

І.В. Коц, к.т.н., доц.; *С.Б. Сторожук*; *В.В. Петрусь*,
Вінницький національний технічний університет

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО НАГНІТАННЯ СУМІШЕЙ В ГРУНТ ОСНОВ ФУНДАМЕНТІВ

Запропоноване конструктивне виконання устаткування та технологія імпульсного нагнітання сумішей в ґрунт основ фундаментів, яке базується на застосуванні гідравлічного приводу, керування яким здійснюється за допомогою гідравлічного генератора імпульсів тиску. Наведено і обґрунтовано математичні залежності із визначення параметрів формування імпульсного струменю на виході нагнітального вузла і розглянуто процес проникнення імпульсного струменю розчину у ґрунт.

Постановка проблеми. Досить часто постають проблеми, що пов'язані з нагнітанням твердіючих сумішей та анкеруванням тріщин гірничих порід, ґрунтів основ фундаментів, залізобетонних, бетонних та кам'яних конструкцій з метою їх зміцнення. Якість виконання таких технологічних операцій залежить від досконалості пристроїв для закріплення ґрунту шляхом введення у ґрунт скріпних розчинів, а також речовин, що заповнюють пори ґрунту. Ці обставини зумовлюють доцільність подальшого вдосконалення і розробки нового устаткування для інтенсифікації нагнітання твердіючих сумішей, зокрема, у ґрунти основ фундаментів при їхньому посиленні.

Аналіз останніх досліджень. Відомі конструкції ін'єкторів для нагнітання твердіючих сумішей, які надають можливість подавати розчин до шпурів. Такі конструктивні рішення не завжди забезпечують якісне заповнення пор у ґрунті або анкерування тріщин у процесі нагнітання. Недоліком відомих ін'єкторів є їх низькі темпи заповнення пор і тріщин та недостатня надійність з погляду закупорювання отворів перфорованих ланок частками ґрунту, яке збільшується з глибиною занурення ін'єктора у ґрунт, що закріплюється, внаслідок чого інструмент виходить з ладу і потребує виймання зі свердловини і прочищення отворів, що значно зменшує продуктивність праці.

Формулювання мети і задач дослідження. Мета досліджень – розробка нового пристрою для імпульсного нагнітання сумішей у ґрунт, що сприятиме інтенсифікації проникнення скріпних розчинів, підвищенню якості та збільшення темпу заповнення ними пор та тріщин ґрунтів в основі фундаментів, які підлягають посиленню, підвищення продуктивності праці при виконанні таких технологічних операцій. Передбачається також створення теоретичних основ для розрахунку параметрів устаткування. Основні задачі: розробка математичних моделей динаміки роботи гідроприводу нагнітального

вузла і процесу проникнення імпульсного струменя розчину у ґрунт; дослідження на базі отриманих моделей загальних закономірностей гідродинамічних процесів в імпульсній установці та ґрунтовому масиві, в який періодично подається визначена доза рідини; розробка алгоритму та методик розрахунку, оптимізації параметрів та знаходження режимів ефективної імпульсної дії струменя на ґрунт при проектуванні подібного устаткування.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 зображена конструктивна схема запропонованого нами пристрою для імпульсного нагнітання скріпних сумішей у ґрунт основи фундаменту [5].

