міді (1400 K), — «холодними». Більшість плазмотронів використовують гарячі катоди. Для плазмообразуючих газів з низькими окисними властивостями відмінно підходять катоди з вольфраму з добавками торію (торійований вольфрам), лантану (лантінірований), або алюмінату Ba-Ca. Ерозиія катодних вузлів при струмах менше 1000 А не перевищує 10-11 кг/Кл. При роботі з газами, що містять значну кількість кисню (наприклад, повітря), добре зарекомендували себе цирконієві та гафнієві катоди. Їх ерозиія при струмі до 400 А складає не більше 10-10...10-11 кг/Кл, але значно збільшується при великих струмах.

Гарячі електроди, виготовлені з вольфраму, молібдену та графіту, відносяться до термоемісійних, тоді як катоди з цирконію та гафнію класифікуються як термохімічні. Зазвичай одну або кілька катодних вставок з цих матеріалів вбудовують у мідні водоохолоджувані утримувачі катодів (точкові катоди). Катоди з вольфраму та графіту можуть мати вигляд стрижнів різного діаметра (стрижневі катоди).

Більшість потужних генераторів низькотемпературної плазми, особливо іноземного виробництва, оснащені холодними катодами з тороїдальними, скляними або трубчастими конструкціями, зазвичай з міді, а іноді з сталі чи

сплавів. Наприклад, плазмотрони фірми Trioxide потужністю 500 кВт, які працюють на повітрі, мають ресурс електродів до 1000 годин, а моделі фірми Aérospatial потужністю 1500 кВт — до 400 годин. У обох випадках використовуються мідні водоохолоджувані електроди, які не можуть працювати при теплових потоках, що перевищують 10 кВт/см², тому їх робота потребує примусового переміщення катодного плями за допомогою аеродинамічних і магнітних полів або механічного переміщення електродів.

На даний момент немає єдиної методики вибору типу та конструкції генератора для оптимального виконання технологічних завдань. Вибір у даній роботі базується на порівнянні вимог до плазмотронів для конкретних будівельних технологій з узагальненими характеристиками різних генераторів низькотемпературної плазми. Аналіз численних публікацій та власних досліджень показав, що найбільш перспективними є електродугові плазмотрони, оскільки їх метод нагріву газів до плазмового стану найбільше відповідає вимогам до джерел теплової енергії для обробки ґрунтів на будівельних майданчиках. Класифікація цих плазмотронів, на основі якої можна деталізувати тип генератора для виконання завдань цієї роботи, представлена в таблиці 2.1.

Вибір плазмотронів, що працюють на змінному струмі, зумовлений їхньою відносною простотою, високим коефіцієнтом корисної дії та наявністю різноманітних потужних джерел енергопостачання. У таких генераторах зазвичай застосовується принцип поперечного взаємодії плазмообразуючого газу з розрядом, що забезпечує утворення плазмового факела з більш рівномірним і широким розподілом теплового потоку. Особливу увагу привертають генератори, які працюють на змінному та постійному струмі.

Використання комбінованих генераторів для плазмово-дугового нагріву обґрунтоване їхньою більшою ефективністю у передачі тепла нагрівається об'єкту, особливо під час переходу ґрунту (типового діелектрика) в струмопровідний розплав.

Таблиця 2.1 – Конструктивні схеми і характеристики генераторів низькотемпературної плазми, рекомендовані для термічного зміцнення ґрунтів

Конструктивные схемы и характеристики генераторов	Рекомендации
Вид основного тока, образующего дуговой разряд	Переменный или генераторы, работающие на переменном и постоянном токе
Способ основной теплопередачи нагреваемому объекту	Комбинированный, с широкой струей и малым коэффициентом сосредоточенности теплового потока
Взаимодействие дугового разряда с плазмообразующим газом	Поперечное или комбинированное
Количество дуговых разрядов в одном генераторе	Многодуговые
Длина дуги	Конструктивно фиксированная
Стабилизация и перемещение дугового разряда относительно электродов	Газодинамическая или комбинированная
Условия работы катода	Термоэмиссионные
Конструкция электродов	Стержневая, трубчатая, стаканная

Багатодугові системи дозволяють створювати реактори з потужними тепловими потоками та широкими плазмовими факелами без потреби збільшувати кількість джерел енергопостачання плазмотронів. Конструкції плазмотронів з регульованою довжиною дуги є дещо складнішими за ті, що мають самовстановлювальну дугу, але вони мають переваги завдяки кращим вольтамперним характеристикам та здатності піддаватися керуванню. Спосіб комбінованої стабілізації дугового розряду (вихровий і магнітний) та його переміщення відносно електродів є більш ефективним, але складнішим з конструктивної точки зору, особливо при глибинній термообробці ґрунтів. Часто доводиться обмежуватися тільки газодинамічним методом.

Деталізація вибору конструктивних рішень залежить від загальних граничних умов. Наприклад, при використанні генераторів з поперечним обдувом розряду та комбінованим теплопередавальним принципом перевага надається масивним електродам стрижневого або трубчастого типу. Гарячі масивні електроди, що працюють в термоемісійний режим, дозволяють передавати додаткову енергію нагрітому об'єкту завдяки випромінюванню з їхньої поверхні. Вибір матеріалів для виготовлення електродів та газу, що утворює плазму, обмежує варіанти для їхнього виготовлення.

На рис.2.4-2.7 показані чотири схеми електродугових плазмотронів, які були апробовані при розробці будівельних технологій.

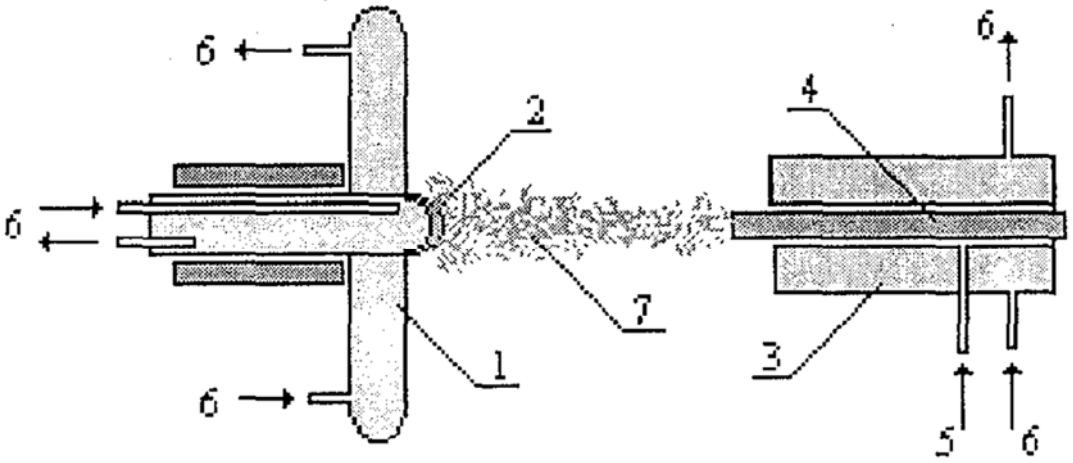


Рисунок 2.4 – Електродугової плазмотрон: 1 складовою анод; 2 вольфрамовая насадка; 3 катодний вузол; 4 вольфрамовий стрижень; 5 подача газу; 6 система водоохолодження; 7-плазмово-дугового розряд

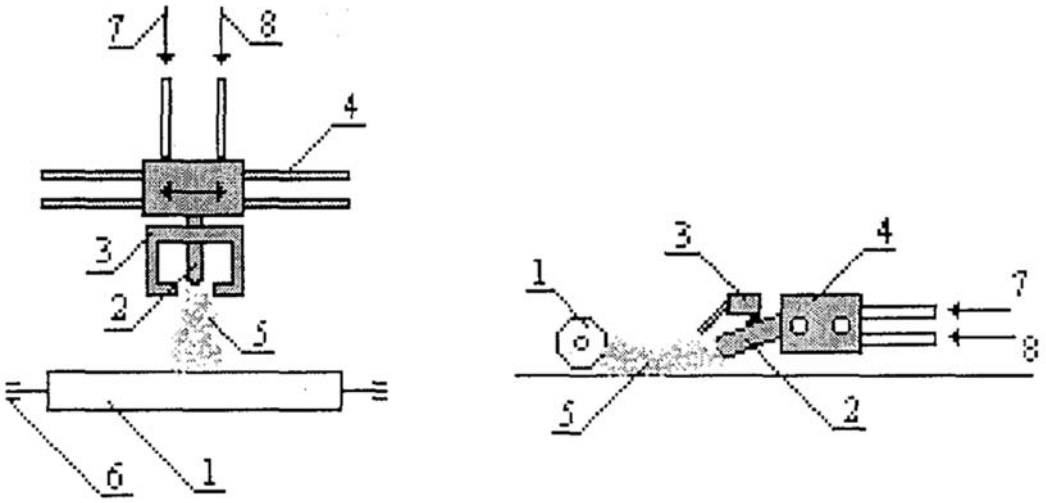


Рисунок 2.5 – Електродугової плазмотрон: 1 анод; 2 катодний вузол; 3 відхиляє електромагніт; 4 система переміщення катодного вузла; 5 плазменно-дугового розряд; 6 система обертання анода; 7- подача води; 8- подача газу

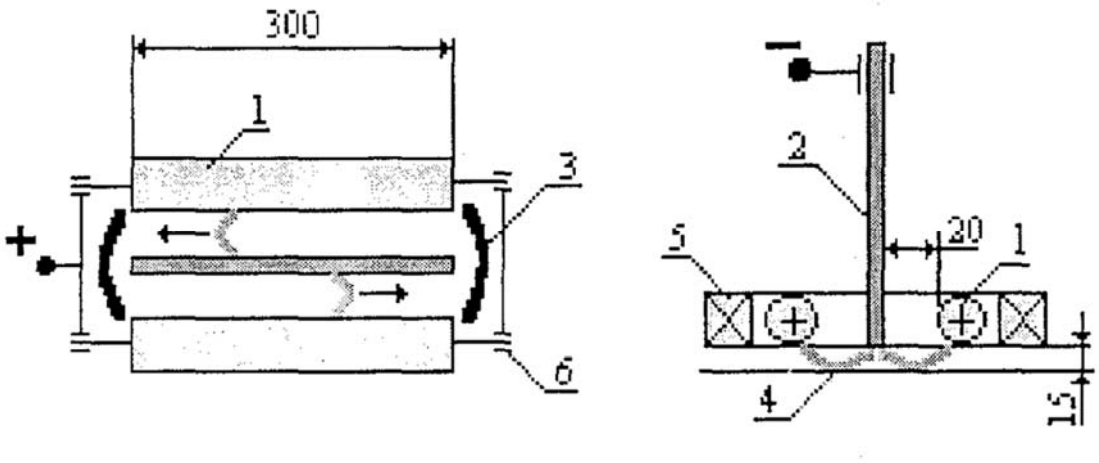


Рисунок 2.6 – Коаксіальний електродугової плазмотрон: 1 аноди; 2 катод; 3 діелектричні теплозахисні екрани; 4 плазменно-дугового розряд; 5 керуючий електромагніт; 6 система обертання анодів

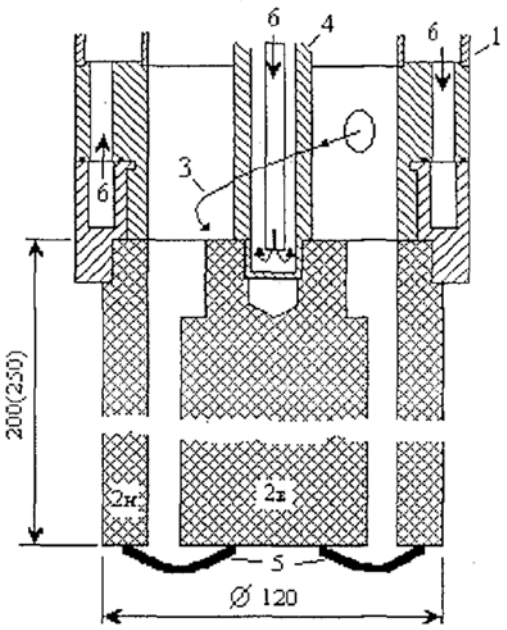


Рисунок 2.7 – Коаксіальний многодуговой плазмотрон (Показаний електродний вузол): 1 зовнішня державка; 2 анод і катод; 3 подача газу; 4 внутрішня державка; 5 плазменно-дугового розряд; 6 система водоохолодження

Кожен з цих плазмотронів у тій чи іншій мірі відповідає вимогам до електротермічних пристроїв для обробки ґрунтів на будівельних майданчиках. Загальною рисою всіх генераторів є комбінований спосіб теплопередачі, що дозволяє обробляти смугу шириною понад 100 мм з рівномірним розподілом теплового потоку по всій площі.

