

УДК 624.191.951

**МОДЕЛЬ ПРОНИКНЕННЯ ІН'ЄКЦІЙНИХ ЦЕМЕНТНИХ РОЗЧИНІВ У
ЗАОБРОБКОВІ ТРІЩИНУВАТІ СКЕЛЬНІ ПОРОДИ**

Д-р техн. наук А. А. Плугін, кандидати техн. наук О. А. Калінін, С. В. Мірошніченко,
асист. А. С. Зверєва, магістранти В. М. Голіней, М. С. Ляхов

**INJECTION MODEL OF CEMENT MORTAR PENETRATION INTO CRACKED
ROCKS BEHIND WALLING**

D. Sc. (Tech.) A. Plugin, PhD (Tech.) O. Kalinin, PhD (Tech.) S. Miroshnichenko,
assistant A. Zvierieva, master V. Holinei, master M. Liakhov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241660>

Анотація. Визначено фактори, що найбільше впливають на глибину проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи від природних і технологічних факторів, розроблено моделі залежностей глибини проникання від цих факторів. У результаті дослідження моделей встановлено величини технологічних факторів, у т. ч. динамічної в'язкості розчину, що забезпечують потрібне проникнення цементних

розчинів. Показано, що застосування добавок-суперпластифікаторів дозволяє ефективно забезпечувати підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою. Удосконалено й опрацьовано технологію ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за обробку підземних споруд та в масивні конструкції штучних споруд. Технологію рекомендовано застосовувати для гідроізоляції та підвищення несучої здатності конструкцій тунелів, водопропускних труб, мостових опор.

Ключові слова: тунель, обробка, тріщинувата порода, ін'єкційний розчин, глибина проникнення, динамічна в'язкість.

Abstract. The natural and technological factors influencing on the depth of injection cement mortars penetration into the cracked rocks and emptiness under the lining of mountain tunnels have been studied. There are the width of cracks in rocks and groundwater pressure in them, the dynamic viscosity of the solution, which is determined by the content of additives-superplasticizer and water-cement ratio W/C, the magnitude and duration of pressure during the projection (crimping). These facts were established after the analytical of literature sources and the analysis of features, design and a technical condition of real tunnel, geological structure of processing rocks under their lining. Based on the fundamental rheological equation - Newton's law in viscous flow models of dependences of depth of penetration on factors mentioned above are developed. Because of research of these models the sizes of technological factors, including dynamic viscosity of the mortar, providing the required penetration of cement mortars were received. To ensure the penetration of the solution to a depth of 10 m in cracks with a width of 10 mm, the dynamic viscosity should not exceed over 0.05 Pa·s, and in cracks of 1 mm – 0.01 Pa·s. To ensure the penetration of the solution to a depth of 2 m in cracks with a width of 1 mm, the dynamic viscosity should be in the range of 0.03–0.1 Pa·s, and in cracks of 0.1 mm – 0.0025–0, 01 Pa·s. Superplasticizers allows reducing the dynamic viscosity of solutions to such values and effectively increasing the depth of their penetration into cracks and, as a result increasing the water resistance and load-bearing capacity of the fractured rock. The technology of injecting cement mortars with superplasticizer additives has been improved and developed for: the reconstruction of underground structures and massive artificial structures; the designing of a spherical bearing between galvanized concrete without a bald spot and the exposed metal beams. The technology is recommended to be used for waterproofing and increasing the bearing capacity of tunnel, piers, bridges, and for the device of a laying layer between a without-ballast reinforced concrete bridge plate and longitudinal beams of metal bridges.

Keywords: tunnel, retaining walls, fractured rock, injection solution, penetration depth, dynamic viscosity.

Вступ. На залізницях України експлуатується понад 40 залізничних тунелів. Вік більшості з них перевищує 50 років, а значної кількості – 100 років. Під час експлуатації внаслідок впливу природних (підземних вод, поперемінного заморожування й відтавання) та антропогенних факторів (агресивних газів, струмів витоку) обробка тунелів зазнає пошкоджень і, отже, фізичного зносу [1, 2]. Найбільш руйнівним з цих факторів є вплив підземних вод, які містяться у тріщинах скельних порід, ґрунтах і намагаються фільтрувати з масиву

до внутрішнього простору тунелю (рис. 1). Фільтрація підземних вод всередину тунелю спричиняє вилуговування забутовки або цементного розчину, який під час будівництва нагнітали у зазор між обробкою і масивом, суфозію ґрунту, внаслідок чого за обробкою утворюються обводнені порожнини. Це ще прискорює зазначені руйнівні процеси, а у підсумку призводить до порушення спільної роботи обробки з масивом, її деформації аж до порушення габариту і навіть завалу.



