

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 624.138.232.1(470.53)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНОГО ІН'ЄКТУВАННЯ ГРУНТІВ МЕТОДОМ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Н. П. Бадьора

В статті запропоновано новий спосіб закріплення ґрунтових масивів, який полягає у використанні додаткового навантаження на стаціонарний потік рідини розчину, що, за рахунок зменшення сил тертя між середовищем та ін'єктуючим розчином, дозволяє збільшити його проникність. Методом планування багатофакторного експерименту отримано квадратичні рівняння регресії для кодованих та дійсних значень факторів, які дозволяють адекватно описати залежності між основними параметрами процесу на збільшення проникності розчину та збільшення активної площі підсиленої області ґрунту. Проведено параметричну оптимізацію значень за допомогою пакету прикладних програм MathCAD, що дозволила встановити оптимальні значення параметрів процесу підсилення. Максимальний радіус розповсюдження для піщаного ґрунту буде спостерігатись при тисковій нагнітання $P=0,8$ МПа; частоті повторення пульсації $\omega=42$ Гц. Поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двомірні перерізи залежності значень радіуса розповсюдження розчину від окремих параметрів оптимізації.

Ключові слова: імпульсне ін'єктування, радіус розповсюдження, тиск, частота, характеристики ґрунтового середовища, поверхні відгуків, рівняння регресії.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Н. П. Бадёра

В статье предложен новый способ закрепления грунтовых массивов, который заключается в использовании дополнительной нагрузки на стационарный поток жидкости раствора, за счет уменьшения сил трения между средой и инъеکتующим раствором, позволяет увеличить его проницаемость. Методом планирования многофакторного эксперимента получены квадратичные уравнения регрессии для кодированных и действительных значений факторов, которые позволяют адекватно описать зависимости между основными параметрами процесса на увеличение проницаемости раствора и увеличение активной площади усиленной зоны ґрунтового массива. Проведено параметрическую оптимізацію значений с помощью пакета прикладных программ MathCAD, которая позволила установить оптимальные значения параметров процесса усиления. Максимальный радиус распространения для песчаного ґрунта будет наблюдаться при давлении нагнетания $P = 0,8$ МПа; частоте повторения пульсации $\omega = 42$ Гц. Поверхности отзвов критериев оптимізації и их двухмерные сечения зависимости значений радиуса распространения раствора отдельных параметров оптимізації.

Ключевые слова: импульсное инъектирование, радиус распространения, давление, частота, характеристики ґрунтовой среды, поверхности откликов, уравнение регрессии.

STUDY PARAMETERS OF PULSED INJECTION IN THE SOIL MASS METHOD OF EXPERIMENT PLANNING

N. Badora

In this article we proposed a new way to secure the ground arrays, which is to use the additional load on the steady stream of liquid solution, by reducing the frictional forces between the environment solution allows to increase its permeability. Planning factorial experiment the quadratic regression equation for the coded and real values of the factors that allow describing adequately the relationship between the main process parameters to increase the permeability of the solution and an increase in the

active area of enhanced zoning soil array. Parametric optimization values were conducted using the software package MathCAD, which has allowed establishing the optimal parameters of the process gain. Maximum radius of propagation is observed at a discharge pressure $P = 0,8$ MPa; repetition frequency ripple $\omega = 42$ Hz. Surface reviews optimization criteria and their two-dimensional cross-section depending on the radius of sharing solution of the individual parameters optimization.

Keywords: *surface review, regression equation, pulse injection, radius distribution, pressure, frequency, characteristics of soil environment.*

Актуальність проблеми

При тривалій експлуатації об'єктів, доріг, споруд, а також внаслідок дії техногенних, природних та кліматичних факторів можуть відбуватися зміни фізико-механічних властивостей ґрунтового масиву, утворюватись ослаблені, водопроникні, розуцільнені зони, що сприяє розвитку аварійних ситуацій. Для стабілізації масиву і запобігання аварійної ситуації необхідно перевести ослаблену, розуцільнену зону до її первісних властивостей.

При ін'єктуванні ґрунтових масивів, одним із важливих показників є радіус розповсюдження та проникність розчину в товщі ґрунтового масиву. Це дозволяє збільшити загальну площу укріпленої ділянки ґрунту та збільшити несучу здатність ґрунту.

