

THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF UKRAINE  
KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL  
INSTITUTE

**FRACTURE MECHANICS  
AND PHYSICS OF CONSTRUCTION  
MATERIALS AND STRUCTURES**

Collection of scientific works

**Issue 8**

Edited by: J. J. Luchko

Lviv  
Kameniar  
2009

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ім. Г. В. КАРПЕНКА

**МЕХАНІКА І ФІЗИКА  
РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ  
МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ**

Збірник наукових праць

**Випуск 8**

За загальною редакцією Й. Й. Лучка

Львів  
Каменяр  
2009

## Гідроімпульсні ін'єктори для нагнітання будівельних сумішей при реконструкції будівель та споруд

**Постановка проблеми.** Досить часто постають проблеми, що пов'язані з нагнітанням твердіючих будівельних сумішей та анкеруванням тріщин залізобетонних, бетонних та кам'яних конструкцій з метою їх зміцнення. Якість виконання таких технологічних операцій залежить від досконалості пристроїв для нагнітання будівельних сумішей при реконструкції будівель та споруд. Ці обставини зумовлюють доцільність подальшого вдосконалення і розробки нового устаткування для інтенсифікації нагнітання твердіючих будівельних сумішей, зокрема для нагнітання розчинів у тріщини бетонних і залізобетонних конструкцій.

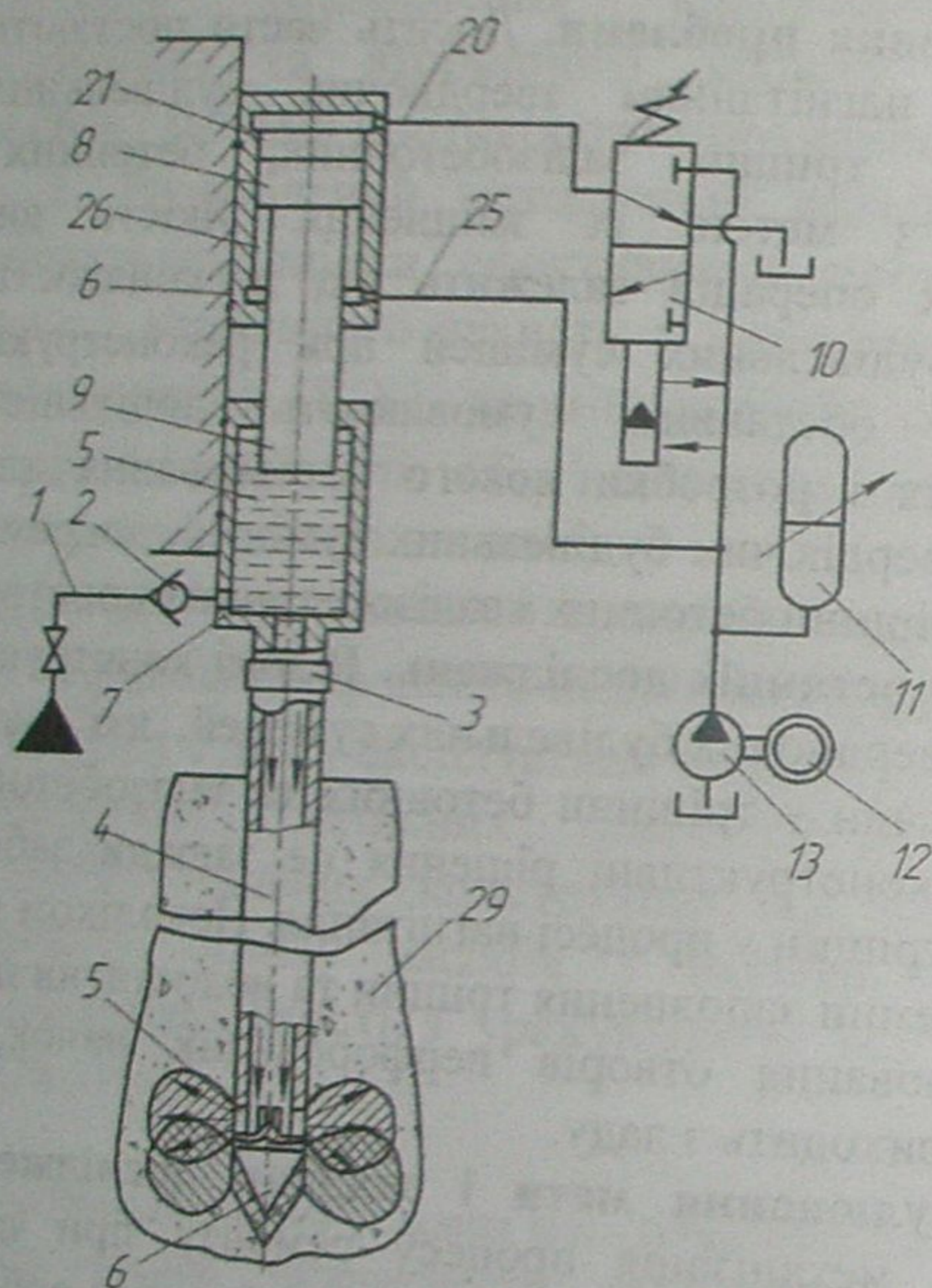
**Аналіз останніх досліджень.** Відомі конструкції ін'єкторів для нагнітання твердіючих будівельних сумішей, які надають можливість подавати розчин у тріщини бетонних та залізобетонних конструкцій [1–3]. Такі конструктивні рішення не завжди забезпечують якісне заповнення тріщин у процесі нагнітання. Недоліком відомих ін'єкторів є їх низькі темпи заповнення тріщин та недостатня надійність з погляду закупорювання отворів перфорованих ланок, внаслідок чого інструмент виходить з ладу.