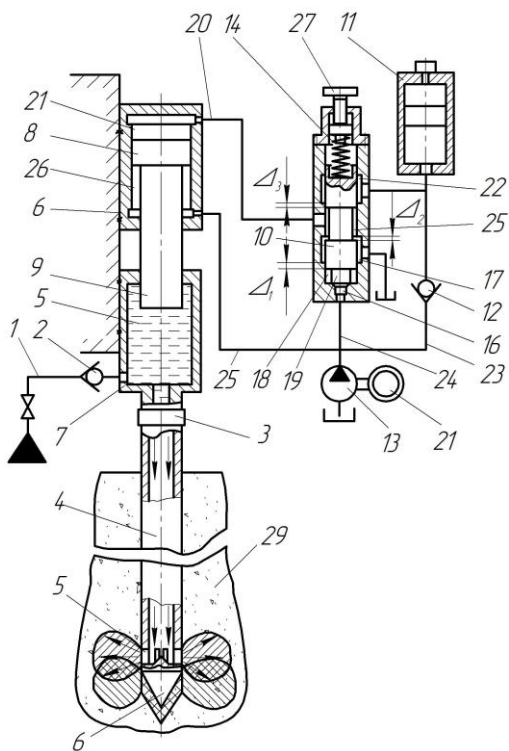


Рис. 1. Конструктивна схема установки для нагнітання розчину у ґрунт

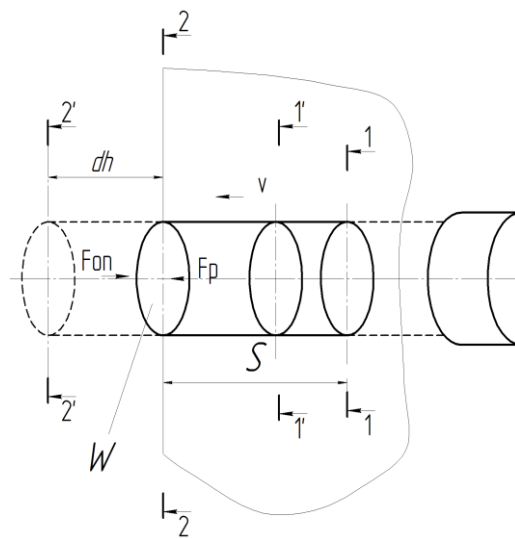


Рис.2. Схема переміщення фрагменту струменя рідини у ґрунтовому масиві

Пристрій для імпульсного нагнітання розчину і керуючий ним генератор імпульсів тиску працюють так. При включенні привідного гідронасоса 13 (рис. 1) робоча рідина під тиском поступає з нагнітальної магістралі 24 по гідролінії 23 через зворотний клапан 12 в гідроаккумулятор 11, проводячи його зарядку, і в порожнину управління 16 зі сторони торця першої ступені двоступінчастого двопозиційного чотириходового золотника 10. Окрім того, робоча рі-

дина надходить по гідролінії 25 у взвідну камеру 26, здійснюючи переміщення поршня 8 зі штоком 9 в крайнє верхнє положення. Одночасно при переміщенні поршня 8 зі штоком 9 у верхнє положення з напірної водної магістралі 1 через зворотний клапан 2 відбувається подача порції розчину в напірну камеру 5. По досягненні поршнем 8 зі штоком 9 крайнього верхнього положення і закінченні зарядки гідроаккумулятора 11, тиск робочої рідини зростає до величини, на яку налаштований зусиллям регульованої пружини 14 золотник 10. Зусилля регульованої пружини 14 вибирається, виходячи з величини необхідного робочого тиску в гідросистемі і площі поперечного перерізу першої ступені золотника 10. Після подолання силою тиску робочої рідини зусилля регульованої пружини 14 відбувається відрив тіла золотника 10 від установочного сидла і робоча рідина, що поступає в міжступінчасту порожнину управління 18, починає діяти на збільшену площу другої ступені. Оскільки зусилля від тиску робочої рідини набагато перевищує зусилля регульованої пружини 14, то золотник 10 різко переміщується вгору, проходить перекриття h_1 і здійснює при цьому відкриття зв'язку зливного кільцевого розточування 17 з порожниною управління 18 зі сторони більшої ступені золотника 10.