В обох проєктах (див. Рис. 2.4 та 2.5) передбачено поділ катодного та анодного вузлів із забезпеченням стабільності та витягування відкритого розряду. Обидві модифікації використовують комбінований метод управління дуговим розрядом. У першій моделі катод виконаний у вигляді рухомого вольфрамового стержня діаметром 3 мм, який фіксується в мідному затиску з системою водяного охолодження. Для анодної частини рекомендовано використовувати мідь із вольфрамовим покриттям завтовшки до 1 мм. Через низьку ерозійну стійкість вольфраму в повітряному середовищі як плазмоутворювальний газ застосовується чистий азот, а захист забезпечується додатковою подачею аргону. Тривалість роботи електродів плазмотрона при напрузі до 180 В і силі струму до 300 А становить до 140 годин.

Інший варіант плазмового генератора (див. Рис. 2.5) передбачає рухливість обох – катодного та анодного вузлів. Подовжений анод, виготовлений з графіту або міді з системою водяного охолодження, має можливість обертання, тоді як катодний вузол переміщується вздовж спеціальних напрямних зі швидкістю до 120 м/с. На катодному вузлі встановлено електромагніт, що дозволяє спрямовувати дуговий розряд на оброблювану поверхню. Для продовження строку служби електродів через катод подається азот. Плазмотрон працює з падаючою вольт-амперною характеристикою при напрузі до 200 В і струмі до 400 А.

Унікальна конструкція коаксіального плазмотрона (див. Рис. 2.6) дає можливість обробляти за один прохід поверхню шириною до 30 см. Один дуговий розряд переміщується по замкнутому анодному простору зі швидкістю до 150 м/с під дією електромагнітного поля соленоїда. Електроди включають графітовий катод і два мідних аноди. Надійна робота анодного вузла

забезпечується завдяки інтенсивному охолодженню водою, обертанню анода та використанню азоту як плазмоутворювального газу. Особливості конструкції сприяють ефективному охолодженню відкритої дуги. Довжина дуги обмежена до 20 мм, а стабільність роботи генератора підтримується за умови дотримання дистанції між електродами та оброблюваною поверхнею в межах 10–15 мм.

Енергоживлення всіх описаних плазмових генераторів здійснюється постійним струмом від спеціалізованих джерел (типу АПР 404 УХ4), розроблених на основі тиристорів. До їх складу входять основний блок, силовий модуль для підтримки чергової дуги, система автоматизації та осцилятор для ініціації дугового розряду. Кожен генератор оснащений додатковим джерелом, що управляє роботою соленоїда.

Генератор плазми, зображений на рис. 2.7, має схожі риси з попередньою моделлю плазмотрона. Він також використовує коаксіальну схему, але з поперечним обдувом відкритого дугового розряду. На відміну від інших конструкцій, цей генератор здатний функціонувати як на постійному, так і на змінному струмі із силою до 1800 А при відносно низькій і безпечній робочій напрузі в діапазоні від 60 до 110 В. Плазмотрон відрізняється простотою конструкції, відсутністю дорогих матеріалів і сплавів у виготовленні. Два основних електроди, що витрачаються, зроблені з графіту. Без значних змін у конструкції пристрій може працювати як на поверхні, так і в суворих умовах, наприклад, у свердловинах. Широкий, розсіяний плазмовий факел формується завдяки взаємодії багатодугового розряду з плазмоутворювальним газом (повітрям), який подається тангенціальною закруткою.

Однією з ключових особливостей цього плазмотрона є низька швидкість витікання плазмового струменя (<20 м/с) при значному обсязі нагрітого газу (до 10 м³/год). При цьому рівень звукового тиску не перевищує 80 дБ. Ініціація дугового розряду здійснюється коротким контактом між електродами. Для енергозабезпечення використовуються серійні джерела живлення (зварювальні трансформатори, випрямлячі) з потужністю понад 80 кВт і напругою холостого ходу понад 130 В.

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ҐРУНТОВИХ ОСНОВ

3.1 Планування та проведення експериментальних досліджень, використання полум’яного обладнання

Під час визначення оптимальних параметрів будь-якого технологічного процесу необхідно аналізувати численні взаємозв'язки між явищами, оцінювати взаємодію окремих елементів та системи в цілому, а також враховувати вплив багатьох факторів на кінцевий результат. Згідно з кібернетичним підходом, технологія є складною системою із множинними вхідними та вихідними параметрами. Всі системи поділяються на два основні типи: детерміновані та стохастичні. Технологічні процеси плазмової термообробки ґрунтів доцільно класифікувати як стохастичні, оскільки зміна будь-якого параметра процесу X на величину Delta X викликає зміну результату Y на величину Delta Y з певною ймовірністю $p < 1$.

Прогнозування змін параметрів процесу або пошук їх оптимальних комбінацій можливі лише через моделювання. У цьому дослідженні застосовуються основні методи фізичного та математичного моделювання. Методи фізичного моделювання реалізуються за допомогою лабораторних стендів і установок, створених із врахуванням критеріїв подібності. Математичне моделювання процесів здійснювалося за допомогою регресійного та дисперсійного аналізів, а отримані залежності представлені у вигляді рівнянь і графіків.

Аналіз попередніх досліджень у галузі термообробки ґрунтів, принципів формування й управління плазмовими тепловими потоками, а також моделювання процесів термічного впливу, дозволив чітко визначити завдання

кожної серії експериментів. Було досліджено фізико-хімічні закономірності термічної модифікації ґрунтів, результати чого викладені у попередніх розділах.

Оцінювання результатів експериментальних досліджень здійснювалося за низкою показників. Основним критерієм ефективності технологічних режимів плазмової термообробки було обрано інтенсивність плавлення ґрунтів g. Під цим критерієм мається на увазі кількість ґрунтового розплаву, що утворюється за одиницю часу T.

g=Q/Tg = Q / T, см³/хв або g=m/Tg = m / T, г/хв. Обсяг розплавленого ґрунту визначався в одиницях об’єму (QQ) або маси (mm).

Другим ключовим критерієм ефективності технологічних режимів плазмової термообробки ґрунтів було обрано показник питомих енергетичних витрат (EyE_y). Це кількість енергії (EE), необхідної для утворення одиниці об’єму або маси розплавленого ґрунту за одиницю часу. Рівень питомих енергетичних витрат пов’язаний із першим показником (gg) і розраховувався за такими формулами:
Ey=E/QE_y = E / Q або Ey=E/mE_y = E / m, Вт·год/см³ або Вт·год/г, або за допомогою співвідношення: Ey=P/gE_y = P / g, де PP — енергетична потужність плазмотрона, Вт.

Окрім основних критеріїв ефективності, додатково враховувалися механічні та фізичні властивості матеріалу, зокрема міцність, деформативність, стійкість і пористість. Ці характеристики дозволяли оцінити якість отриманого матеріалу.

Оптимізація технологічного процесу базується на врахуванні трьох груп факторів, які забезпечують максимальну ефективність. У цьому дослідженні першою групою були визначені характеристики оброблюваних матеріалів і ґрунтових поверхонь. Як основний матеріал для плазмової термообробки використовували суглинки, взяті з кар’єрів Омської області та Татарстану. Окрім суглинків, експеримент проводили з глинами, супісками та пісками (табл. 3.1 і 3.2), що охоплює більшість типових ґрунтів, застосовуваних у будівництві.

Таблиця 3.1 – Стадії термічної обробки ґрунтів

№ стадії	Умовне найменування стадії	Найбільш значущі фазові перетворення на кожній стадії обробки	Кордони перетворень (К) при нагріванні (охолодженні), град./хв.		
			< 10	10-500	> 500
1	Осушення (дегідратація)	Видалення вільної води Видалення фізично пов'язаної води Початок розкладання кристалогідратів і гідрооксидів	310 - 520	330-620	360-720
2	Нагрів мінеральної частини (дегідроксиляція)	Повне розкладання кристалогідратів і гідрооксидів Видалення вологи всіх видів Початок аморфізації глиноутворюючих мінералів Видалення органічних сполук Початок твердофазного та рідкофазного взаємодії речовин	470 - 970	570 – 1070	670 - 1270
3	Випалення мінеральної частини (спів-кання)	Аморфізація глиноутворюючих мінералів Спікання твердофазове Спікання за участю рідкої фази Дисоціація карбонатів Початок кристалізації високотемпературних новоутворень Поліморфні перетворення Газоутворення та газовиділення	870-1470	970 – 1570	1170-1670
4	Плавлення (аморфізація)	Інтенсивна аморфізація з переходом основної частини речовин у рідкий стан Часткове розчинення високотемпературних кристалічних фаз і рекристалізація Поліморфні перетворення Газовиділення та поризація розплаву	1370 - 1870	1470-1920	1570 - 1970
5	Нагрів та гомогенізація розплаву	Перехід всіх фаз у рідкий стан Гомогенізація та дегазація розплаву Випаровування розплаву з конденсацією новоутворень	1770 - 2370	1820 – 2420	1870 - 2470
6	Охолодження і твердіння розплаву	Перехід рідкої фази в тверду з кристалізацією та (або) утворенням склоподібної речовини	2370-290	2420-290	2470 - 290

Загалом для дослідження було використано двадцять видів ґрунтів різного складу.

У ході експериментальних досліджень змінювалися не лише типи ґрунтів, але й стан їхньої поверхні (рис. 3.1). Обробці підлягали рівні ділянки з різним

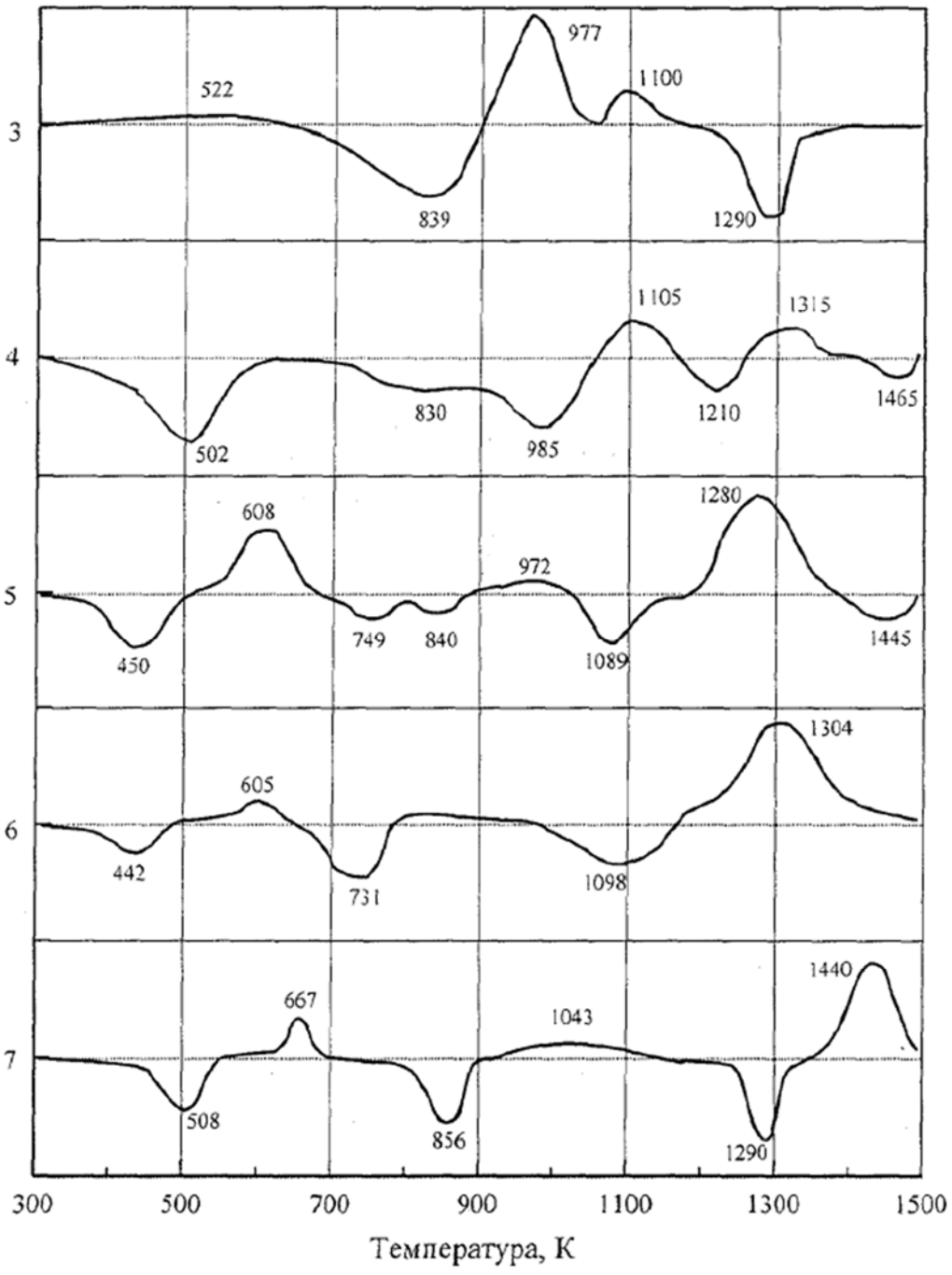


Рисунок 3.1 – ДТА грунтів різного хіміко-мінералогічного складу (Характеристики грунтів см. Табл.3.1, 3.2)

ступенем ущільнення. Для збільшення питомої площі теплопередачі в щільному ґрунті виконувалися борозни: дрібні, глибокі та широкі гребінки, при цьому варіювалися їх геометричні параметри. Поверхня ґрунту покривалася сіткою отворів (мікрошпурів) із різним кроком і глибиною. Також створювалися прорізи для занурення електродів плазмотрона нижче рівня поверхні ґрунтового масиву.