Рис. 1. Витікання води через ін'єктор, встановлений в шпарину, просвердлену в обробці тунелю до заобробкового простору

Запобігти фільтрації та її руйнівному впливу дозволяє гідроізоляція обробки. Через неприпустимість зменшення габариту тунелю додатковими конструкціями найбільш розповсюдженими способами гідроізоляції обробки експлуатованих тунелів є ін'єкційні, здійснювані шляхом нагнітання за обробку глиняних, полімерних, цементних розчинів [1, 2]. Глиняні розчини найдешевші, задовільно гідроізольють обробку, проте не здатні відновити її несучу здатність і в теперішній час майже не застосовуються. Сучасні полімерні розчини, особливо ті, що розширюються, з високою ефективністю гідроізольють обробку та відновлюють її несучу здатність, проте є дуже коштовними. Цементні розчини здатні добре відновлювати як водонепроникність, так і несучу здатність тунельної обробки [3, 4], проте забезпечення їх проникної здатності у ґрунти та тріщини скельних порід залишається неповністю вирішеним завданням, у т. ч. через складність контролю глибини проникнення після ін'єктування. Стаття присвячена розробленню моделі проникнення ін'єкційних цементних

розчинів у заобробкові скельні породи тунелів і дослідженню залежності глибини проникнення від природних і технологічних факторів. Виходячи з викладеного тема дослідження є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нагнітання цементних розчинів застосовують не тільки під час будівництва транспортних тунелів, а й під час будівництва і ремонту тунелів метрополітену [5, 6], тунелів і колекторів систем водовідведення [7–9]. В цих випадках також забезпечується заповнення зазору між гірською виробкою і конструкцією обробки з метою забезпечення рівномірного передавання навантаження та запобігання подальшої інфільтрації в споруду підземних або ґрунтових вод або, навпаки, ексфільтрації стічних вод із каналізаційних тунелів і колекторів.

Ін'єкційні способи тампонажу (надання водонепроникності) всього ґрунтового масиву з тріщинуватих скельних порід добре відпрацьовані під час буріння свердловин [10], проходження гірських виробок [11, 12]. Для тампонажу застосовували в основному цементні

розчини з водоцементним відношенням $V/C = 0,8-1,0$, вважаючи, що за рахунок відтиснення надлишку води у тонкі тріщини V/C зменшується до $0,32-0,35$.

Створення тампонажних розчинів, способів їх ін'єктування і технологічного контролю ґрунтується на закономірностях і методах фізико-хімічної механіки та реології дисперсних систем [13]. Ґрунтуючись на зазначених закономірностях, у роботах [14–17] було обґрунтовано реологічні властивості суперпластифікованих цементно-водних суспензій для ін'єктування за обробку тунелів [14–16], у міжтрубний зазор у разі ремонту каналізаційних колекторів методом вставок [17]. У статті [18] обґрунтовано проникнення силікатних розчинів у пористий ґрунт. У роботах [14, 17] для аналізу закономірностей руху розчину у тріщині в породі, міжтрубному зазорі застосовано закон в'язкості Ньютона

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (1)$$

де τ – напруження зсуву, Н/м^2 ,

η – динамічна в'язкість розчину, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

dv/dx – поперечний напрямку течії градієнт її швидкості, $1/\text{с}$.

Було показано, що глибина проникнення розчину в скельні породи залежить від ширини розкриття тріщин в них, розміру частинок розчину, його динамічної в'язкості, тривалості прикладання тиску нагнітання.

У статті [19] проаналізовано зв'язок між фундаментальними реологічними властивостями (в'язкістю, $\text{Па}\cdot\text{с}$, граничним опором зсуву, Па) і технологічними реологічними властивостями розчинів (різними видами глибини проникнення інденторів, мм, осідання, см, ширини розтікання, см/мм, тривалості витікання через отвори, с), одержано теоретичні та експериментальні моделі зв'язку між ними. У роботах [20–23] отримано також добре

узгоджені між собою теоретичні та експериментальні моделі зв'язку між фундаментальними реологічними властивостями й електричними показниками роботи електропривода, що забезпечує рух кулеподібного індентора крізь розчин, а в дослідженнях [22, 23] ці моделі застосовано для розроблення автоматизованої системи регулювання складу розчину безпосередньо під час його ін'єктування у міжтрубний зазор у разі ремонту каналізаційних колекторів методом вставок.