Тиск робочої рідини у всіх порожнинах і гідролініях починає падати до зливного. Одночасно золотник 10, переміщаючись вгору і пройшовши перекриття h_2 , здійснює закриття зв'язку за допомогою каналу 20 камери 21 робочого ходу із зливним кільцевим розточуванням 17 і відкриває зв'язок їх з кільцевим розточуванням 22, яка постійно пов'язана з гідроаккумулятором 11. Робоча рідина із гідроаккумулятора 11 поступає по каналу 20 в камеру 21 робочого ходу і починає переміщувати поршень 8 з штоком 9 в нижнє положення. У міру переміщення поршня 8 робоча рідина із взвідної камери 26 по гідролінії 25 видаляється на злив. Шток 9 переміщується в напірній імпульсній гідрокамері 5 вниз, стискаючи воду, що знаходиться, там. Розчин скріпної рідини, що знаходиться в напірній імпульсній гідрокамері 5, витискається звідти переміщуваним вниз штоком 9, на який в даний момент діє сила тиску робочої рідини, яка викидається з гідроаккумулятора 11, через клапан 3 тиску на вході колони ін'єктора поступає у ґрунт. Коли поршень 8 з штоком 9 опускаються, тиск робочої рідини, що витісняється із взвідної камери 26, падає до мінімуму. При якому зусилля, що встановлене регулюванням гвинта 27 пружини 14, стає більшим ніж сила дії на поперечний переріз золотника 10 від тиску робочої рідини в порожнині управління 18 зі сторони торця другої

ступені. В результаті цього золотник 10 повертається в початкове нижнє положення і сідає на установочне сидло, перекриваючи зв'язок порожнини управління 16 зі сторони торця першої ступені із зливним кільцевим розточуванням 17. Цикл роботи генератора імпульсів тиску в пристрої для імпульсного нагнітання розчину в ґрунт повторюється в автоматичному режимі. Період затримки золотника 10 в нижньому положенні регулюється тривалістю зарядки гідроакумулятора 11 і тривалістю реверса поршня 8 зі штоком 9 гідроциліндра 6 двосторонньої дії. Затримка золотника 10 у верхньому положенні визначається часом витoku із взвідної камери 26, який залежить від регульованої величини потенційної енергії, накопиченої в гідроакумуляторі 11. Змінюючи регульованою пружиною 14, за допомогою гвинта 27 величину настройки тиску спрацьовування золотника 10, а також продуктивність привідного гідронасоса 13 можна в широких межах варіювати частоту повторення гідравлічних імпульсів, а також їх тривалість і об'єм порцій нагнітання розчину в ґрунт.

Підвищення ефективності нагнітання розчину в ґрунт в пропонованому пристрої в порівнянні з відомими [2-4] досягається тим, що такі визначальні параметри, як: частота проходження імпульсів нагнітання, об'єм порцій нагнітання розчину, величина тиску і тривалість імпульсного нагнітання можуть бути вибрані оптимальними, завдяки відповідній настройці двоступінчатого двохпозиційного чотириходового золотника 10 і привідного гідронасоса 13.

Розглянемо деякі особливості розрахунку гідроприводу установки для імпульсного нагнітання розчину у ґрунт. Для складання диференційного рівняння руху маси порції розчину, яка нагнітається у ґрунт за один імпульс, будемо вважати дану масу зосередженою, тобто $m_g = \rho F s$, де ρ – густина розчину; F – площа поперечного перерізу штока 9 поршня 8, що входить в робочу порожнину з водою 5; s – величина переміщення штока 9 поршня 8. Припустимо також, що гідроакумулятор 11 розряджається згідно лінійного закону, тобто $P_0 = cs$, де $P_0 = p_0 F$ – сила початкової дії на масу розчину, що викидається; p_0 – тиск в гідроакумуляторі 11 до початку розрядки; c – узагальнений коефіцієнт, що враховує розрядку гідроакумулятора 11. Припустимо, що гідравлічні опори в гідросистемі пропорційні квадрату швидкості переміщення штока 9 поршня 8, тобто $R_r = \alpha v^2$, де α – коефіцієнт гідравлічного опору; v – швидкість переміщення штока 9. Масою поршня 8 зі штоком 9 та масою об'єму технологічного розчину, який викидається в одному імпуль-

сі нехтуємо.