Друга група досліджуваних факторів охоплювала параметри роботи плазмотрона. Під час визначення змінних і фіксованих параметрів, а також рівнів їх варіювання, враховувалися конструктивні особливості плазмотронів, можливості джерел живлення та експлуатаційні характеристики генераторів низькотемпературної плазми. У дослідженнях використовувалися дві модифікації генератора плазми (табл. 3.3). Регулювалися потужність, сила струму в розряді, робоча напруга, а також витрата плазмоутворювального газу.

Третя група факторів була умовно названа «параметри взаємодії». До неї входили параметри, що визначали процес впливу теплового потоку на плавлення ґрунту.

На початкових етапах експериментів проводився нагрів поверхні нерухомим плазмотроном (статична обробка), змінювалися тривалість нагрівання та відстань до оброблюваної поверхні. На наступних етапах плазмотрон переміщувався із заданою швидкістю.

Результати перших серій експериментів і моделювання процесу термічного впливу низькотемпературної плазми на ґрунт дозволили перейти до вдосконаленої технології плазмової обробки. Вона передбачала подачу пухкого ґрунту в зону плавлення за умов рівномірного переміщення плазмотрона. Межі регулювання змінних параметрів визначалися на основі технічних характеристик обладнання, практичних обмежень у будівництві та вимог до безпеки виконання робіт.

У процесі проведення факторних експериментів межі варіювання параметрів уточнювалися. Відбір оптимальних поєднань факторів у багатофакторних експериментах враховував найважливіші параметри, близькі до оптимальних значень. Перед основною серією експериментів проводилися

постановочні дослідження. Їх метою було перевірити коректність вибору факторів і визначити можливі відхилення у даних.

Для кожного значення параметрів експеримент повторювався тричі, а отримані результати оцінювалися за відповідними методиками. Повторюваність випробувань у головній серії перевірялася шляхом порівняння фактичного коефіцієнта варіації із прийнятими стандартами. Експерименти, які мали критичне значення або викликали сумніви щодо достовірності, проходили додаткову перевірку на відтворюваність із заданою довірчою ймовірністю.

Аналіз експериментальних даних за допомогою регресійно-кореляційного методу розпочинався з побудови графіків. Графічні зображення надавали можливість наочно оцінити результати експерименту, краще зрозуміти його фізичну сутність і визначити найвідповідніший тип емпіричних залежностей для вибору математичної моделі. Значущість коефіцієнта кореляції оцінювали на п’ятирівневому рівні достовірності. Обробка даних для побудови математичних моделей і перевірка їхньої адекватності проводилися за стандартними методиками.

Дисперсійний аналіз мав певні обмеження, зокрема, труднощі у визначенні оптимального поєднання численних факторів, які одночасно впливають на досягнення максимальних показників ефективності. Для розв’язання оптимізаційних завдань використовувалася методика математичного планування експерименту. Згідно з рекомендаціями, застосовували центральне композиційне ротатабельне уніформ-планування, використовуючи матрицю повного факторного експерименту. Аналіз математичних моделей виконували за допомогою двовимірних перетинів із канонічним перетворенням цільової функції.

Щодо плазмового обладнання, його база для проведення досліджень почала формуватися у СибАДІ у 1987 році. Спочатку застосовували струменеві плазмотрони лінійного типу (рис. 1.12 і 1.13). Перехід до використання нових систем плазмотронів (МПГ і МПГ-П) став закономірним етапом, що ґрунтувався на накопичених теоретичних знаннях і практичному досвіді. Детальне

обґрунтування вибору цих плазмотронів для термічної обробки ґрунтів наведено у другому розділі роботи. Зовнішній вигляд плазмотрона МПГ зображено на рис. 3.2, а його технічні характеристики подано в табл. 3.3.

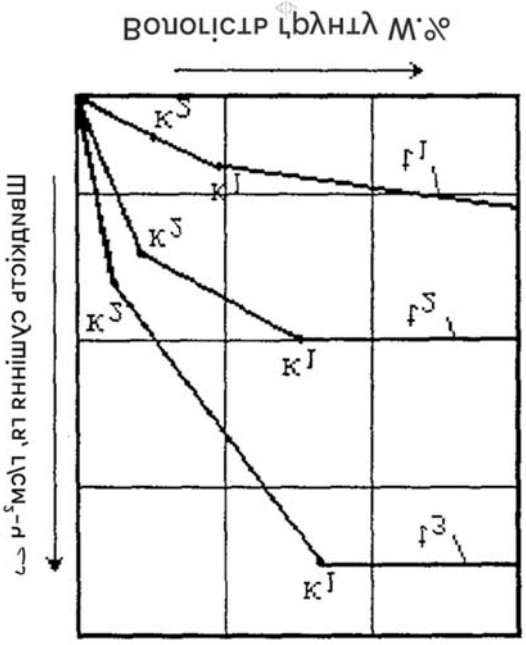


Рисунок 3.2 – Характерні криві сушіння глинистих ґрунтів

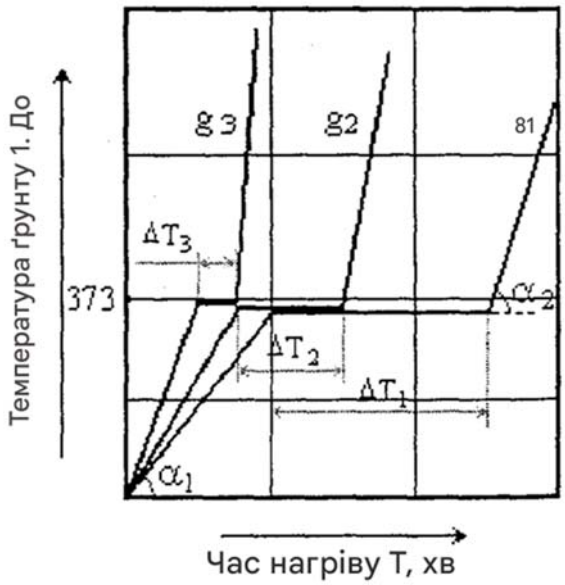


Рисунок 3.3 – Характерні криві підвищення температури ґрунтів при нагріванні

Плазмотрон МПГ був спроєктований під керівництвом Н.П. Пашацького у відділенні № 1 МІФІ міста Челябінськ-65 та виготовлений за спеціальним замовленням. Для моделювання процесу термообробки ґрунтів у виробничих

умовах використовується спеціальний стенд, на якому встановлено плазмотрон МПГ (рис. 3.3). Його вертикальний хід досягає 50 см, а поперечне переміщення візка з плазмотроном може здійснюватися на відстань до 2,5 м завдяки системі блоків і троса. Поздовжнє переміщення плазмотрону разом із порталом реалізується через редуктор із електродвигуном. На пульті управління розташовані контрольно-вимірювальні прилади, які дозволяють налаштовувати технологічні параметри роботи генератора плазми.

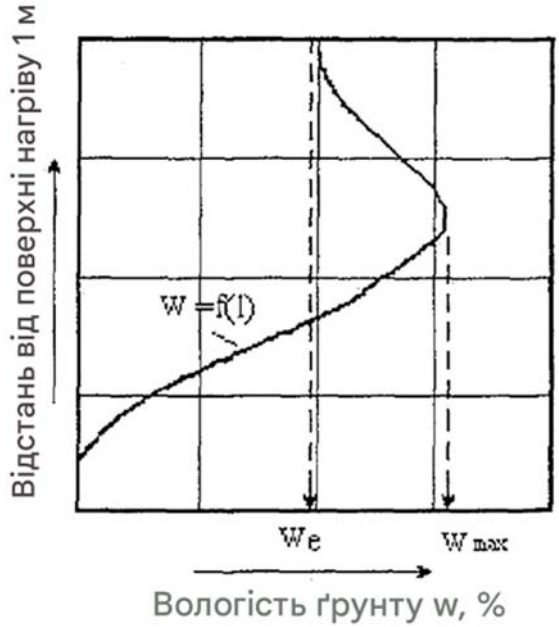


Рисунок 3.3 – Характерні криві підвищення температури грунтів при нагріванні

У результаті теоретичних і експериментальних досліджень була розроблена установка для глибинної термообробки ґрунтів. За участю Н.П. Пашацького та автора створено генератор низькотемпературної плазми, спеціально адаптований для глибинного зміцнення ґрунтів, — погружний плазмотрон МПГ-П (рис. 3.4, табл. 3.3).

Конструкція плазмотрона МПГ-П дозволяє проводити обробку ґрунту з глибини свердловини до 3 м, занурюючи пристрій у ґрунтову масу. При необхідності довжина плазмотрона може бути збільшена відповідно до довжини термооброблюваної зони ґрунту.

Для живлення плазмотронів МПГ і МПГ-П використовуються два зварювальні трансформатори моделі ТДФЖ-2002УЗ. Основним плазмоутворювальним газом є повітря, яке подається через компресор із масловідділювачем і ресивером. Система водяного охолодження плазмотрона є проточною, а для підведення електроенергії застосовуються два водоохолоджуючі кабелі.

Окрім основного обладнання, під час експериментів використовувалися додаткові пристрої та спеціальні прилади. Фізико-хімічні дослідження проводилися в лабораторіях кафедри хімії СибАДІ, у відділеннях Омського державного університету та інших науково-дослідних установах, оснащених сучасними атестованими приладами.

Цей розділ роботи містить загальні методи експериментальних досліджень і короткий опис використаного обладнання. Деталі методик розглянуто і конкретизовано в наступних розділах.

3.2 Аналіз технологічних параметрів процесу термічного зміцнення ґрунтових основ

Експериментальні роботи щодо термічного зміцнення ґрунтових основ починалися з локального прогріву окремих зон у різний час — від 0,5 до 15 хвилин. Уже через 5–7 секунд після початку нагріву спостерігалося плавлення ґрунту. Через 20–25 секунд після утворення розплаву він починав кипіти, викидаючи бризки вгору та по радіусу. У цей момент параметри роботи плазмотрона змінюються: робоча напруга знижується, сила струму збільшується, а сама робота пристрою стає стабільнішою, зі зниженням рівня звукового тиску до 60–65 дБ.

Після завершення прогріву ґрунту та переміщення плазмотрона на іншу ділянку розплав продовжує кипіти ще 10–15 секунд. Після цього верхній шар поступово застигає, утворюючи тонкий (0,05–0,1 мм) склоподібний шар із зафіксованими бульбашками. Розмір і кількість бульбашок залежать від типу ґрунту, тривалості прогріву, а також температури та в'язкості розплаву. Короткий прогрів (0,5 хвилини) глинистих ґрунтів дає найбільшу кількість поверхневих бульбашок діаметром 10–25 мм. З подовженням часу термообробки кількість бульбашок зменшується, але їхній діаметр збільшується. Повне видалення бульбашок і вирівнювання поверхні розплаву можливе при повторному короткому прогріванні протягом 2–3 секунд. Причини утворення бульбашок і кипіння розплаву детально розглядаються в третьому розділі роботи.

Результати термічної обробки оцінювали після охолодження, оглядаючи та розкриваючи оброблені ділянки, вимірюючи розміри шарів у плані та профілі, а також проводячи зважування й аналіз отриманого матеріалу.

Високотемпературний вплив на ґрунт спричиняє суттєві зміни його властивостей і структури (рис. 3.5). Поверхневий шар застиглого розплаву представлений пористим склоподібним матеріалом темного кольору. Пори займають до 50% об'єму, їх діаметр становить 2–6 мм. Менші пори мають сферичну форму, тоді як більші набувають краплеподібної форми через різницю температур і властивостей матеріалу. Товщина шару такого скла варіюється в межах 3–15 мм. Поверхня застиглого розплаву часто нагадує увігнуту лінзу, радіус кривизни якої зменшується зі збільшенням часу прогріву. За тривалого впливу поверхня стає вогнутовипуклою.

Опускання поверхні ґрунту під час плавлення зумовлене збільшенням його густини у розплавленому стані порівняно з початковою (густина насипного ґрунту — 1,2–1,3 г/см³, ущільненого — 1,7–1,8 г/см³, пористого склоподібного матеріалу — 1,4–2,1 г/см³, розплавленого ґрунту з мінімальною пористістю — до 2,7 г/см³). На основі цих показників можна прогнозувати, наскільки опуститься поверхня при плавленні. Невелике підняття поверхні розплаву в центральній зоні

обумовлене вищою температурою в цьому місці, що знижує в'язкість і поверхневий натяг. У результаті утворюється більше газових пор, які прагнуть вийти назовні через розплав у зоні високих температур.