У роботах [24, 25] за допомогою ротаційних віскозиметрів встановлено, що динамічна в'язкість цементного розчину дорівнює за $V/C = 0,5$ – $\eta = 0,2-0,3$ $\text{Па}\cdot\text{с}$, а за $V/C = 0,32-0,35$ збільшується до 10 $\text{Па}\cdot\text{с}$. У роботах [15, 16] встановлено, що динамічна в'язкість цементного розчину з добавками суперпластифікаторів, що є аніонними ПАР, знижується до величин, близьких до $\eta = 0,001$ $\text{Па}\cdot\text{с}$ навіть у разі зниження V/C до $0,35-0,32$.

Отже, для аналізу залежності глибини проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи від природних і технологічних факторів знайдено теоретичні передумови. Визначено і прийнято до аналізу фактори, що найбільше впливають на глибину проникнення: ширина розкриття тріщин в породах, динамічна в'язкість розчину, тривалість прикладання тиску під час ін'єктування. Аналіз доцільно здійснювати на основі рівняння (1).

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження – встановлення залежності глибини проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи від природних і технологічних факторів, а також умов забезпечення встановленої глибини проникнення.

Методи дослідження: аналіз за літературними даними факторів, що впливають на глибину проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи, побудова фізичної і

математичної моделі проникнення, розрахунковий експеримент з дослідження залежності глибини проникнення від природних і технологічних факторів.

Завдання дослідження: розробити фізичну і математичну моделі проникнення ін'єкційного розчину в тріщину; виконати дослідження залежності глибини проникнення розчину в тріщини від тривалості опресування (ін'єктування) за різних величин інших природних і технологічних факторів; виконати дослідження залежності динамічної в'язкості цементного розчину, потрібної для проникнення розчину на глибину l , від l за різних величин інших природних і технологічних факторів. З урахуванням отриманих результатів удосконалити технологію ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за обробку підземних споруд та в масивні конструкції штучних споруд.

Основна частина дослідження.

Розроблення фізичної і математичної

моделей проникнення ін'єкційного розчину в тріщину. Схема обробки зі встановленим ін'єктором, заобробкової скельної тріщинуватої породи та порожнини за обробкою наведена на рис. 2. З порожниною сполучається одразу декілька тріщин. Порожнина і тріщини заповнені під тиском P_v підземною водою, яка одразу після свердлування шпори починає витікати крізь встановлений в неї ін'єктор (рис. 2). Під час ін'єктування спочатку відбувається заповнення розчином порожнини, при цьому тиск на манометрі розчинонасоса є мінімальним. Після заповнення порожнини починається проникнення розчину в тріщини і течія в них. Це супроводжується різким збільшенням тиску на манометрі. Після досягнення тиском певної величини P_i , яка визначається потужністю розчинонасоса або станом обробки, здійснюють опресування – витримку тиску протягом часу t для забезпечення проникнення розчину у тріщини на потрібну глибину l .

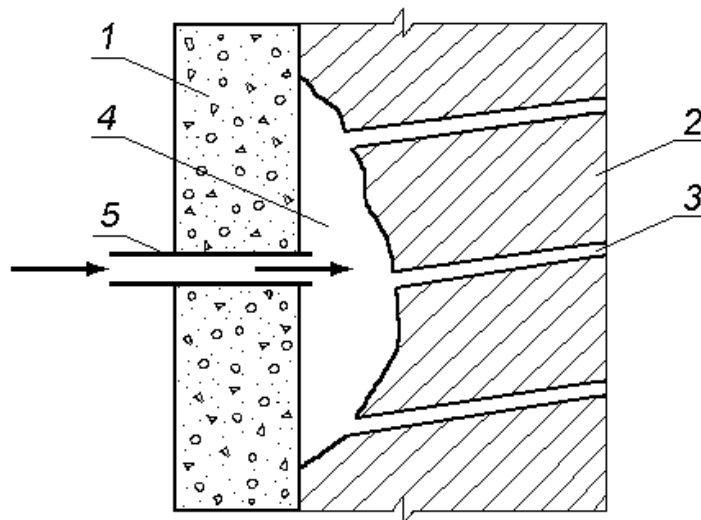


Рис. 2. Схема порожнини за обробкою тунелю:
1 – обробка; 2 – скельний ґрунт; 3 – тріщини; 4 – порожнина; 5 – ін'єктор