З врахуванням прийнятих припущень, диференціальне рівняння імпульсної подачі об'єму розчину, що нагнітається, можна представити як [6]:

$$\rho F s \frac{d^2 s}{dt^2} = P_0 - cx - \alpha \left(\frac{ds}{dt} \right)^2. \quad (1)$$

Це рівняння перетворюємо до вигляду

$$\rho F s \frac{d^2 s}{dt^2} + \alpha \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 + cx - P_0 = 0, \quad (2)$$

замінімо в ньому $z = \frac{ds}{dt}$, $\frac{d^2 s}{dt^2} = z \left(\frac{dz}{dt} \right)$ і запишемо

$$\rho F s z \frac{dz}{dt} + \alpha z^2 + cs - P_0 = 0, \quad (3)$$

Це рівняння є окремим випадком рівняння Абеля [7]:

$$\frac{ds}{dt} = (\rho F s)^{(-\alpha/\rho F)} \sqrt{2 \int f(s) ds + C_1}, \quad (4)$$

звідки
$$t = \int \frac{ds}{(\rho F s)^{(-\alpha/\rho F)} \sqrt{2 \int f(s) ds + C_1}}, \quad (5)$$

де
$$f(s) ds = -\int (cs - P_0) (\rho F s)^{(2\alpha/\rho F - 1)} ds.$$

Підстановкою значень вихідних величин в рівняння (4) і (5) визначається швидкість та тривалість нагнітання технологічного розчину. Відповідним підбором швидкості та тривалості викиду струменя у ґрунт розчину забезпечується оптимальна проникність та інтенсивність.

Гідроімпульсне нагнітання рідини всередину ґрунтового масиву – складний процес, залежний від множини чинників, тому з метою полегшення проектування пристроїв для гідроімпульсного внесення технологічного розчину необхідно розробити аналітичні методи визначення величини проникнення струменів в ґрунтове середовище залежно від технологічних і конструкційних параметрів пристроїв для гідроімпульсної подачі рідини і фізико-механічних властивостей ґрунту.

Оскільки при описі процесу проникнення струменя технологічного розчину в ґрунт неможливо врахувати всі чинники, що впливають на процес, надалі будемо враховувати тільки деякі характерні чинники і введемо ряд припущень.

Основні припущення, прийняті при описі процесу проникнення струменя розчину у ґрунт при гідроімпульсному нагнітанні, наступні:

1. Ґрунт в місці дії струменя представляє собою однорідну речовину, так звану, монодисперсну речовину, що складається з мінеральних частинок однакового розміру.

2. Сила дії струменя технологічного розчину на ґрунт і опір в ньому рівномірно розподілені за всією площею дії струменя при його проникненні.

3. Струмінь представляє собою нестискуваний стрижень діаметром d і довжиною S .

4. Ґрунт у момент переміщення струменя розчину через отвір перфорації ін'єктора піддається тільки стисненню, опір ґрунтового масиву не враховується.

Розглянемо фрагмент 1–2 струменя рідини площею поперечного перерізу ω і довжиною S , який переміщується, наприклад, горизонтально з деякою швидкістю v , набутою в результаті дії на рідину в гідроімпульсній камері високого тиску (рис. 2). Рідину будемо вважати ідеальною: нехай в ній відсутні дотичні напруги і вона не стискається.

Припустимо, що за нескінченно малий проміжок часу цей фрагмент перемістився в ґрунт на відстань dh в нове положення 1'–2'. В результаті опору ґрунтового масиву стисненню швидкість руху фрагменту зміниться на dv .

Визначимо зміну кінетичної енергії маси фрагменту, що перемістився з положення 1–2 в нове положення 1'–2'. Зміна кінетичної енергії буде дорівнювати різниці кінетичних енергій мас об'ємів 1–2 і 1'–2'.

$$E_{K.1-2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho\omega Sv^2}{2}; \quad (6)$$

$$E_{K.1'-2'} = \frac{m(v-dv)^2}{2} = \frac{\rho\omega S(v-dv)^2}{2}; \quad (7)$$

де m – маса переміщуваного тіла, кг; v – швидкість тіла, м/с; ρ – густина технологічного розчину, кг/м³.