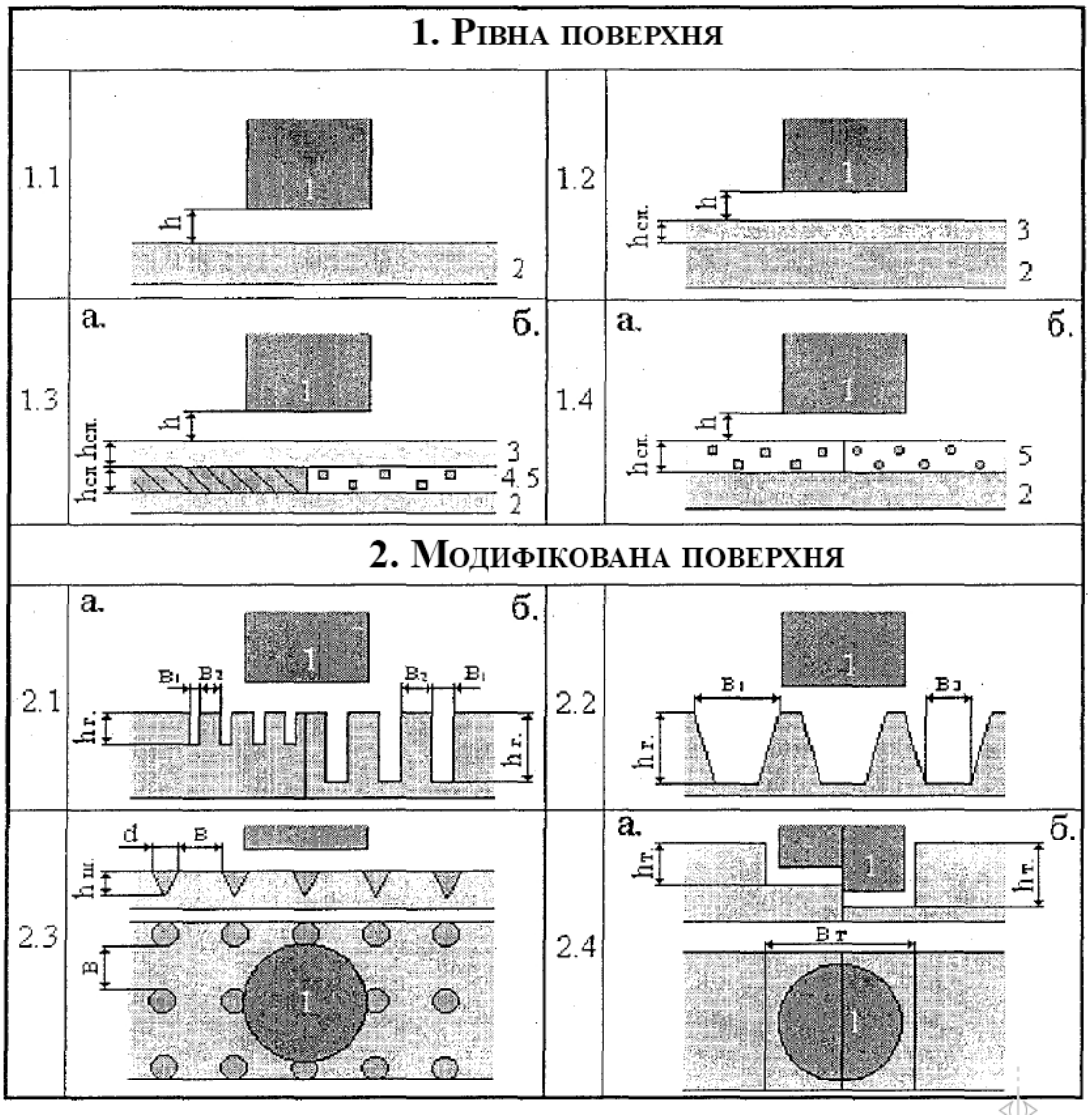


Рисунок 3.5 – Різновиди грунтовій поверхні при плазмової термообробки: 1 - електроди плазмотрона; 2 - щільний грунт; 3 - пухкий насипний ґрунт; 4 - теплообробний грунт; 5 - щебеневий матеріал; h- відстань між електродами і грунтової поверхнею; hc - товщина шару; h і в1 / - глибина і ширина прорізів гребінки; b2 - відстань між прорізами; в3 - ширина прорізів по низу; d і b - діаметр і відстань між мікрошпурамі; hm і bт - глибина і ширина прорізу

У нижніх шарах склоподібного матеріалу також спостерігається утворення пористого скла. Характеристика структури цього шару схожа на верхній, але його товщина помітно менша. Причини появи пористості в цій зоні пов’язані з двома факторами. По-перше, саме тут зосереджуються основні процеси газоутворення. По-друге, при охолодженні розплаву температура падає швидше, а в'язкість склоподібної маси у верхньому та нижньому шарах зростає швидше, ніж у середній зоні. Унаслідок цього газові включення, формування яких відбувається в певному температурному діапазоні, залишаються в областях із підвищеною в’язкістю охолоджуваного матеріалу.



Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд працюючого плазмотрона

Нижче зони пористого скла розташовується щільний шар склоподібного матеріалу чорного кольору, що має мінімальну пористість, високу міцність і практично нульове водопоглинання. У найнижчих частинах охолодженого розплаву ґрунту утворюється проміжний шар, що поєднує властивості склоподібної та кристалічної структури. Цей матеріал має сіро-зелений колір, відзначається високою пористістю, а розмір газових включень не перевищує 0,5

мм. Об'єм пір у цьому шарі становить 40–50%, а його густина не перевищує 1,45 г/см³. Товщина цього прошарку зазвичай варіюється в межах 2–5 мм.

Таблиця 3.3 – Загальна характеристика плазмотронов МПГ і МПГ-П

Найменування параметру	Од.вим.	характеристика параметра
Номінальна потужність	кВт	60-160
Струм дугового розряду	-	Постійний або змінний
Межі зміни робочого струму	А	600-2000
Робоча напруга	В	60-110
Среднемассовая температура плазми	К	4000 - 6000
Кількість дугових розрядів	шт.	от 8 до 20
Переміщення дугових розрядів		Газодинамічне
Взаємодія дугових розрядів з плазмообразующих газом	-	Поперечний
Вид плазмообразующего газу	-	Повітря
Витрата плазмообразующего газу	г/с	5-25
Умови роботи електродів	-	Гарячі, термоемісійні
Конструкція електродів: катод	-	стрижнева
анод	-	трубчаста
Матеріал електродів	'	Графіт силіційований (МПГ) или боросшшцірованний (МПГ-П)
Система охолодження електродів	-	Водяна, примусова
довжина плазмотрона	м	1,2 (МПГ), 4,5 (МПГ-П)
маса плазмотрона	кг	28 (МПГ), 82 (МПГ-П)

На глибині під цим шаром розташований змінений шар ґрунту, товщина якого залежить від тривалості термообробки та вологості початкового матеріалу. У разі тривалого нагрівання товщина цього шару стає співмірною із товщиною склоподібного матеріалу. При короткочасному впливі або підвищеній вологості ґрунту його товщина не перевищує 5–15 мм.

Результати експериментів із статичним прогріванням рівної щільної поверхні ґрунту ілюструють етапи зміни об’єму та інтенсивності плавлення. Умовно цей процес можна поділити на два основні етапи. На першому спостерігається інтенсивне збільшення товщини розплаву, яке триває протягом першої хвилини термообробки. У цей час швидкість утворення склоподібного матеріалу досягає 100 см³/хв. На другому етапі відбувається поступове зниження

інтенсивності утворення розплаву, а його обсяг і товщина збільшуються із середньою швидкістю до 50 см³/хв.

Таблиця 3.5 – План експериментальних досліджень

технологічні параметри	Един. измерен.	межі зміни
1. Параметри матеріалів і поверхні		
Вид оброблюваних матеріалів	—	Глина, суглинок, супісок, пісок
Максимальна крупність агрегатів ґрунтових сумішей	мм	От < 20 до < 0.63
щільність матеріалів	—	Від максимальної стандартної до пухко-насипний
Вологість матеріалів	%	Від гигроскопической до максимальної молекулярної
Оброблювана поверхня	—	Рівна (щільна, пухка), гребенчатая, дірчаста, траншейна
2. Параметри плазмотрона		
Сила струму в розряді	А	От 1000 до 1800
Витрата плазмообразующего газу	$м^3$ / ч	От 0,5 до 9,5
робоча напруга	В	От 60 до 110
енергетична потужність	кВт	От 60 до 160
3. Параметри взаємодії		
Статичний прогрів	мин	От 0.5 до 15
Ступеневу переміщення	мм	От 30 до 120
Рівномірний рух	см/мин	От 20 до 140
Відстань до поверхні	мм	От 10 до 40
Перекриття смуг	мм	От 0 до 60
Подача грунту до зони плавлення	-	На ґрунтовий масив, на остиглий розплав, на гарячий розплав

Зміна інтенсивності формування розплаву пояснюється особливостями теплопередачі від плазмотрона до ґрунту. На початковій стадії теплопередача здійснюється переважно через променистий і конвективний теплообмін. На другій стадії, після утворення склоподібної поверхні, ефективність конвективного теплообміну знижується, і основним джерелом тепла стає верхній шар розплаву, який отримує енергію безпосередньо від плазмотрона.

Перша серія експериментів підтвердила теоретичні передумови про неефективність тривалого статичного прогрівання ґрунту за допомогою генератора низькотемпературної плазми. Для обробки поверхні рухомим плазмотроном рекомендується встановлювати швидкість його переміщення, яка

відповідає впливу протягом однієї хвилини. Оптимальна швидкість становить не менше 10 см/хв.

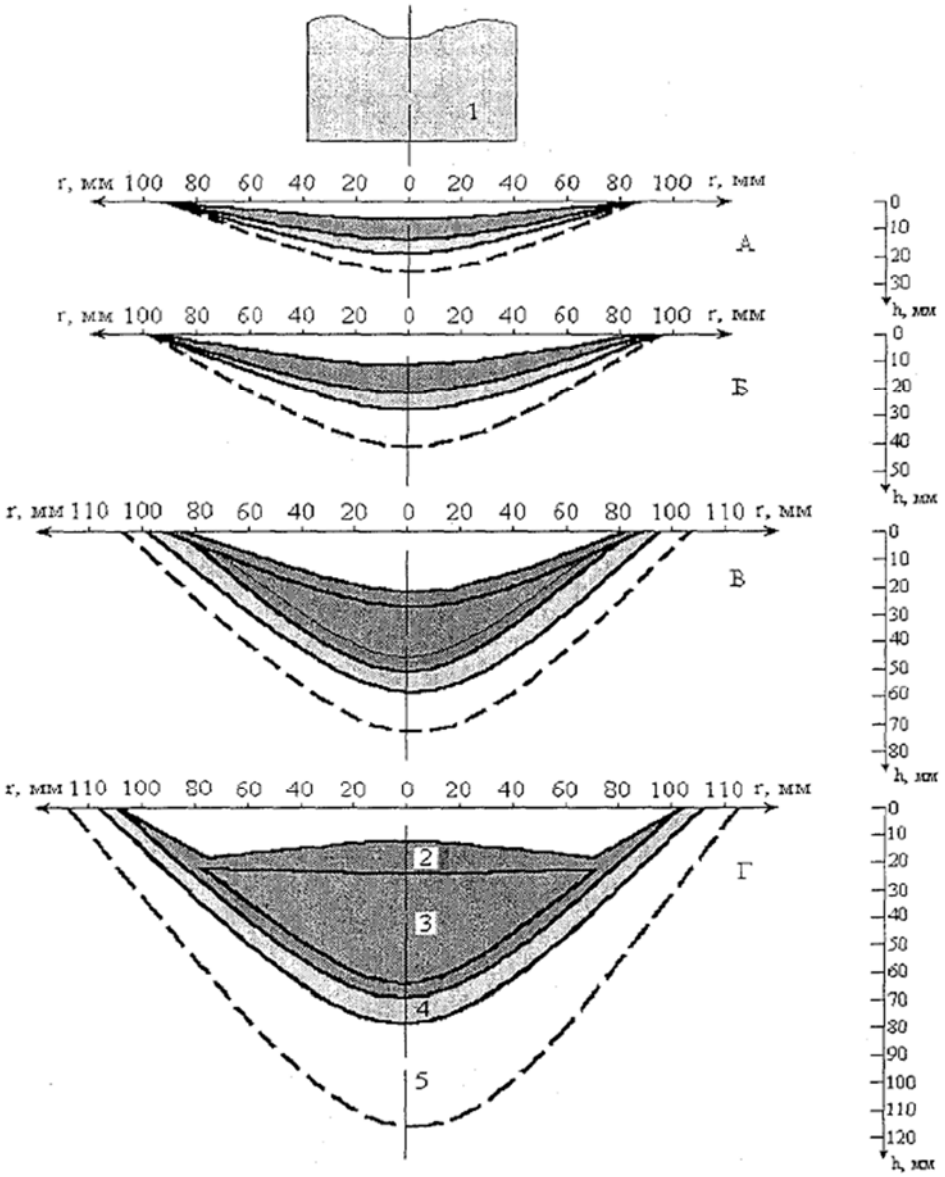


Рисунок 3.7 – Результати статичного прогріву грунтовій поверхні протягом: А - 1 хв; Б - 3 хв; В - 8 хв; Г - 15 хв; 1 - електроди плазмотрона; 2 - пористий склоподібний матеріал; 3 - щільний матеріал; 4 і 5 - видозмінений грунт; г - відстань від осі електродів; Ь - відстань від поверхні грунту

Перші експерименти з використанням рухомого джерела тепла проводилися при швидкостях переміщення від 10 до 35 см/хв. За величиною

загального теплового потоку ці швидкості порівнянні зі статичним прогрівом протягом 20–60 секунд. Кожну з ділянок обробляли двома поздовжніми проходами плазмотрону з поперечним зміщенням на 60, 90 та 120 мм.