**Формулювання мети і завдань дослідження.** Мета даної розробки – механізація процесу ремонту при підвищенні якості, зниженні трудомісткості і забезпеченні безпеки робіт. Передбачається також створення теоретичних основ для розрахунку параметрів устаткування. Основні завдання: розробка математичних моделей динаміки роботи гідроприводу нагнітального вузла і процесу проникнення імпульсного струменя розчину в тріщини бетонних і залізобетонних конструкцій при застосуванні запропонованого устаткування.

**Виклад основного матеріалу.** Спосіб ремонту бетонних і

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

залізобетонних конструкцій полягає в тому, що очищення, розкриття тріщин та ін'єктування здійснюється за допомогою спеціального устаткування із гідроімпульсним приводом, дистанційно керованим автоматом реверсу. На *рис. 1* зображена конструктивна схема запропонованого нами пристрою для гідроімпульсного нагнітання будівельних сумішей у тріщини залізобетонних та бетонних елементів мостів та інших будівельних конструкцій при ремонтах та реконструкції [4]. Пристрій працює так.



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

Робоча рідина, що нагнітається гідронасосом 13, по гідролінії 25 надходить у звідну камеру 26 і переміщає поршень 8 з штоком 9 в верхнє положення. При цьому поршнева порожнина 21 сполучена за допомогою імпульсного розподільника 10 зі зливом. Поршень 8 зі штоком 9 займає крайнє верхнє положення і одночасно з магістралі 1 через зворотний клапан 2 відбувається подача порції розчину в напірну камеру 5. При досягненні поршнем 8 зі штоком 9 крайнього верхнього положення і закінченні зарядки гідроаккумулятора 11, тиск

робочої рідини зростає до величини, на яку налаштований імпульсний розподільник 10, здійснюється його релейне перемикання і з'єднання акумулюючого об'єму 11 і насоса 13 з поршневою порожниною 21. Відбувається імпульсне переміщення поршня 8 з штоком 9 в крайнє нижнє положення. Робоча рідина із взвідної камери 26 по гідролінії 25 видаляється на злив. Шток 9 переміщується в напірній імпульсній гідрокамері вниз і витискає розчин скріпної рідини через клапан тиску 3 до колони ін'єктора, а потім у тріщини конструкції. Коли поршень 8 з штоком 9 опускаються, тиск робочої рідини падає до мінімуму, і імпульсний розподільник 10 перемикається, з'єднавши поршневу порожнину 21 зі зливом. Надалі цикл повторюється в автоматичному режимі. Відповідним налаштуванням тиску спрацьовування імпульсного розподільника 10, а також регулюванням продуктивності привідного гідронасоса 13 можна в широкому діапазоні регулювати частоту повторення гідравлічних імпульсів, а також їх тривалість і об'єм порцій нагнітання розчину в тріщини конструкцій. Підвищення ефективності нагнітання розчину в ґрунт в пропонованому пристрої в порівнянні з відомими [1–3] 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.