Аналіз відомих теоретичних, експериментальних досліджень та публікацій [1-4] показав, що дослідження процесів розповсюдження розчинів здійснювалось при постійному тиску нагнітання, що не завжди забезпечувало якісне заповнення та насичення пор у ґрунті. При використанні тисків від 0,8 до 60 МПа в деяких випадках відбувався процес гідророзриву середовища, що супроводжувався значними перевитратами ін'єктуючого розчину. Виникає необхідність та доцільність в моделюванні процесів імпульсного розповсюдження розчинів в товщі ґрунтового масиву.

Постановка задачі дослідження

Задачею роботи є встановлення впливу динамічного тиску при імпульсному ін'єктуванні на процес розповсюдження розчинів в пористій структурі ґрунтового масиву. На основі математичного планування експерименту та отриманих експериментальних результатів необхідно виконати дослідження вплив тиску та частоти повторюваності імпульсів на радіус розповсюдження ін'єктуючого розчину.

Виклад основного матеріалу

На основі проведених теоретичних досліджень [8, 9] встановлено, що на радіус розповсюдження розчину в товщі ґрунтового масиву значний вплив чинять такі показники, як тиск нагнітання, частота повторення гідравлічних імпульсів, склад ін'єктуючої суміші та характеристики ґрунтового середовища. Залежність цих параметрів від цільової функції визначається залежністю (1):

$$R = f(p, w, B/C, k_f, n, m) \quad (1)$$

де p – тиск нагнітання розчину, МПа;
 w – частота повторення гідравлічних імпульсів, Гц;
 B/C – водоцементне співвідношення;
 k_f – коефіцієнт фільтрації ґрунту, м/сут;
 n – пористість ґрунту, %;
 m – гранулометричний склад ґрунту, мм.

Обрані для оцінювання процесу імпульсного нагнітання фактори були вибрані, як найбільш значимі та оптимальні для закріплення несучих основ споруд. Значення водоцементного співвідношення приймалось згідно нормативних документів для цементних розчинів [5]. Параметри характеристик ґрунтів: коефіцієнта фільтрації, пористості та гранулометричного складу підбирались в залежності від типу ґрунтової основи та виходячи із встановлених нормованих значень для кожного типу ґрунту [7].

Дослідження впливу параметрів на процес підсилення несучих основ споруд при проведенні експериментальних досліджень пов'язані із значними труднощами і об'ємами робіт,

тому доцільно провести багатofакторний експеримент для отримання рівнянь регресії для функцій відгуку R за допомогою повнофакторного експерименту виду 2^3 методом Бокса-Уілсона [6].

Вибір діапазонів варіювання факторів функцій (1) проводився так, щоб будь-яка їх сукупність в передбачених планом експерименту діапазонах могла бути реалізована і не приводила до протиріч. Для цього було проведено пошукові експерименти для визначення області, в якій необхідні нам сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані.

Всі фактори, які входять в функції (1), є величинами, що мають різну розмірність, а значення цих величин факторів мають різні порядки. Для отримання поверхні відгуку цієї функції було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору [6]. Для кожного фактора встановлені такі значення: X_{j0} – основний рівень фактора; X_{jmax} , X_{jmin} – верхній та нижній рівні фактора; αX_{jmax} , αX_{jmin} – зіркові верхній та нижній рівні фактора; α – зіркові плечі; I_j – інтервал варіювання. В умовному масштабі значення рівнів факторів наступні: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та “зіркові” значення, відповідно, $-2,378$ та $+2,378$, загальна кількість дослідів N дорівнює 53 [6].