У результаті термічної обробки рухомим плазмотроном утворювались рівні майданчики з шарами щільного склоподібного матеріалу. На краях майданчиків спостерігались ділянки обпаленого ґрунту червоного кольору, товщина яких коливалася від 1 до 5 мм, а ширина становила до 70 мм в обидва боки від осі обробки. Поглиблені шари термогрунту мали характеристики, схожі з попередніми дослідженнями.

При проході плазмотрона без перекриття слідів товщина розплаву під центральною частиною електродів була майже в 1,5 рази більша, ніж по краях смуги. При перекритті слідів ця різниця майже зникала. Зі збільшенням швидкості переміщення плазмотрону товщина склоподібного шару зменшувалася, але інтенсивність утворення розплаву збільшувалась у 1,5 рази. Ефективність обробки ґрунту рухомим плазмотроном була вищою, ніж при статичному прогріванні, завдяки значному зниженню енергетичних витрат, оскільки поверхня ґрунту прогрівалась перед подачею плазми.

Температура газів, що виходять на відстані 100 мм від зовнішньої поверхні електрода, досягала близько 1300 К, що пояснює наявність тонкого шару обпаленого ґрунту по краях оброблених ділянок і зменшення кількості газових бульбашок на поверхні розплаву.

Зі зміною кольору ґрунту під розплавом (сірий) і на периферії (червоний) були виявлені відмінності, що пов’язані з різними формами оксиду заліза в змінених ґрунтах. На поверхні залізо було в окисленій формі, а в глибині — в закисній. Це свідчить про різні термічні умови на поверхні і в глибині ґрунту, де в першому випадку середовище є окислювальним, а в другому — відновним.

Отримані позитивні результати при обробці ґрунтів рухомим плазмотроном дозволили продовжити дослідження з одночасною варіацією двох параметрів. Використовуючи методику планування експерименту, вдалося вивчити спільний вплив факторів і розробити математичну модель, що адекватно

описує отримані результати з високою надійністю при мінімальних лабораторних витратах.

Завдання було реалізовано з використанням центрального композиційного плану другого порядку, що є уніформ рототабельним і інваріантним до обертання координат навколо центральної точки. Це забезпечує постійність дисперсії критерію дослідження для всіх точок, що перебувають на однаковій відстані від центра експерименту. Оскільки область можливих варіацій змінних була визначена в попередніх експериментах, попереднє дослідження стаціонарної області не проводилося.

Процес складання матриці планування та перевірки адекватності моделі за допомогою критерію Фішера здійснювався згідно з загальноприйнятими методами. Математична модель, що описує залежність енерговитрат від швидкості переміщення плазмотрона при різній щільності ґрунтової поверхні, представлена у вигляді поліноміального рівняння:

Результати розрахунків підтвердили, що з підвищенням швидкості термообробки збільшується інтенсивність плавлення та зменшуються питомі енергетичні витрати. Найбільший приріст показників спостерігається при швидкості переміщення плазмотрона 60–70 см/хв. Ступінь ущільнення ґрунтів впливає на ефективність процесу лише при низьких швидкостях переміщення плазмотрона (до 40–50 см/хв).

При збільшенні швидкості термообробки з'являються деякі негативні ефекти, зокрема зростає пористість отримуваного матеріалу. В утвореному склоподібному покритті з'являються пори, не заповнені розплавом. При швидкості обробки 140 см/хв площа порівняно з покриттям може досягати 35% для отворів діаметром до 15 мм. Такий ефект також спостерігається при глазуруванні керамічних матеріалів і називається «збіркою». Поява отворів, або кратерів, обумовлена поганим змочуванням основи силікатним розплавом через високий поверхневий натяг.

Щоб усунути ефект «збірки», необхідно підвищити в'язкість розплаву або зменшити поверхневий натяг. Згідно з фізико-хімічними властивостями

силікатних розплавів, підвищення в'язкості часто супроводжується збільшенням поверхневого натягу. Для коригування цих характеристик можна застосовувати спеціальні добавки в ґрунтову суміш та налаштовувати температурні режими нагріву та охолодження розплаву, що дозволяє зменшити або повністю усунути явище «збірки».

Підвищення ефективності термічного впливу може бути досягнуто чотирма основними шляхами: збільшенням температури теплоносія, підвищенням питомої поверхні теплопередачі, зміною теплофізичних характеристик матеріалу або зменшенням теплових втрат. У ході експериментів були застосовані всі ці методи.

Підвищення питомої поверхні теплопередачі від плазмового генератора до ґрунтового масиву досягалося завдяки модифікації поверхні ґрунту, зокрема через створення спеціальних прорізів чи отворів, таких як гребінки або мікрошпури. В ході експериментів, при візуальному спостереженні через захисні екрани, спостерігалося плавлення зубів гребінок і стекання розплавленого матеріалу в порожнини. Зуби дрібної гребінки плавилися протягом 6-8 секунд, а глибокої — за 8-10 секунд. Після цього поверхня розплаву вирівнювалась, а отвори мікрошпурів заповнювались розплавом за 4-5 секунд.

Візуальні спостереження та подальші розрахунки показали, що оплавлення поверхонь з модифікацією краще здійснювати при вищих швидкостях, до 50 см/хв. Це пов'язано з тим, що постійне стікання розплавленого матеріалу з зубів гребінок в порожнини покращує умови теплопередачі та інтенсифікує плавлення ґрунту. Дослідження експериментальних майданчиків з модифікованою поверхнею показали, що дрібна гребінка забезпечує повне проплавлення поверхні на всіх швидкостях переміщення плазмотрона. Товщина шару щільного склоподібного матеріалу змінюється в межах 6-8 мм, а прошарки видозміненого ґрунту не перевищують 2 мм. У випадку з глибокою гребінкою, поверхня проплавляється майже повністю, хоча іноді спостерігаються невеликі порожнини висотою 2-4 мм, які не заповнені розплавом. Товщина шару щільного матеріалу може досягати 10 мм. Мікрошпури покриваються шаром матеріалу

товщиною 7-8 мм, в той час як на глибині до 4 мм зберігається видозмінений ґрунт. Розплав проникає в мікрошпури на глибину 6-8 мм, нижче утворюються порожнини глибиною 10-12 мм.

Розрахунки показали, що інтенсивність утворення розплаву на поверхні ґрунту з дрібною гребінкою та мікрошпурами подібна (180-190 см³/хв), а на поверхні з глибокою гребінкою ефективність плавлення вища (215-220 см³/хв). Збільшення питомої поверхні ґрунтової поверхні через модифікацію дозволяє збільшити ефективність плазмової термообробки на 1,2-1,5 рази порівняно з обробкою рівних поверхонь. При цьому існує оптимальне співвідношення між шириною і глибиною порожнин: вузькі глибокі порожнини швидко заповнюються силікатним розплавом. Для кожного температурного та швидкісного режиму існує оптимальне співвідношення між цими параметрами, яке для конкретних умов становить 1/1 до 1/1,2. Оптимальна швидкість для термообробки поверхні з розширеною гребінкою становить 40 см/хв. При цьому порожнини заповнюються щільним матеріалом товщиною 25-35 мм, а покриття на гребінках має товщину 7-8 мм. Інтенсивність утворення розплаву досягає 230-250 см³/хв, що в 1,6 рази більше, ніж при обробці рівних майданчиків.

Проте, термообробка поверхонь з розширеною гребінкою має певні недоліки, зокрема нестабільну роботу плазмотрона. Проведені дослідження показали, що в'язкість силікатних розплавів значною мірою визначає межі технологічних параметрів плазмової термообробки. Як було зазначено в третій главі, навіть при найвищій температурі (2800 K), близькій до температури сублімації силікатної маси, в'язкість цієї маси не знижується нижче 10 Па-с, що в 103 рази більше в'язкості води. Це пояснює, чому зниження в'язкості ґрунтових розплавів тільки через підвищення температури не дає бажаних результатів.

Підвищення ефективності плазмової термообробки ґрунтів, зокрема за рахунок зменшення теплових втрат і одночасного збільшення питомої поверхні теплопередачі, було яскраво продемонстровано в експериментах, що включали заглиблення електродів плазмотрона відносно поверхні ґрунту (рис.3.11). Для цих експериментів були підготовлені траншеї шириною 140 мм і глибиною від

30 до 120 мм. Кожна траншея оброблялася при русі генератора вздовж її довжини. Під час експериментів було відзначено, що потоки плазмоутворюючого газу концентруються уздовж стінок траншеї, спричиняючи плавлення бокових стінок, а розплавлений матеріал стікає вниз. В результаті цього дно траншеї розширюється до 30 мм. Інтенсивність цього процесу зростає зі збільшенням глибини траншеї. Товщина шару склоподібного матеріалу на бокових стінках траншеї становить 4-5 мм, а на стику бічної стінки з дном вона досягає 20 мм. Коли глибина траншеї зменшується до 30 мм, процес плавлення майже не відрізняється від обробки рівної поверхні ґрунту. Розрахунки показали, що інтенсивність утворення розплаву в траншеї в два рази вища, ніж на рівній щільній ґрунтовій поверхні.

Експерименти з подальшим заглибленням електродів продовжилися, і глибина була збільшена до 1,5 м з інтервалом 0,3 м для зміни глибини траншеї. Додаткові дослідження підтвердили високу ефективність плазмової термообробки при заглибленні плазмотрона. Спостерігалося значне підвищення ефективності обробки при збільшенні глибини траншеї до 0,5 м, в той час як подальше збільшення глибини давало менший приріст інтенсивності плавлення ґрунту.

Згідно з теоретичними розрахунками, підвищення вологості ґрунту має призвести до збільшення енергоємності термообробки. Для цього було проведено додаткову серію експериментів, щоб визначити, як вологість ґрунту впливає на ефективність плазмової термообробки. Було підготовлено зразки з різною вологістю — від повітряно-сухого стану до вологості з коефіцієнтом зволоження 1,15. Зразки ґрунту з низьким рівнем вологості спочатку готувалися у вологому стані, потім підсушувалися. За результатами експериментів були побудовані графіки, представлені на рис.3.12. Виявилося, що наявність великої кількості вологи, що має високу теплоємність, зменшує інтенсивність плавлення ґрунту. Найбільш виражено це спостерігається при короткочасному нагріванні, коли через випаровування перегрітої пари зростає пористість склоподібного матеріалу.

У всіх попередніх експериментах використовувався ущільнений ґрунт (Ку > 0,90). Аналіз результатів показав, що навіть при високих температурах плазмової обробки традиційні технологічні методи не дозволяють суттєво підвищити ефективність термообробки поверхонь через низьку теплопровідність і високу теплоємність вологого ґрунту.

У серії наступних експериментів було поставлено завдання оцінити ефективність термообробки пухких насипних ґрунтів. Для цього шари пухкого ґрунту товщиною від 20 до 75 мм були рівномірно насипані на землю та на попередньо оплавлені ділянки. Термообробка проводилася плазмотроном, що рухався з заданими швидкостями.

При спостереженні за процесом термообробки спостерігалося явище, подібне плавленню воску. Спочатку плавилися частини ґрунту, що виступали над поверхнею шару. Через кілька секунд з’являлися осередки плавлення. Через 4-5 секунд після початку нагріву силікатний розплав заповнював всю площу під електродами. Через 8-10 секунд розплав починав кипіти і розтікатися, заповнюючи низини. Пухкий ґрунт осідав під електродами на 5-10 мм.

При огляді експериментальних майданчиків було встановлено, що за один прохід плазмотрона повністю плавиться шар пухкого ґрунту товщиною 20-30 мм. Формується склоподібний матеріал товщиною 10-15 мм, що лежить на тонких прошарках видозміненого ґрунту. Ґрунт, що знаходиться нижче, не зазнає суттєвих змін.