Розглянемо деякі особливості розрахунку гідроприводу гідроімпульсного ін'єктора для нагнітання будівельних сумішей. Маса порції розчину, який нагнітається в тріщини за один імпульс, будемо вважати зосередженою, тобто  $m_a = \rho F s$ , де  $\rho$  – густина розчину;  $F$  – площа поперечного перерізу штока 9 поршня 8, що входить в робочу порожнину 5;  $s$  – величина переміщення штока 9 поршня 8. Припустимо також, що гідроакумулятор 11 розряджається згідно з лінійним законом, тобто  $P_0 = cs$ , де  $P_0 = p_0 F$  – сила початкової дії на масу розчину, що викидається;  $p_0$  – тиск у гідроакумуляторі 11 до початку розрядки;  $c$  – узагальнений коефіцієнт, що враховує розрядку гідроакумулятора 11. Гідравлічні опори в гідросистемі приймаємо пропорційними квадрату швидкості переміщення штока 9 поршня 8, тобто  $R_r = \alpha v^2$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $v$  – швидкість переміщення штока 9. Масою поршня 8 зі штоком 9 та масою об'єму технологічного розчину, який викидається в одному імпульсі нехтуємо.

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

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

Це рівняння перетворимо до вигляду

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

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 [5]

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

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.

При описі процесу гідроімпульсного проникнення струменя розчину у тріщини приймаємо такі припущення: сила дії струменю технологічного розчину на матеріал конструкції і опір в ньому рівномірно розподілені за всією площею дії струменю при його проникненні; струмінь представляє собою нестисливий стрижень діаметром  $d$  і довжиною  $S$ .

Розглянемо фрагмент 1–2 струменя рідини площею поперечного перерізу  $\omega$  і довжиною  $S$ , який переміщується, наприклад, горизонтально з деякою швидкістю  $v$ , набутою в гідроімпульсній камері високого тиску (рис. 2). Рідину будемо вважати ідеальною і нестисливою.

Припустимо, що за нескінченно малий проміжок часу цей фрагмент перемістився в тріщині на відстань  $dh$  в нове положення 1-2'. В результаті опору масиву конструкції 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':

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

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

де  $m$  – маса переміщуваного об'єму, кг;  $v$  – швидкість, м/с;  $\rho$  – густина технологічного розчину, кг/м<sup>3</sup>.