Основні рівні, інтервали варіювання та межі області експериментальних досліджень приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Дійсні значення факторів та рівні їх варіювання для піску

Фактори				Рівні факторів					
№	Назва	Позначення	Одиниці виміру	-2,378	-1	0	1	2,378	Інтервал варіювання
x_1	Тиск	P	МПа	0,2	0,35	0,5	0,65	0,8	0,15
x_2	Амплітуда (частота повторення гідравлічних імпульсів)	w	$\Gamma\zeta$	10	20	30	40	50	10
x_3	Водоцементне співвідношення	V/C	-	1	1,25	1,5	1,75	2	0,25
x_4	Коефіцієнт фільтрації	K_ϕ	$m/доб$	0,2	0,65	1,1	1,55	2	0,45
x_5	Пористість ґрунту	n	%	25	30	35	40	45	5
x_6	Гранулометричний склад ґрунту	m	mm	0,5	0,875	1,25	1,625	2	0,375

Для побудови регресійної моделі досліджуваної системи використовуємо квадратичне рівняння регресії з ефектами взаємодії 1-го порядку, яке має вигляд [6]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_6x_6 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{56}x_5x_6 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{66}x_6^2, \quad (2)$$

де y – функція відгуку;
 $b_0, b_1, \dots, b_6, b_{12}, \dots, b_{56}, b_{11}, \dots, b_{66}$ – коефіцієнти регресії.
 Адекватність регресійної моделі перевірялася за критерієм Фішера [6]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{eidm}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (3)$$

де S_{ad} – дисперсія адекватності;
 S_{eidm} – дисперсія відтворюваності;
 $[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера;
 $f_1 = N - d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності;
 $f_2 = n - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності;
 d – кількість значимих коефіцієнтів регресії;

n – кількість попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

На основі отриманих автором експериментальних результатів [10], була сформована матриця планування експерименту.

Для функції відгуку R рівняння регресії, згідно проведеного багатофакторного експерименту для піщаної основи ґрунту для кодovаних значень має вигляд:

$$R = 76,18905 + 4,36756x_1 + 5,35522x_2 + 4,281354x_3 + 3,72076x_4 + 5,55019x_5 + 3,949222x_6 - 2,37727x_1^2 + 0,622072x_2^2 - 2,90657x_3^2 - 4,494466x_4^2 - 1,879808x_5^2 - 4,0533855x_6^2. \quad (4)$$

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для піщаної основи ґрунту функції відгуку R має вигляд:

$$R = 76,18905 + 4,36756P + 5,35522\omega + 4,281354B/\zeta + 3,72076K_\phi + 5,55019n + 3,949222m - 2,37727P^2 + 0,622072\omega^2 - 2,90657B/\zeta^2 - 4,494466K_\phi^2 - 1,879808n^2 - 4,0533855m^2. \quad (5)$$

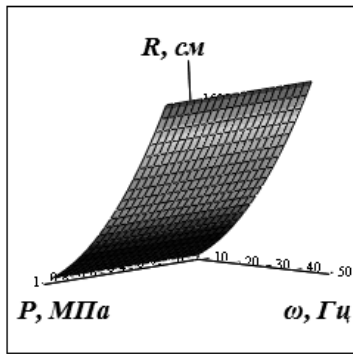
При цьому для піщаної основи ґрунтового масиву: квадрат дисперсії відтворюваності, $S_{\text{відм}}^2 = 46,840585$; квадрат дисперсії адекватності, $S_{\text{ад}}^2 = 84,137110$; значення F-критерія Фішера 1,7962437; допустиме значення F-критерія Фішера 1,8863572[6]; квадрат коефіцієнта кореляції, $R^2 = 0,924702625$.

Перевірка адекватності регресійної моделі проводилася за критерієм Фішера, який за результатами проведених дослідів не перевищує табличного значення 1,88. Отже, можна зробити висновок, що отримані рівняння регресії (4-5) є адекватним.

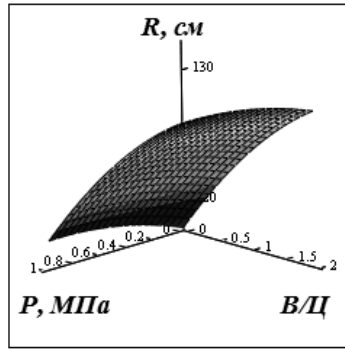
На рис. 1 приведені поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двомірні перерізи залежності значень радіуса розповсюдження розчину від окремих параметрів оптимізації. Поверхні відгуків дозволяють наглядно проілюструвати залежність значень величини радіуса розповсюдження розчину від тиску P , частоти повторення гідравлічних імпульсів ω ; водоцементного відношення B/ζ , коефіцієнту фільтрації ґрунту K_ϕ , пористості ґрунту n та гранулометричного складу m .