Після охолодження першого шару на нього знову насипався шар пухкого ґрунту, і обробка повторювалася. При обстеженні багатошарових майданчиків виявилося, що шари пухкого ґрунту товщиною до 20 мм плавляться повністю, і між шарами не видно явної межі. Коли товщина шару пухкого ґрунту досягала 20-25 мм, між шарами склоподібного матеріалу утворювався прошарок шлакового скла товщиною 1-2 мм. Якщо товщина шару перевищувала 25 мм, то окрім прошарку зі шлакового скла з’являлася і видозмінена структура ґрунту товщиною від 1 до 4 мм. Таким чином, конструкція не є монолітним шаром склоподібного матеріалу, що знижує її міцність. Слід зазначити, що ці товщини

були отримані за певних технологічних параметрів (P = 60 кВт, V = 36 см/хв). Зміна цих параметрів може змінити товщину як пухкого шару ґрунту, так і утвореного склоподібного матеріалу.

При термообробці пухких шарів ґрунту на вже оплавлених підставах склоподібний матеріал зазвичай має щільну структуру. При цьому під час обробки тонких пухких шарів, плазмотрон встигає вивести основну кількість газів, що виділяються з ґрунту, під час формування розплаву.

Розрахунки показали, що інтенсивність утворення розплаву на пухких насипних шарах ґрунту на 30-35% вища, ніж при термообробці щільних рівних ґрунтових майданчиків. У цьому випадку міцність склоподібного матеріалу, як правило, значно вища.

Одним із способів підвищення ефективності термообробки ґрунтів є зменшення теплових втрат. Метод поетапного нарощування шарів, що показав свою ефективність у попередніх експериментах, може бути доповнений подачею пухкого ґрунту на вже розплавлений нижній шар. Цей технологічний підхід дозволяє зменшити теплові втрати завдяки передачі частини тепла, акумульованого в розплаві, на верхній шар ґрунту перед його термічною обробкою. Окрім того, цей підхід сприяє покращенню температурних умов для формування нижнього шару, уповільнюючи його охолодження.

Для підтвердження викладених раніше теоретичних припущень була проведена серія експериментів, що стосуються термообробки пухкого ґрунту, який подавався на гарячий розплав. На першому етапі термообробка здійснювалась статичним випалюванням. Плазмотрон піднімався на 20 мм перед подачею кожної нової порції ґрунту, зберігаючи необхідний зазор між електродами та поверхнею. Ґрунт, що подавався на розплав, мав різну вологість – від гігроскопічної до оптимальної.

Після огляду оброблених майданчиків було встановлено, що всі шари пухкого ґрунту проплавлені повністю. Відмінність у інтенсивності плавлення для вологого та сухого ґрунту складала до 20%. За результатами розрахунків,

метод пошарового наплавлення з подачею пухкого ґрунту на рідкий розплав є ефективнішим за одношарове плавлення щільних ґрунтів у 1,8-1,9 рази.

Для подальших експериментів було виготовлено спеціальний дозатор, через який ґрунт товщиною 20 мм подавався на розплав із температурою близько 2200 К. Плазмотрон рухався зі швидкістю від 20 до 80 см/хв. Швидкість руху є непрямим показником ефективності, оскільки існує оптимальний часовий інтервал, в межах якого ґрунт, що лежить на розплаві, накопичує максимальну кількість теплової енергії. Якщо швидкість перевищує цей інтервал, ґрунт може не встигнути достатньо прогрітися або вже почне остигати. Таким чином, оптимальна швидкість термообробки залежить від різноманітних факторів: типу та потужності генератора, виду ґрунту, його вологості, довжини оброблюваної смуги та температури навколишнього середовища.

Результати експериментів підтвердили, що метод пошарового наплавлення з подачею ґрунту на рідкий розплав дозволяє отримати монолітні шари та конструкції заданої товщини та форми з максимальною ефективністю.

Особливістю плазмотрона МПГ є його енергетичні характеристики, що залежать від відстані між оброблюваною поверхнею та електродами. При збільшенні цієї відстані плазмотрон працює нестабільно, а його параметри виходять за межі нормального режиму. Коли зазор між електродами збільшується з 10 до 40 мм, товщина шару термогрунта зменшується, а ефективність обробки знижується на 25-30%. Отже, підтримання мінімального постійного зазору є важливим не лише для стабільної роботи плазмотрона, але й для підвищення ефективності процесу плавлення ґрунту.

Теоретичні засади, викладені в попередніх розділах, а також практичні результати термообробки ґрунтів свідчать про покращення ефективності термічного впливу при збільшенні вмісту глинисто-колоїдної фракції в ґрунті. Як основний показник рівня вмісту глинистої фракції було вибрано число пластичності. Зменшення числа пластичності вихідного ґрунту (важкий суглинок) досягалося шляхом додавання піску. Обробка експериментальних

даних дозволила визначити кореляційну залежність між числом пластичності та інтенсивністю плавлення ґрунту: g = 64,01 е.

Проте розрахунки за наведеною формулою для прогнозування результатів термообробки різних видів ґрунтів показали, що використання встановленої кореляційної залежності не завжди дає точні результати. Фактична інтенсивність плавлення іноді значно відрізняється від розрахункової величини (рис. 3.16, на графіку представлена крива, отримана згідно з цією кореляційною залежністю). Область можливих значень фактичної інтенсивності плавлення, позначена на графіку, була отримана експериментально при термообробці двадцяти різних видів ґрунтів з різним хіміко-мінералогічним складом.

Аналіз графічних залежностей показує, що загальна тенденція до підвищення інтенсивності плавлення з ростом числа пластичності справедлива для всіх ґрунтів. Однак розрахунки інтенсивності плавлення, що спираються лише на число пластичності, потребують додаткових уточнень.

Як зазначалося в третьому розділі роботи, спроби врахувати всі особливості різних типів ґрунтів для прогнозування їх схильності до плавлення за допомогою одного універсального показника не дали позитивних результатів. Тому для продовження досліджень ми обрали метод безпосереднього вимірювання температури плавлення ґрунтів. Як вже було зазначено раніше, ґрунт, будучи полімінеральною композицією, не має чітко визначеної температури плавлення. Однак цю величину можна умовно визначити за встановленими методиками в нормативних документах.

Результати обробки експериментальних даних дозволили встановити кореляційну залежність між температурою плавлення і інтенсивністю плавлення ґрунтів з різним хіміко-мінералогічним складом. Тісний зв'язок між цими показниками та низьке середнє квадратичне відхилення вказують на те, що обраний параметр враховує вплив основних супутніх факторів і дозволяє адекватно прогнозувати ефективність термообробки ґрунтів різного складу. Агрегатний склад ґрунту коригувався шляхом відділення фракцій більше ніж 20, 10, 5, 1,25 і 0,63 мм.

Експериментальні дані показали, що з видаленням більших фракцій інтенсивність плавлення збільшується до 20%. Це можна пояснити порівнянням інтенсивності плавлення з щільністю та пористістю ґрунтових. Збільшення пористості сприяє посиленню конвективного теплообміну між плазмою та ґрунтовими агрегатами, що також збільшує їх питому поверхню. Ця закономірність має важливе значення при короткочасному впливі плазми, поки ґрунт повністю не переходить в розплав, який перекриває основні конвективні теплові потоки. Однак при збільшенні тривалості термообробки вплив агрегатного складу на інтенсивність плавлення зменшується.

Ці закономірності не спостерігаються при обробці найменших фракцій ґрунтової суміші, оскільки в фракціях менш ніж 0,63 мм зосереджена більша частина легкоплавкої глинистої складової, що проявляється у підвищеному числі пластичності для найбільш дрібних часток ґрунту.

Під час проведення експериментів з термообробки ґрунтів та пісків також були використані щебеневі матеріали. Для плазмової термообробки застосовувалися два типи щебеню: гранітний і вапняковий. Підлягали оплавленню не тільки вихідні матеріали, але й окремі фракції щебеню, такі як залишки на ситі 20 мм, фракції 10-20 мм, 5-10 мм, а також відсів. Для деяких ділянок з щебеневим матеріалом використовувався шар пухкого ґрунту товщиною від 10 до 30 мм, що покривав їх зверху.

Оцінюючи результати плазмової термообробки щебеневих матеріалів, необхідно відзначити, що внаслідок різкого нагріву (термічного удару) частина крупних щебенів, більше 15 мм, руйнується. Вапняковий щебінь піддається термічному розкладу, в результаті якого утворюється перепалене вапно, що оскловується. Загалом, ефективність термообробки щебеневих матеріалів є нижчою порівняно з термообробкою зв'язкових ґрунтів. Однак обробка дрібних фракцій щебеню виявилася ефективною і може конкурувати з термообробкою пісків. Плавлення ґрунтових шарів, які лежать на щебеневих підставах, дає позитивні результати, якщо товщина шару ґрунту не перевищує 10 мм.

Під час подальших експериментів був змінений підхід до ролі щебеню в термічній обробці ґрунтів. Щебінь фракції 5-10 мм подавали на рідкий ґрунтовий розплав і втаплювали за допомогою металевого вальця. Експерименти з вапняковим щебенем не дали позитивних результатів. Натомість щебінь з кислих порід успішно утримується в охолодженому ґрунтовому розплаві. Метод втаплювання щебеню може бути використаний як один із способів застосування плавлених ґрунтів у верхніх шарах дорожніх покриттів або для з'єднання термогрунтових підстав з покриттями.

Негативні результати обробки вапняковим щебенем стали основою для серії експериментів, в яких проводився плазмовий нагрів глинистих ґрунтів з добавками меленого або дробленого вапняку (від 5 до 30% маси). Випробувані зразки перевіряли після кип'ятіння та тривалого зберігання у воді. При повному проплавленні ґрунтових сумішей не спостерігалося негативних ефектів від карбонатних порід. Проте при частковому оплавленні сумішей, що містять більше 15% карбонатних порід, виявлялися тріщини та руйнування зразків після кип'ятіння.

Загалом, на основі отриманих результатів можна зробити кілька висновків. Найбільш ефективною є термообробка тонких шарів пухких ґрунтів рухомим плазмотроном. Статичний прогрів ґрунтових поверхонь є неефективним. Загальну товщину термообробленого шару доцільно збільшувати за допомогою пошарового наплавлення, де ґрунт подається на гарячий рідкий розплав спеціальним дозатором. Оптимальна товщина шарів і швидкість руху плазмотрона залежить від виду оброблюваних ґрунтів, щільності теплового потоку та інших факторів. Для термообробки щільних шарів ґрунтів значний ефект дає модифікація поверхні. Для плазмової термообробки до стадії плавлення можна використовувати різноманітні ґрунти з різним хіміко-мінералогічним складом — від пісків до важких глин (за винятком карбонатних порід). Найбільш підходящими для плазмової термообробки є зв'язкові ґрунти з низькою вологістю та легкоплавкою глинисто-колоїдною частиною.

Параметри роботи генератора низькотемпературної плазми значно впливають на енергетичні характеристики плазмотрона. Блоки живлення плазмотрона МПГ дозволяють безступінчате регулювання сили струму в межах від 600 до 2000 А. Другим важливим параметром є витрата плазмоутворюючого газу, який впливає на вольт-амперні характеристики (ВАХ) та робочу напругу. Енергетична потужність плазмотрона визначається як похідна від сили струму та робочої напруги.

Експериментальні дослідження проводились за допомогою методики планування експерименту, застосовуючи центральний композиційний уніформ-rotatabable план другого порядку. Варіація факторів та рівнів їх зміни в умовному та натуральному масштабах представлена в таблиці.

Одним із основних параметрів, що визначають енергетичні характеристики плазмотрона, є сила струму. Зі збільшенням сили струму зростає потужність плазмового генератора, змінюється його тепловий коефіцієнт корисної дії. Встановлено, що інтенсивність плавлення ґрунтів прямо залежить від сили струму: збільшення цієї величини в 1,8 рази призводить до підвищення інтенсивності плавлення на 1,6-1,9 разів.

Ще одним важливим параметром є витрата плазмоутворюючого газу. Зі збільшенням витрати цього газу зростають робоча напруга та тепловий коефіцієнт корисної дії плазмотрона. Приріст витрати газу з 2 до 9 м³/год підвищує робоче напруження в 1,4 рази та інтенсивність плавлення ґрунтів на 30-35%. Це покращує умови роботи електродів завдяки їх додатковому охолодженню. Проте, при перевищенні витрат газу понад певні межі (12-15 м³/год), стабільність роботи плазмотрона порушується, особливо при малих струмах, що погіршує результати термічного впливу на ґрунт.

Однією з особливостей плазмотрона МПГ є дозвуковий режим завершення плазмового струменя. Невелика швидкість витікання плазмообразуючого газу при значній витраті забезпечується великою площею перерізу сопла плазмотрона. В порівнянні з струменевими плазмотронами, які генерують

сильне звукове навантаження (до 100-120 дБ), рівень звуку в роботі плазмотрона МПГ варіюється від 60 до 80 дБ.