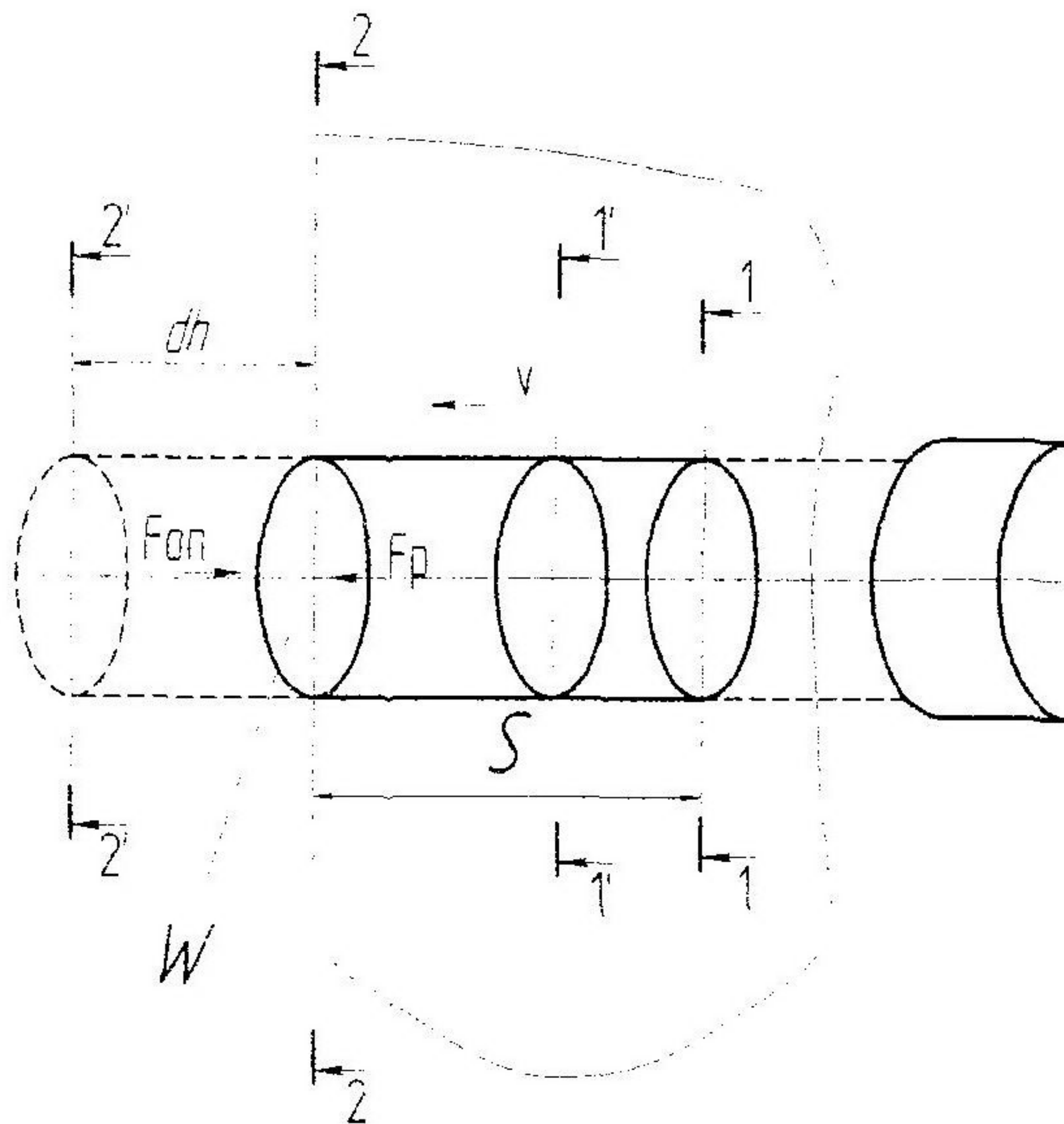


Рис. 2. Схема переміщення фрагменту струменю рідини у ґрунтовому масиві

Перетворимо вираз (7)

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

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 з теоремою 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 тріщинах конструкції, із врахуванням припущень, діють такі основні сили: сила гідродинамічного тиску рідини і сила опору масиву конструкції, 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  $F_P = \rho Q v$ . Припустимо, що при проходженні нескінченно малої ділянки  $dh$  сила гідродинамічного тиску рідини залишилася незмінною і дорівнює  $F_P$ , тоді

$$A_P = \rho Q v dh, \quad (12)$$

де  $Q$  – витрата рідини,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Робота сили опору масиву конструкції

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

де  $F_{Op} = \tau w$  – сила опору масиву розтягу, Н;  $\tau$  – напруга, яка визначається твердістю матеріалу конструкції,  $\text{Н}/\text{м}^2$ .

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

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

Введемо коефіцієнт відносної втрати швидкості руху струменя рідини у масиві залежно від глибини проникнення  $k_{III} = \frac{dv}{dh}$ .

Тоді

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

Проінтегруємо обидві частини рівності (16) в околі області  $R = \{(v_{max}; 0) - (0; h_{max})\}$ . Межі інтегрування вибрані з міркувань, що при вході струменя рідини в тріщини конструкції він має максимальну



початкову швидкість  $v_{max}$ , при цьому глибина проникнення струменя в масив дорівнює 0, через деякий проміжок часу швидкість вертикального переміщення струменя зменшується до 0, що відповідає максимальній глибині проникнення струменя  $h_{max}$ .  
В результаті цього, після деяких перетворень, отримуємо

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

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

При виході рідини із гідроімпульсної камери 5 через отвір ін'єктора витрати і швидкість струменя визначаємо з відомими формулами [ 6]

$$Q = \mu\omega \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \quad v = \phi \sqrt{\frac{2p}{\rho}},$$

де  $\mu$  і  $\phi$  – відповідно, коефіцієнт витрати і швидкості;  $p$  – тиск всередині гідроімпульсної камери, Па.