Окрема тріщина представлена заповненим водою безкінечно довгим плоским капіляром шириною b_T , товщиною h_T ($b_T \gg h_T$). Площа поверхонь заповненої

частини тріщини S_{Π} і поперечного перерізу тріщини S_T складуть

$$S_{\Pi} = 2l \cdot (h_T + b_T) \approx 2b_T l. \quad (2)$$

$$S_T = b_T h_T. \quad (3)$$

Розчин тече в капілярі під тиском ін'єктування P_i . Течії заважає природний тиск води в тріщині P_B і тиск P_T від сили тертя в тріщині F . Стаціонарний потік зі швидкістю v встановлюється за умови

$$P_T = P_i - P_B. \quad (4)$$

Заповнення тріщини щільною водою дозволяє зневажити ефектами, пов'язаними з утворенням меніска.

Подамо рівняння (1) у наведеному вигляді і знайдемо з нього силу тертя F_T :

$$\frac{F_T}{S_{\Pi}} = \eta \cdot \frac{v}{\delta}; \quad (5)$$

$$F_T = \eta \cdot S_{\Pi} \cdot \frac{v}{\delta}, \quad (6)$$

де v/δ – поперечний напрямку течії градієнт її швидкості, 1/с;

δ – товщина шару розчину, в якому швидкість течії змінюється від 0 до v , м.

Тиск від сили тертя складе

$$P_{\text{т}} = \frac{F_T}{S_{T\Pi}} = \eta \cdot \frac{S_{\Pi}}{S_T} \cdot \frac{v_{\Pi}}{\delta} = \eta \cdot \frac{2b_T l}{b_T h_T} \cdot \frac{v_{\Pi}}{\delta} = \eta \frac{2lv_{\Pi}}{h_T \delta}. \quad (7)$$

Підставивши рівняння (7) у формулу (4), отримаємо

$$P_i - P_B = \eta \frac{2lv}{h_T \delta}. \quad (8)$$

Під час ін'єктування, зокрема стадії опресування, потік розчину через тріщини дорівнюватиме

$$Q = V_T / t, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (9)$$

де V_T – об'єм розчину, що ін'єктується у тріщини, які відкриваються у порожнину, м^3 ;

t – тривалість опресування, с.

Лінійна швидкість руху розчину у тріщинах складе

$$v = Q / S_T, \quad (10)$$

де S_T – сумарна площа перерізу тріщин, які відкриваються у порожнину,

$$S_T = \gamma \cdot \frac{V_{\Pi}}{h_{\Pi}}, \quad (11)$$

де γ – поверхнева тріщинуватість скельної породи, відн. од.;

V_{Π} – об'єм порожнини, який визначається під час ін'єктування, м^3 ;

h_{Π} – середня глибина порожнини, яка визначається під час свердлування шпари, м.

Підставивши (11) у (10), потім (12) у (8) і (9) у (13), отримаємо:

$$v = \frac{Qh_{\Pi}}{\gamma V_{\Pi}}; \quad (12)$$

$$P_i - P_B = \frac{2\eta l Q h_{\Pi}}{h_{\text{т}} \delta \gamma V_{\Pi}}; \quad (13)$$

$$P_i - P_B = \frac{2\eta l h_{\Pi} V_{T\Pi}}{h_{\text{т}} \delta \gamma V_{\Pi} t}. \quad (14)$$

Об'єм розчину, що прийняли тріщини, з урахуванням (11) становитиме:

$$V_T = S_T l = \gamma \frac{V_{\Pi} l}{h_{\Pi}}. \quad (15)$$

Підставивши (15) у вираз (14), одержимо рівняння стаціонарного розчину у тріщинах

$$P_i - P_B = \frac{2\eta h_{\pi}}{h_{\pi} \delta \gamma W_{\pi} t} \times \gamma \frac{V_{\pi} l}{h_{\pi}} = \frac{2\eta l^2}{h_{\pi} \delta \cdot t}. \quad (16)$$