Висновки

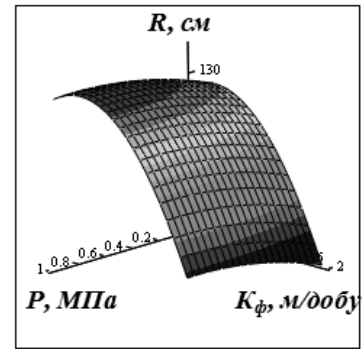
- Запропоновано новий спосіб закріплення ґрунтових масивів, який полягає у використанні додаткового (імпульсного) навантаження на стаціонарний потік рідини розчину, що, за рахунок зменшення сил тертя між середовищем та ін'єктуючим розчином, дозволяє збільшити його проникність.
- На основі теоретичних результатів та обґрунтованих раціональних параметрів устаткування було виконано експериментальні дослідження по нагнітання ін'єктуючих розчинів в ґрунтові масиви [10], на підставі яких сформовано матрицю планування експерименту.
- Методом планування багатофакторного експерименту отримано квадратичні рівняння регресії для кодovаних та дійсних значень факторів, які дозволяють адекватно описати залежності між основними параметрами процесу на збільшення проникності розчину та збільшення активної площі підсиленої області ґрунту.
- Проведено параметричну оптимізацію значень за допомогою пакету прикладних програм MathCAD, що дозволила встановити оптимальні значення параметрів процесу підсилення. Максимальний радіус розповсюдження для піщаного ґрунту буде спостерігатись при тисковій нагнітання $P=0,8$ МПа; частоті повторення пульсації $\omega=42$ Гц. Поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двомірні перерізи залежності значень радіуса розповсюдження розчину від окремих параметрів оптимізації.