Перетворимо вираз (7):

$$E_{K.1'-2'} = \frac{\rho\omega S(v-dv)^2}{2} = \frac{\rho\omega Sv^2 - (2v dv - dv^2)}{2}. \quad (8)$$

Прийmemo нескінченно малу величину $2v dv - dv^2$ у виразі (8) приблизно рівною нескінченно малій величині $2v dv$, тоді

$$E_{K.1'-2'} = \frac{\rho\omega S(v-dv)^2}{2} \approx \frac{\rho\omega S(v^2 - 2v dv)}{2}. \quad (9)$$

Згідно теореми про кінетичну енергію, зміна кінетичної енергії на деякому проміжку шляху дорівнює повній роботі всіх сил на цьому шляху. Тоді

$$E_{K.1-2} - E_{K.1'-2'} = \sum A_{dh}. \quad (10)$$

де $\sum A_{dh}$ – повна робота всіх сил на шляху dh .

На фрагмент технологічної рідини, що переміщується у ґрунтовому середовищі, із врахуванням припущень, діють наступні основні сили: сила гідродинамічного тиску рідини і сила опору ґрунтового масиву стисненню, отже, загальна робота цих сил може бути представлена, як:

$$\sum A_{dh} = A_G + A_P - A_{OP}. \quad (11)$$

Швидкість руху фрагменту струменя рідини на початку ділянки dh дорівнює v , тоді сила гідродинамічного тиску рідини $F_p = \rho Qv$. Припустимо, що при проходженні нескінченно малої ділянки dh сила гідродинамічного тиску рідини залишилася незмінною і дорівнює F_p , тоді

$$A_P = \rho Qv dh, \quad (12)$$

де Q – витрата рідини, м³/с.

Робота сили опору ґрунтового масиву при його стисненні

$$A_{OP} = F_{OP} dh = \tau w dh, \quad (13)$$

де $F_{OP} = \tau w$ – сила опору ґрунтового масиву стисненню, Н; τ – напруга, яка визначається твердістю ґрунту, Н/м².

Підставимо вирази (6), (9), (12), (13) в (10):

$$\frac{\rho \omega S v^2}{2} - \frac{\rho \omega S (v^2 - 2v dv)}{2} = \rho Qv dh - \tau \omega dh. \quad (14)$$

Введемо коефіцієнт відносної втрати швидкості руху струменя рідини у ґрунтовому масиві залежно від глибини проникнення, величина якого залежить від типу і властивостей оброблюваного ґрунту:

$$k_{III} = \frac{dv}{dh}. \quad (15)$$

Тоді

$$\rho \omega S v dv = \tau \omega dh + \rho Qv \frac{dv}{k_{III}}. \quad (16)$$

Проінтегруємо обидві частини рівності (16) в околі області $R = \{(v_{max}; 0) - (0; h_{max})\}$. Межі інтегрування вибрані з наступних міркувань – при вході струменя рідини в ґрунт струмінь має максимальну початкову швидкість v_{max} , при цьому глибина проникнення струменя в ґрунтовий масив дорівнює 0, через деякий проміжок часу швидкість вертикального переміщення струменя зменшується до 0, що відповідає максимальній глибині проникнення струменя рідини в ґрунт h_{max} .

В результаті цього, після деяких перетворень, отримаємо

$$h_{\max} = \frac{(\rho W - \frac{1}{k_{ш}} \rho Q) v_{\max}^2}{2\tau\omega}. \quad (17)$$

Перетворимо вираз (17), з метою виявлення залежності глибини проникнення струменя рідини в ґрунтовий масив від величини тиску рідини в гідроімпульсній камері 5.