Комплексний вплив технологічних факторів, таких як енергетична потужність плазмотрона, швидкість його руху, вид оброблюваного ґрунту (температура плавлення) та вологість, був оцінений через математичне планування експерименту та статистичну обробку отриманих даних. Програма чотирьохфакторного експерименту описана в таблиці. Варіаційні рівні факторів були обрані з урахуванням результатів попередніх однофакторних досліджень.

Реалізація повної матриці чотирьохфакторного експерименту та обробка даних дозволили створити математичну модель у вигляді полінома другого ступеня. Максимальна інтенсивність плавлення досягалася при обробці легкоплавких ґрунтів з вологістю менше 6-8%. Найбільш ефективною є термообробка з максимальною потужністю плазмотрона, що рухається з швидкістю 40-80 см/хв.

Аналіз результатів дозволяє визначити найбільш ефективні методи та стратегії плазмової термообробки ґрунтів. Менш ефективним є тривалий статичний прогрів щільних вологих ґрунтових поверхонь, що має низьку продуктивність і високі енергетичні витрати. У той час, як термообробка поверхонь рухомим плазмотроном значно підвищує ефективність процесу. Найкращі результати досягаються при пошаровій обробці рухомим плазмотроном легкоплавких глинистих ґрунтів, які подаються на високотемпературний розплав нижчого шару.

При необхідності обробки щільних ґрунтових поверхонь результат може бути поліпшений за рахунок збільшення площі теплопередачі, застосовуючи спеціальні прорізи на оброблюваній поверхні. Збільшення інтенсивності плавлення всіх типів ґрунтів спостерігається при зануренні електродів плазмотрона нижче рівня земної поверхні.

Глибинне укріплення ґрунтів є важливою технологією, і дослідження, проведені в галузі термічного зміцнення, показали, що загальні закономірності,

що діють на поверхневі шари ґрунту, зберігаються й для глибинної обробки, хоча конкретні значення параметрів можуть суттєво відрізнятися.

Для глибинної термообробки застосовувався занурювальний плазмотрон МПГ-П, а свердловини для дослідів мали діаметри від 18 до 24 см і глибину від 0,5 до 2 м. Випробування проводились у лабораторії, де свердловини формувались за допомогою ущільнення ґрунтів в опалубках, виготовлених з металевих кілець. Для експериментів використовувались три типи ґрунтів: легкий і важкий суглинок, а також пилуваті глини. Після підготовки свердловини плазмотрон опускався до дна на відстань 0,5-1 см, і починав термічну обробку.

Протягом перших хвилин роботи пристрою з свердловини виділяється водяна пара, а тривалість цього процесу залежить від глибини свердловини та вологості ґрунтів. Через 4-11 хвилин роботи плазмотрона виділення пари зменшується, параметри плазмотрону стабілізуються, і можна перейти до встановлення необхідних режимів роботи. Потужність плазмотрона варіювалася від 60 до 170 кВт, струм становив від 800 до 1800 А, а витрати плазмоутворюючого газу коливалися від 1 до 9,5 м³/год.

Мала зона впливу реактора сприяє швидкому нагріванню навколишнього ґрунту. Під час прогріву спостерігається плавлення ґрунту на стінках свердловини в області, де розташовані електроди плазмотрона. Розплав стікає на дно свердловини, збільшуючи її діаметр в залежності від часу термічного впливу. Цей метод може бути використаний для розширення палі.

Згідно з результатами двофакторного експерименту, було отримано кореляційне рівняння для визначення збільшення діаметра свердловини в залежності від часу термічного впливу, що дозволяє точніше прогнозувати результат процесу.

Зниження вологості ґрунтів з 26% до 18% призводить до підвищення інтенсивності утворення розширення на 12-18%. Також, збільшення потужності плазмотрона з 60 до 170 кВт значно прискорює плавлення ґрунту на стінках свердловини, зменшуючи час, необхідний для утворення розширення, та збільшуючи діаметр свердловини на 12-14 см.

Ці результати є характерними для початкової стадії глибинної термообробки ґрунтів. Зі збільшенням часу роботи плазмотрона та заповненням свердловини розплавом, температура навколишнього ґрунту зростає, і максимально досяжний діаметр розширення може досягати 2,5-3 початкових діаметрів свердловини при заповненні її розплавом на висоту 1 м.

Під час охолодження розплаву значна частина теплової енергії передається в навколишній ґрунт, що призводить до його прогрівання до четвертої стадії термічної модифікації. В результаті цього діаметр термогрунтової палі збільшується на величину, приблизно рівну діаметру охолодженого силікатного розплаву, і як палі, так і навколишній ґрунт поступово охолоджуються протягом кількох діб.

Як вже зазначалося, між швидкістю підйому плазмотрона (темпом подачі ґрунту до свердловини) та фізико-механічними властивостями отриманого термогрунту існує певна залежність. Коли швидкість підйому збільшується, ґрунт, що подається через дозатор і переходить в розплав, не встигає пройти процес дегазації (див. п. 3.3). Як результат, термогрунтове тіло палі набуває високої пористості та зниженої щільності.

Якщо ж зменшити швидкість підйому плазмотрону, це може призвести до перегріву та неповної дегазації розплаву, що спричиняє значне збільшення його щільності. Зміна пористості термогрунта безпосередньо впливає на його міцність. Встановлено, що існує експоненціальна залежність між пористістю та міцністю плавленого ґрунту (див. п. 3.4). Завдяки змінам у пористості, міцність матеріалу може варіюватися в кілька разів.

Міцність термогрунту, що варіюється в межах від 100 до 160 МПа і більше, досягається при низькій пористості, що може бути доцільно для паль, що спираються на нестискувані основи (так звані палі-стійки). Водночас для виготовлення висячих паль міцність може бути значно нижчою, що підтверджується розрахунками за критеріями першої групи (за міцністю матеріалу). Крім того, технологія виготовлення термогрунтових паль за допомогою плазмового процесу дозволяє без значних труднощів регулювати

міцність на різних ділянках конструкції. Висока міцність цементобетону і спеціальне армування забивних паль пояснюються потребою в їх транспортуванні, монтажу і забиванні. Водночас термогрунтові палі формуються безпосередньо на будівельному майданчику і не піддаються вищезгаданим обмеженням.

Використання поризованого термогрунта для виготовлення паль значно підвищує ефективність технологічного процесу та знижує питомі енергетичні витрати на термообробку ґрунту. На основі аналітичних розрахунків і експериментальних перевірок була розроблена номограма для визначення технологічних параметрів плазмового процесу виготовлення термогрунтових паль.

Ключовим параметром для оптимізації цього технологічного процесу є визначення оптимальної інтенсивності подачі ґрунту та швидкості підйому плазмотрону. Ці два взаємопов'язані фактори в кінцевому підсумку визначають продуктивність і ефективність процесу, а також фізико-механічні властивості матеріалу, з якого формується термогрунтове тіло.

3.3 Встановлення оптимальних режимів експлуатації плазмотрона та підвищення його надійності

Ефективність процесу плазмової термообробки ґрунтів значною мірою залежить від оптимізації конструкції обладнання та організації раціональних умов роботи плазмотрона. Водночас ці фактори визначають довговічність і надійність генератора плазми. Наразі не існує єдиної методики розрахунку оптимальних режимів роботи плазмотронів. Однак, на основі аналізу рівнянь, що описують фізичні процеси в дугових розрядах, а також використовуючи теорію подібності, була розроблена система критеріїв, яка дозволяє визначати основні

закономірності зміни параметрів та прогнозувати ефективні режими роботи генератора плазми відповідно до вимог технологічного процесу.

Однією з ключових характеристик плазмотронів є вольтамперна характеристика (ВАХ), яка відображає залежність напруги від сили струму за певних конструктивних і режимних параметрів. Для визначення цієї залежності зазвичай використовують емпіричне співвідношення з узагальненими змінними (критеріями). Метод узагальнених характеристик є ефективним для оцінки впливу основних параметрів роботи плазмотрона на показники плазмово-дугового нагріву матеріалів. У графічних залежностях, побудованих за допомогою цих рівнянь, можна побачити, що, змінюючи струм, довжину дуги, витрату плазмообразуючого газу та геометрію електродного вузла, можна впливати на температуру, щільність теплового потоку, тепловий ККД процесу і інші важливі характеристики, що визначають ефективність плазмової термообробки.

Генератор низькотемпературної плазми коаксіальної схеми має особливості, що не притаманні генераторам лінійної схеми. Результати досліджень цього типу генераторів дозволяють детальніше зрозуміти принципи управління параметрами плазми та вдосконалити конструкцію деяких вузлів таких генераторів.

Ресурс роботи електродугового генератора плазми в основному залежить від умов експлуатації та стійкості електродного вузла. Вибір графіту як матеріалу для виготовлення електродів плазмотрона обумовлений його високою температурною стійкістю. Хоча графіт при нормальних температурах менш міцний, ніж метали, з підвищенням температури до 2000...2100 К він демонструє кращі механічні властивості, ніж окисли й метали. Графіт є унікальним матеріалом, чия міцність лінійно зростає при підвищенні температури (від 300 до 3000 К), що робить його ідеальним для використання в плазмотроні.

При атмосферному тиску графіт залишається твердим матеріалом, який плавиться при температурі 3870 К. За деякими своїми характеристиками графіт нагадує як метали, так і кераміку. Як метал, він має високу теплопровідність та

електропровідність, а також може бути підданий механічній обробці. Як кераміка, він має пористість і низький коефіцієнт термічного розширення.

Графіт відрізняється анізотропними властивостями, що значно впливає на його поведінку. Коефіцієнт термічного розширення цього матеріалу залежить від орієнтації площини вимірювання та температури. При підвищенні температури від 300 до 3000 К цей коефіцієнт збільшується незначно — від $3{,}5\times10^{-6}$ до $6{,}5\times10^{-6}$ °C^{-1}. Зі зростанням температури від кімнатної до 3000 К графіт розширюється на близько 1%. Питомий електричний опір графіту, що застосовується в нагрівачах, коливається від 8 до 20 Ом·мм²/м, залежно від напрямку вимірювання та температури. Теплопровідність графіту зменшується з підвищенням температури до 3000 К в 2-2,5 рази і досягає значень від 35 до 45 Вт/(м·К). Теплоємність графіту невелика і слабко залежить від зовнішніх умов, змінюючись із 1,44 до 1,61 кДж/(кг·К) при температурі від 1200 до 3000 К.

Щільність графіту в заготовках, що використовуються для виготовлення електродів, варіюється від 1,62 до 1,80 г/см³, а пористість становить від 20 до 25%. Напруга запалювання газового розряду між графітовими електродами залежить від відстані між ними, тиску газу в зоні розряду і температури електродів. При температурі понад 1700 К розряд може відбутися за рахунок пробою між електродами при напрузі менше 100 В. Коефіцієнт випромінювання нагрітих графітових електродів змінюється від 0,85 до 0,9 і слабо залежить від температури.

При нагріванні понад 700 К графіт починає окислюватися при взаємодії з компонентами повітря, виділяючи CO, CO_2, CH_4, C_2H_2. Швидкість випаровування графіту залежить від температури та тиску насиченої пари. Тиск змінюється від 4×10^{-27} МПа при 1000 К до $1{,}6\times10^{-1}$ МПа при 2800 К.

Домішки в графіт можуть змінювати його стійкість до окислення: фосфор, кремній, бор, титан і вольфрам знижують окислення, а залізо, мідь, нікель і марганець — прискорюють його. Лужні метали збільшують хемосорбцію кисню в графіті і прискорюють його окислення.

Отже, графіт є стійким до термічних ударів та агресивного хімічного впливу, доступним і економічно вигідним матеріалом, що робить його рекомендованим для використання в електротермічних установках, де наявність вуглецю в реакторі є допустимим.

Під час термообробки ґрунтів у свердловині утворюється напівзакритий реактор з екстремальними температурними умовами, що призводить до інтенсивного зношення електродів. Одним з найбільш ефективних способів збільшення тривалості роботи електродів є їх активне охолодження. Експериментальні дослідження показують, що зменшення тиску охолоджувальної води нижче 0,25 МПа та підвищення її температури понад 340-350 К є непридатними. Інтенсивне охолодження збільшує термін служби електродів, але призводить до підвищення теплових втрат, пов'язаних із нагріванням охолоджуючої рідини. Висока температура електродів у термоемісійних режимах є необхідною умовою для стабільної роботи дугового розряду.

Правильний вибір параметрів роботи електродного вузла дозволяє знайти оптимальний баланс між максимально допустимими струмовими навантаженнями і рівнем ерозії, що супроводжує функціонування електродів у дугових плазмотронних установках. Спеціальні дослідження показали, що внутрішній електрод працює в найжорсткіших температурних умовах. Визначення температури проводилось за допомогою термопари, розташованої в осьовому каналі, та пірометра. Використання світлофільтра з ефективною довжиною хвилі 0,65 мкм дозволило усунути вплив випромінювання плазми, оскільки при більшій довжині хвилі це випромінювання є незначним.