Рівняння (16) є моделлю, придатною для аналізу технологічних режимів ін'єктування. Зокрема, за ним можна дослідити залежність глибини проникнення розчину в тріщини l від тривалості опресування t та інших природних і технологічних факторів

$$l = \sqrt{\frac{(P_i - P_B) \cdot h_{\pi} \delta \cdot t}{2\eta}}, \quad (17)$$

або дослідити залежність потрібної для забезпечення певної глибини проникнення розчину l тривалості опресування t від l та інших факторів

$$t = \frac{2\eta l^2}{h_{\pi} \delta (P_i - P_B)}, \quad (18)$$

або дослідити залежність глибини проникнення розчину l від динамічної в'язкості розчину

$$\eta = \frac{h_{\pi} \delta (P_i - P_B) t}{2l^2}. \quad (19)$$

Результати дослідження та їх обговорення

Виконано дослідження:

- залежності (17) глибини проникнення розчину в тріщини l від тривалості опресування (ін'єктування) t за різних величин інших природних і технологічних факторів – ширини розкриття тріщин h_{π} , наявності (вмісту) у розчині добавки-суперпластифікатора СП, водоцементного відношення В/Ц, динамічної в'язкості розчину η , тиску опресування P_i ;

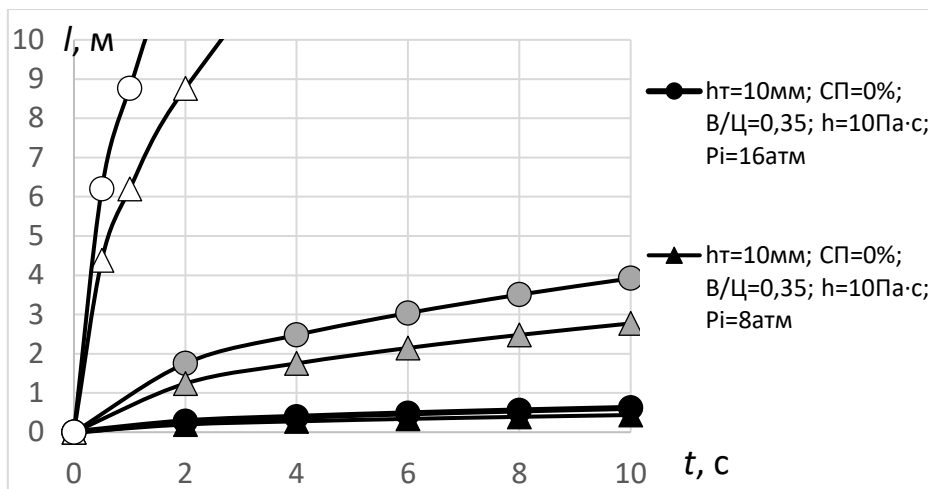
- залежності (19) динамічної в'язкості цементного розчину η , потрібної для проникнення розчину на глибину l , від l за різних величин інших природних і технологічних факторів – h_{π} , P_i , t .

Дослідження проведено для значень та меж величин цих факторів: h_{π} – від 0,1 до 10 мм; вмісту добавки суперпластифікатора СП – 0 і 1 % від маси цементу, В/Ц – 0,35 і 0,5, яким відповідають значення η : СП = 0 %, В/Ц = 0,35 – $\eta = 10$ Па·с; СП = 0 %, В/Ц = 0,5 – $\eta = 0,25$ Па·с; СП = 1 %, В/Ц = 0,35 – $\eta = 0,005$ Па·с; P_i – 16 і 8 атм. Тиск підземної води P_B прийнято рівним 0. Результати дослідження у вигляді відповідних графіків залежностей наведені на рис. 3 і 4.