При закінченні виходу рідини під тиском із гідроімпульсної камери 5 через отвір ін'єктора витрату закінчення визначаємо згідно формули [8]

$$Q = \mu\omega \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (18)$$

де μ – коефіцієнт витрати; p – тиск всередині гідроімпульсної камери, Па.

Швидкість струменя на виході з отвору при закінченні виходу рідини під тиском із гідроімпульсної камери 5 через насадок може бути визначена безпосередньо за формулою (4), або згідно відомої формули [8], виходячи із максимального тиску розчину при відкритті клапана 3 в кінці робочого ходу штока 9 у порожнині гідроімпульсної камери 5:

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad (19)$$

де φ – коефіцієнт швидкості.

Підставивши вирази (18) і (19) в (17) і провівши необхідні перетворення, отримаємо

$$h_{\max} = \frac{(W - \frac{\mu\varphi\omega}{k_{ш}} \sqrt{\frac{2p}{\rho}}) \varphi^2 p}{\tau\omega}, \quad (20)$$

де W – об'єм рідини вноситься за один імпульс (об'єм робочої камери); μ – коефіцієнт витрати; ω – площа поперечного перерізу струменя (площа вихідного отвору перфорації ін'єктора), м²; $k_{ш}$ – коефіцієнт відносної втрати швидкості руху струменя рідини у ґрунтовому масиві, залежний від глибини проникнення, 1/с; p – тиск рідини всередині гідроімпульсної камери, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; φ – коефіцієнт швидкості; τ – напруга, що визначає твердість ґрунтового масиву, Н/м²; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Таким чином, отримані вирази (18) і (21) дозволяють визначити максимальну глибину проникнення h_{\max} високонапірного струменя технологічного розчину у ґрунт при її гідроімпульсному нагнітанні залежно від технологічних параметрів процесу нагнітання, технічних параметрів пристрою і фізичних властивостей ґрунтового масиву.

Висновки. Виведені узагальнені функціональні залежності, що зв'язу-

ють між собою основні параметри привідної гідросистеми і конструкції гідроприводного вузла поршневого насоса, придатні для практичних розрахунків при попередній оцінці і, виборі їхніх раціональних параметрів на стадії ескізного проектування. Відмічено актуальність подальшої розробки та вдосконалення технологічного обладнання для робіт по ін'єктуванню ґрунтів, зокрема, установок для імпульсного нагнітання сумішей у ґрунт, впровадження яких сприятиме його інтенсифікації та якості, порівняно із відомими способами та устаткуванням. Розглянуто конструктивне виконання нового устаткування, яке базується на застосуванні гідравлічного приводу, керування яким здійснюється за допомогою гідравлічного генератора імпульсів тиску – автоколивального двоступінчатого чотириходового золотника. Запропоновані математичні залежності із визначення параметрів формування імпульсного струменю на виході нагнітального вузла і розглянуто процес проникнення імпульсного струменю розчину у ґрунт, які забезпечують визначення оптимальних режимів нагнітання рідини та гарантують ефективність імпульсної дії струменю на ґрунт.

Список літератури: 1. Усачев П. М. Гидравлический разрыв пласта. – М.: Недра, 1986.– 186 с. 2. А.с. 1273606, СССР, МКИ Е21F 5/02. Генератор ударных импульсов / И.В. Коц, А.Ф. Пономарчук, Г.С. Ратушняк. – № 3848930/22-03.– Заявлено 24.01.85 // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 4. 3. Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотняющих машин / М.Е. Иванов, И.Б. Матвеев, Р.Д. Искович-Лотоцкий, В.А. Пишенин, И.В. Коц. - М.: Машиностроение, 1977. - 174 с. 4. Эрих Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Лань, 2003. – 643 с. 5. Константинов Ю.М., Гіжа О.О. Технічна механіка і газу.– Київ, Вища школа, 2002. – 277 с. 6. Заславський Ю.З., Дружко Е.Б. Нові види кріплення гірничих виробок. - М.: Недра, 1989. – 256 с. 7. Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. – М.: Стройиздат, 1986. – 204 с.