Підставивши ці вирази в (17) і провівши необхідні перетворення, отримуємо:

$$h_{max} = \frac{(W - \frac{\mu\phi\omega}{k_{ш}} \sqrt{\frac{2p}{\rho}}) \phi^2 p}{\tau\omega} \quad (18)$$

де  $W$  – об'єм рідини вноситься за один імпульс (об'єм робочої камери);  $\omega$  – площа поперечного перерізу струменя (площа вихідного отвору перфорації ін'єктора),  $m^2$ ;  $k_{ш}$  – коефіцієнт відносної втрати швидкості руху струменя рідини у масиві, залежний від глибини проникнення,  $1/c$ ;  $p$  – тиск рідини всередині гідроімпульсної камери, Па;  $\rho$  – густина рідини,  $kg/m^3$ ;  $\tau$  – напруга, що визначає твердість масиву,  $N/m^2$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ .

Таким чином, отримані вирази (17) і (18) дозволяють визначити максимальну глибину проникнення  $h_{max}$  високонапірного струменя технологічного розчину у тріщини конструкції при його гідроімпульсному нагнітанні залежно від технологічних параметрів процесу нагнітання, технічних параметрів пристрою і фізичних властивостей масиву конструкції.

**Висновки.** Запропонований спосіб і устаткування відрізняється високою якістю виконання технологічного процесу. Поєднання багатьох операцій, таких як очищення, розкриття тріщин, активація

розчину, ін'єктування дозволяє механізувати процес ремонту конструкції, зменшує трудомісткість і підвищує безпеку виконання робіт. Виведені узагальнені функціональні залежності, що пов'язують між собою основні параметри конструкції запропонованого устаткування, привідної гідросистеми, що придатні для практичних розрахунків при попередній оцінці і виборі їхніх раціональних параметрів на стадії ескізного проектування. Наведені математичні залежності із визначення параметрів формування імпульсного струменя на виході нагнітального вузла і розглянуто процес проникнення імпульсного струменя розчину в масив конструкції, які забезпечують визначення оптимальних режимів нагнітання рідини та гарантують ефективність імпульсної дії струменя при заповненні тріщин при ремонті і посиленні бетонних і залізобетонних елементів мостів та інших будівельних конструкцій.

*Summary.* A device, related to industry of exploitation, retaining of artificial buildings and can be used for repair and strengthening of concrete and reinforced-concrete elements of bridges and other building constructions using hydroimpulse drive, is offered, distantly controlled with reverse automaton. Mathematical dependences are presented and the parameters of creation of impulsive stream on an exit from a forcing block and process of penetration of impulsive stream into the construction body are presented.

1. Ланис А. Л., Крицкий М. Я. Геотехническое обоснование упрочнения грунтовых оснований методом высоконапорной инъекции // Город и геологические опасности: Материалы Международной конференции. – С.-Пб., 2006. – Ч. II. – С. 78–86.
2. Назаревич Б. Л. Проблеми, пов'язані з влаштуванням горизонтальних гідроізоляцій при реставрації заволожених об'єктів / Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій: Зб. наук. пр. – Львів: Каменяр, 2004. – Вип. 6. – С. 97–107.
3. Ржаницын Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. – М.: Стройиздат, 1986. – 264 с.
4. А.с. 1256726, СССР, МКИ А01G 25/02. Импульсный дождевальный аппарат / И. В. Коц, А. Ф. Пономарчук, Г. С. Ратушняк. – № 3644083/30-15. – Заявлено 19.09.83. Опубл. 15.09.86, Бюл. № 34.
5. Эрих Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Лань, 2003. – 643 с.  
[http://books.allmedia.ru/showGov.asp?FND=&Cat\\_id=2090406](http://books.allmedia.ru/showGov.asp?FND=&Cat_id=2090406). Константинов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка газу. – К.: Вища школа, 2002. – 277 с.