Температурний режим електродів стабілізується після 1-2 хвилин роботи плазмотрона. Торцева частина електрода досягає температури 3000-3200 К, а температура інших частин електрода перевищує 2000 К. Температура зовнішнього електрода (втулки) змінюється за аналогічними законами, але нагрів на 500-600 К менший. При збільшенні діаметра внутрішнього електрода в 1,5 рази його температура знижується на 15-20%.

Завдяки охолодженню водою холодна частина електрода зберігає температуру в межах 400-600 К. Підвищена теплопровідність холодної частини сприяє охолодженню електрода, а менше електричне опір знижує теплове виділення. Важливо зазначити, що низький коефіцієнт термічного розширення графіту дозволяє виготовляти електроди великої довжини без ризику виникнення тріщин при різких температурних контрастах.

Рівень ерозії електродів безпосередньо залежить від інтенсивності теплового потоку. Швидкість зносу електродів визначається властивостями матеріалу, розмірами та геометрією електродів, типом плазмоутворюючих газів, тиском, температурою, струмом і іншими чинниками. Використання повітря як газу має значний вплив на ерозію через окислювальну дію кисню повітря.

Експериментальні дослідження показують, що збільшення довжини електродів призводить до підвищення температури гарячої частини і посилення термічного зносу. При довжині електрода понад 250 мм інтенсивність ерозії стабілізується. Використання електродів з діаметром менше 45-50 мм не рекомендується, оскільки їх термічний знос значно зростає, особливо при струмових навантаженнях більше 1200-1300 А. Тому плазмотрони з потужністю понад 100 кВт повинні мати електроди більших розмірів.

Мінімальна ерозія електродів досягається, коли внутрішній електрод знаходиться на рівні зовнішнього. Заглиблення внутрішнього електрода на 5 мм за рівень зовнішнього не має суттєвого впливу на знос. При більших заглибленнях покращується стабільність роботи плазмотрона, але також збільшується ерозія. Окислення електродів, яке викликається плазмоутворюючим газом (повітрям), найбільш виражене на їх бічній поверхні, але цей вид ерозії значно менш інтенсивний, ніж термічний.

Зменшення довжини електродів до менш ніж 80 мм не рекомендується, оскільки це може призвести до перегріву охолоджувальної води в плазмотроні.

Якщо довжина електрода перевищує 350-400 мм, існує ризик його поломки при необережному використанні.

Деякі домішки можуть значно покращити стійкість графітових електродів. Так, сіліцірування дешевих марок графіту дозволяє збільшити їх стійкість в 1,5-2 рази, при цьому вартість зростає на 15-18%. У наших дослідженнях були використані електроди марки СГ-М, які випускаються Челябінським електродним заводом. Найкращу стійкість продемонстрували електроди з боро-силіцірованого графіту марок БСГ-30 та БСГ-60. Графіт марки СГ-Т, хоча й має високу стійкість до термічної та хімічної ерозії, не був рекомендований для виготовлення електродів через низьку стійкість до термічних ударів, що призводить до їх руйнування вже на перших хвилинах роботи.

Конструкція і характеристики графітових електродів розраховуються залежно від передбачуваної потужності і умов роботи плазмотрона. Для даного технологічного процесу оптимальними є електроди довжиною 250-300 мм з діаметром внутрішнього електрода 60-70 мм та зовнішнього 120-130 мм.

Плазмова установка для зміцнення поверхні ґрунтів може ефективно працювати з електродами з сіліцірованого графіту марки СГ-М. Для глибинної термообробки ґрунтів використовуються більш стійкі електроди з боро-силіцірованого графіту марки БСГ-30. Електроди з більш дорогого графіту марки БСГ-60 мають ресурс роботи на 10-15% вищий, однак їх використання є економічно невигідним через високу ціну.

Під час експериментальних досліджень були визначені й інші важливі параметри електродного вузла. Зазор між електродами в плазмотроні для поверхневого зміцнення повинен бути 5-6 мм. Висока температура в свердловині під час глибинної термообробки дозволяє збільшити зазор до 7-8 мм, що сприяє підвищенню робочої напруги та поліпшенню вольтамперних характеристик процесу.

Заміна електродів у плазмотроні проводиться швидко, за 5 хвилин, через загвинчування їх у водоохолоджувані державки. Жорсткі температурні умови вимагали модернізації цього вузла: було змінено матеріал для виготовлення

державок з удосконаленим нарізним з'єднанням, а також покращено тепловідведення до охолоджуючої рідини. Контактна пара (графіт-метал) покрита тонким шаром електролітичної міді. Завдяки цим вдосконаленням, плазмові установки тепер можуть працювати надійно, а заміна електродів здійснюється лише один раз за зміну.

Варіант запуску плазмотрона через короткочасне з'єднання електродів трохи ускладнює конструкцію кріплення внутрішнього електрода, але не вимагає змін в джерелах живлення для захисту від високовольтного осцилляторного розряду. Такий спосіб запуску виправданий тим, що графітові електроди стабільно працюють у термоемісійного режимі лише при достатньо високих температурах. Масивні електроди з великою теплоємністю потребують значної потужності допоміжних джерел для надійного запуску дугового розряду.

У дослідженнях Н.В. Пашацкого виведена узагальнена вольтамперна характеристика для плазмотрона цієї конструкції. Вона застосовна при витраті повітря в межах 0,4–0,7 кг/с, діаметрі внутрішнього електрода 5–7 мм, швидкості переміщення 0–0,8, та міжелектродному зазорі 4–7 мм. У загальних залежностях враховуються критерії, що описують зміни теплових втрат залежно від відстані та руху плазмотрона.

Аналізуючи отриману залежність, можна зробити висновок, що статична вольтамперна характеристика (ВАХ) плазмотрона з гарячими електродами змінюється залежно від витрати плазмообразуючого газу. При зростанні витрати, криві ВАХ зміщуються вгору через зниження температури та збільшення опору дугового розряду.

Другим способом підвищення стабільності роботи плазмотрона є збільшення термоелектронної емісії графіту завдяки додаванню спеціальних добавок. У наших дослідженнях використовувалося вакуумне насичення пор електродів солями барію і цезію. Результати експериментів показали, що навіть при мінімальних витратах солей покращується стабільність роботи генератора.

Третій підхід до стабілізації полягає в застосуванні іонізуючих добавок, таких як пари калію або натрію, які подаються разом із плазмообразуючим газом.

Цей метод є ефективним, але він ускладнює конструкцію технологічного обладнання. Подача малих доз іонізуючих парів у специфічних умовах будівельного майданчика може бути проблемною. Крім того, присутність парів лужних металів знижує стійкість графітових електродів до окислення.

Подача вуглеводневих палив разом із плазмообразуючим газом перетворює електродуговий плазмотрон в топлівноплазменний пальник. Це дозволяє підвищити стабільність роботи плазмотрона та зменшити ерозію графітових електродів в відновлювальній атмосфері, де утворюється піроуглерод. Цей метод стабілізації є перспективним, але потребує подальших досліджень.

Іншим шляхом поліпшення умов роботи дугового розряду є використання спеціальних сумішей ґрунтів з активуючими добавками. Високотемпературний вплив на ці суміші спричиняє сублімацію парів іонізуючих добавок, що підвищує електропровідність плазми в розрядному просторі між електродами та плавленою поверхнею.

Енергозабезпечення плазмотрона може здійснюватися від джерел постійного або змінного струму. Стійка робота системи джерело струму - плазмотрон можлива при виконанні важливої умови: співвідношення напруги та струму в дуговому розряді повинно відповідати вихідним параметрам джерела живлення.

Використання джерел постійного чи змінного струму має свої переваги і недоліки. У даному випадку для енергоживлення плазмотрона застосовуються серійні зварювальні трансформатори, які забезпечують роботу на змінному струмі. Кожен півперіод струму триває 0,01 с (при частоті 50 Гц), протягом якого напрямок струму та полярність напруги змінюються. При цьому катод і анод змінюються місцями, а дуга знову ініціюється кожен півперіод. Під дією динамічного напору плазмообразуючого газу (повітря) дуга виштовхується з міжелектродного зазору, нагріває матеріал і горить на торцях електродів.

Отже, торці електрода та плавлена поверхня формують розрядну камеру, в якій протікають складні електродинамічні та теплові процеси. Повторний запуск

дуг полегшується завдяки залишковій термоелектронній емісії електродів, а також залишковій іонізації дугового проміжку, насиченого продуктами сублімації з розплавленої поверхні.

Розрахунки свідчать, що джерело живлення плазмотрона повинно забезпечувати подачу напруги холостого ходу не менше 130 В. Якщо це значення не досягається, процес ініціювання дугового розряду стає ускладненим при холодних електродах. Робоча напруга може варіюватися від 60 до 110 В. При цьому сила струму, достатня для компенсації теплових втрат та підтримки стабільної генерації плазми, повинна бути в межах 600-800 А. Якщо використовуються джерела постійного струму, мінімальний струм, необхідний для стабільної роботи генератора, може бути знижений.

Теоретичні та експериментальні результати, наведені в цьому розділі, підтверджують, що, хоча розробка вузлів плазмотрона є складною, вона є необхідною для оптимізації режимів роботи плазмових генераторів. Це є важливою умовою для досягнення ефективних технологічних рішень при термічному зміцненні грунтів та підвищення надійності генераторів плазми в експлуатації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконання термічного зміцнення ґрунтових основ безпосередньо на будівельному майданчику супроводжується численними труднощами, що виникають через об'єктивні фактори: нерівномірну структуру, низьку теплопровідність і високу теплоємність вологих ґрунтів, а також теплові втрати, які неминуче супроводжують будь-який теплофізичний процес. Проте саме термічна обробка дозволяє досягти фундаментальних і незворотних змін властивостей ґрунту, створюючи з термогрунту міцні, довговічні та економічно вигідні основи для будівель і споруд.

2. Максимальна продуктивність технологічного процесу досягається під час обробки тонких шарів пухкого ґрунту (товщиною 15–30 мм) за допомогою плазмотрона, який рухається з визначеною швидкістю (30–80 см/хв) і знаходиться на мінімальній відстані від поверхні обробки (<20 мм). Найкраще поєднання параметрів залежить від потужності плазмотрона та фізико-хімічних характеристик ґрунтів, що обробляються.

3. Для глибинного зміцнення ґрунту необхідно виконувати термообробку визначених порцій ґрунту (50–450 кг/год), які подаються в лідерну свердловину (діаметром 18–24 см) до зони відкритого плазменно-дугового розряду. Під час цього плазмотрон переміщується вверх із розрахунковою швидкістю (1,5–4 м/год). У процесі роботи свердловина заповнюється силікатним розплавом щільної чи пористої структури. Оптимальні технологічні параметри визначаються потужністю плазмотрона, характеристиками ґрунту, діаметром свердловини та заданою пористістю отриманого матеріалу. Пористість плавленого ґрунту, а відповідно й його міцність, регулюється шляхом керування технологічними режимами термообробки.

4. Досягнення високої ефективності технологічного процесу можливе за умови оптимізації режимів роботи плазмотрона та суворого дотримання встановлених вимог до ключових конструктивних елементів генератора плазми.

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. Матвєєв Е.П. Будівельні матеріали: навчально-довідковий посібник. Київ, 2009. 699 с.

5. Олейник П.П., Фомиль Л.Ш. Інженерна підготовка території будівельного майданчика: навч. посібник. Київ:СІ, 2006. 240 с.

6. Швець В.Б., Фёклін В.І., Гінзбург Л.К. Посилення і реконструкція фундаментів. Харків : СІ, 2002. 203 с.

7. Артюх В.Г., Санніков І.В. Терміячне укріплення грунтів . Журнал "Будівництво України", 2007. №3. С. 11-14.

8. Hamilton G. The challenges of capacity building in PPP in Central Asia: speech on the III Astans Economic Forum, Kazakhstan, 1-2 July, 2010

9. Andrea Chegut, Piet Eichholtz, Rogier Holtermans Energy efficiency and economic value in affordable housing. Energy Policy. 2016. Vol. 97, P. 39-49.

10. Данилкін М.С., Шубін А.А Технологія будівельного виробництва. Підручник для ВНЗ. Київ, 2009. 317 с.

11. Комаров І.К. Вдосконалення будівельного виробництва: посібник. Харків, 2007. 208 с.

12. Дрожжин Д.Ю. Технологія будівельних процесів. *Державне будівництво.* 2012. № 2. С. 1-9.

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

14. I Rudnieva, I Priadko, N Priadko, H Tonkacheiev. Особливості та перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. *Будівельні конструкції. Теорія і практика.* 2020 № 7, С. 12–22

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

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

17. 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»).

18. 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.

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

20. 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.