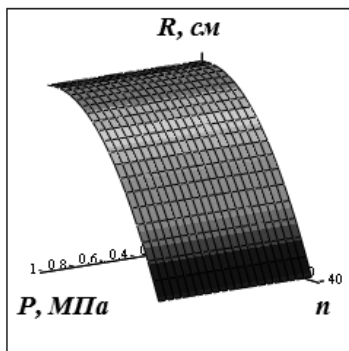
У



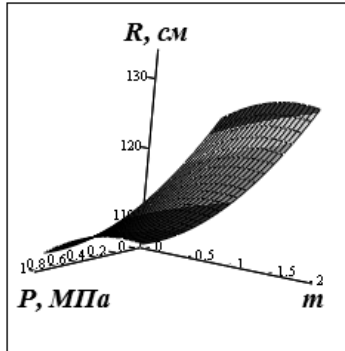
У



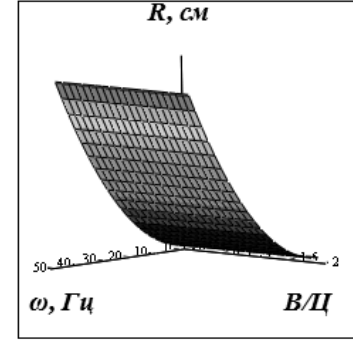
У



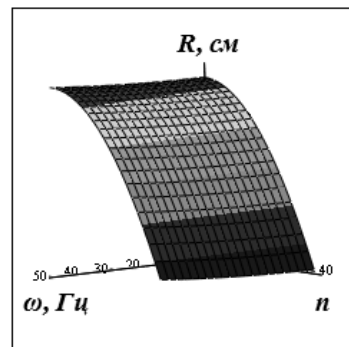
У



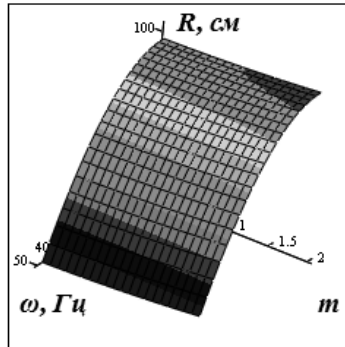
У



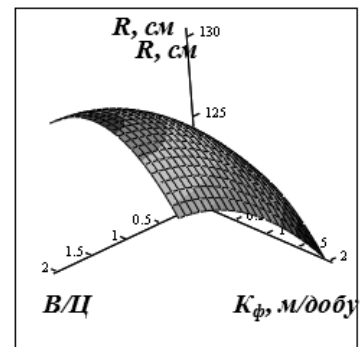
У



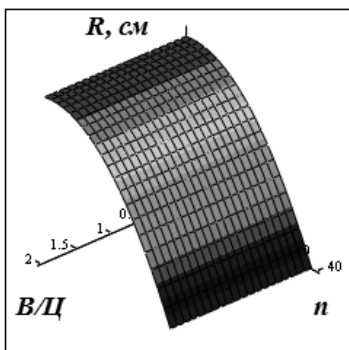
У



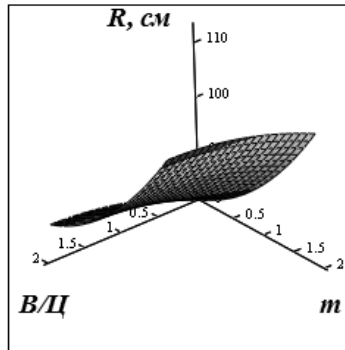
У



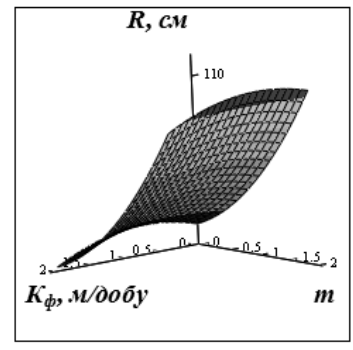
У



У



У



У

Рисунок 1 – Поверхні відгуку зміни основних параметрів процесі нагнітання в площині дійсних значень параметрів для піску: а) $P-\omega$; б) $P-V/Ц$; в) $P-K_\phi$; г) $P-n$; д) $P-t$; е) $\omega-V/Ц$; ж) $\omega-n$; з) $\omega-t$; и) $V/Ц-K_\phi$; к) $V/Ц-n$; л) $V/Ц-t$; м) $K_\phi-t$.

Використана література

1. Бабаскин Ю. Г. Укрепление грунтов инъектированием при ремонте автомобильных дорог / Ю. Г. Бабаскин // Под. ред. И. И. Леоновича – Мн.: УП «Технопринт», 2002. – 177 с. Монография.
2. Камбефор А. Инъекция грунтов. Принципы и методы / А. Камбефор; [пер. с фр. Р. В. Казаковой, В. Б. Хейфица]. – М.: «Энергия», 1971. – 333 с.
3. Каранфилов Т. С. Определения величины радиуса закрепления грунтов при постоянном коэффициенте фильтрации. // Гидротехническое строительство №1. – М.: Госэнергоиздат, 1951. – С. 39-42.
4. Марголин В.М. Исследование распространения растворов вокруг одиночных инъекторов при химическом закреплении грунтов: дис. на соискание ученой степени к.т.н. / В. М. Марголин. – Москва, 1969. – 182 с.
5. СНіП 3.02.01-83 «Химическое закрепление грунтов». – 1983. – 40 с.
6. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М: Наука, 1976. – 280с.
7. Основные механические свойства грунтов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sckompleks.ru/stroy_96.html.
8. Коц І. В. Гідродинаміка руху в'язко-пластичних розчинів в пористому середовищі при гідроімпульсному підсиленні несучих основ споруд / І. В. Коц, Н. П. Бадьора, О. П. Колісник, О. І. Павлюк // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». – 2012. – № 1. – С. 90-94.
9. Коц І. В. Особливості розповсюдження технологічних розчинів при ін'єкційному підсиленні ґрунтових масивів / І. В. Коц, Н. П. Бадьора // Збірник наукових праць «Науковий вісник будівництва». – 2013. – № 71. – С. 161-165.
10. Бадьора Н. П. Експериментальне дослідження цементацийного закріплення ґрунтів імпульсним ін'єктуванням / Н. П. Бадьора, І. В. Коц // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014. – № 1. [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3489/5172>.

Бадьора Наталя Петрівна – аспірант кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету

Бадёра Наталья Петровна – аспірант кафедри теплогазоснабження Винницького національного технічного університета

Badora Natalya Petrovna – graduate student of Heat and Gas Supply Department, Vinnytsia National Technical University.