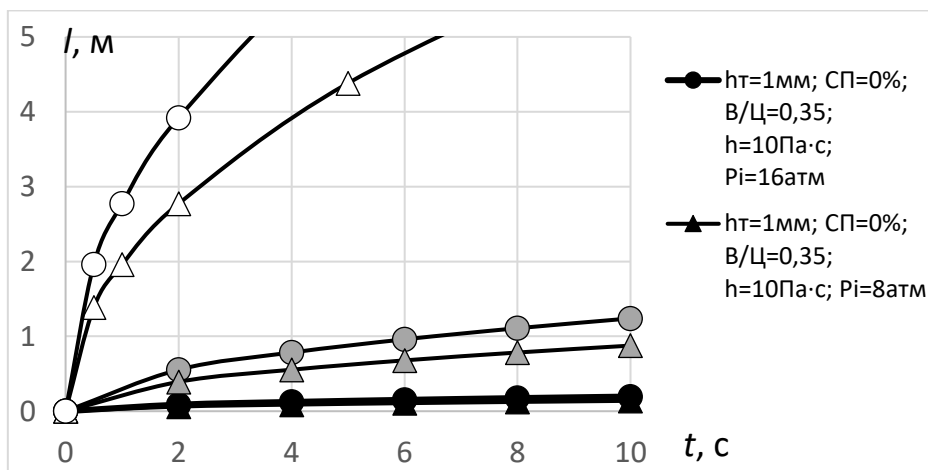
Із рис. 3 видно, що цементний розчин без добавок з В/Ц = 0,35, яке забезпечує високі показники водонепроникності та міцності, не здатний проникати у тріщини з великим розкриттям 10 мм на глибину більше 0,5 м навіть під максимальним тиском 16 атм за великої тривалості опресування 10 хв. Збільшення В/Ц розчину без добавок до прийнятної величини 0,5 дозволяє збільшити глибину проникнення до 3–4 м. Проте у тріщини з меншою шириною розкриття 1 мм розчин без добавок проникає на глибину за В/Ц = 0,35 – не більше 0,1 м, а з В/Ц = 0,5 – не більше 0,8–1,2 м, а у тріщини 0,1 мм майже не проникає. Отже, ефективність цементних розчинів без добавок для підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою не може бути високою.

Збільшити глибину проникнення цементних розчинів дозволяє застосування добавок-суперпластифікаторів, які знижують їх динамічну в'язкість до величин 0,005 Па·с. Розчин з добавкою-суперпластифікатором навіть за В/Ц = 0,35 проникає у тріщини шириною розкриття 10 мм на глибину 10 м за 0,5–1 хв, у тріщини 1 мм – за 3–7 хв. Тільки такий розчин проникає у тріщини шириною розкриття 0,1 мм, зокрема, за 10 хв на глибину 2 м під тиском 8 атм і на глибину 2,7 м під тиском 16 атм. Отже, ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами дозволяє ефективно забезпечувати підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою.

а



б



в

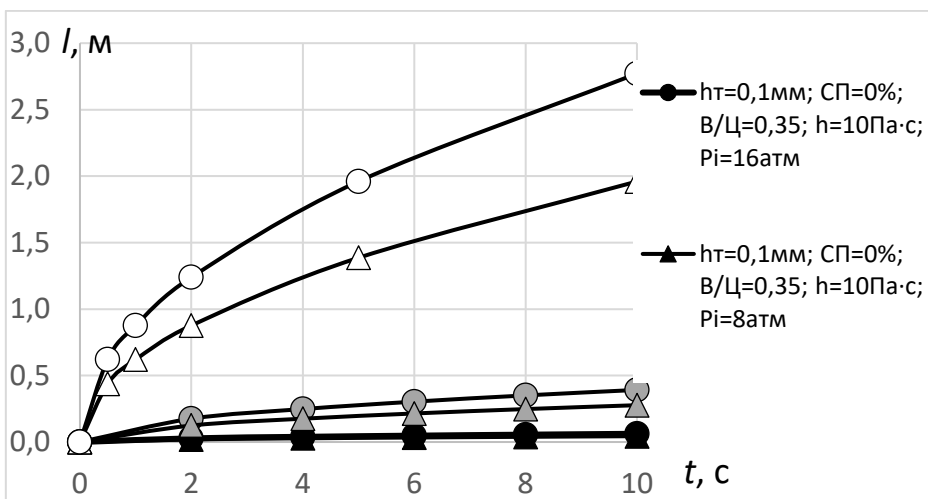


Рис. 3. Залежність глибини проникнення цементного розчину l від тривалості ін'єктування (опресування) t за різного вмісту добавки суперпластифікатора СП, водоцементного відношення В/Ц, в'язкості розчину η , тиску опресування P_i у тріщини шириною розкриття: а – 10 мм; б – 1 мм; в – 0,1 мм

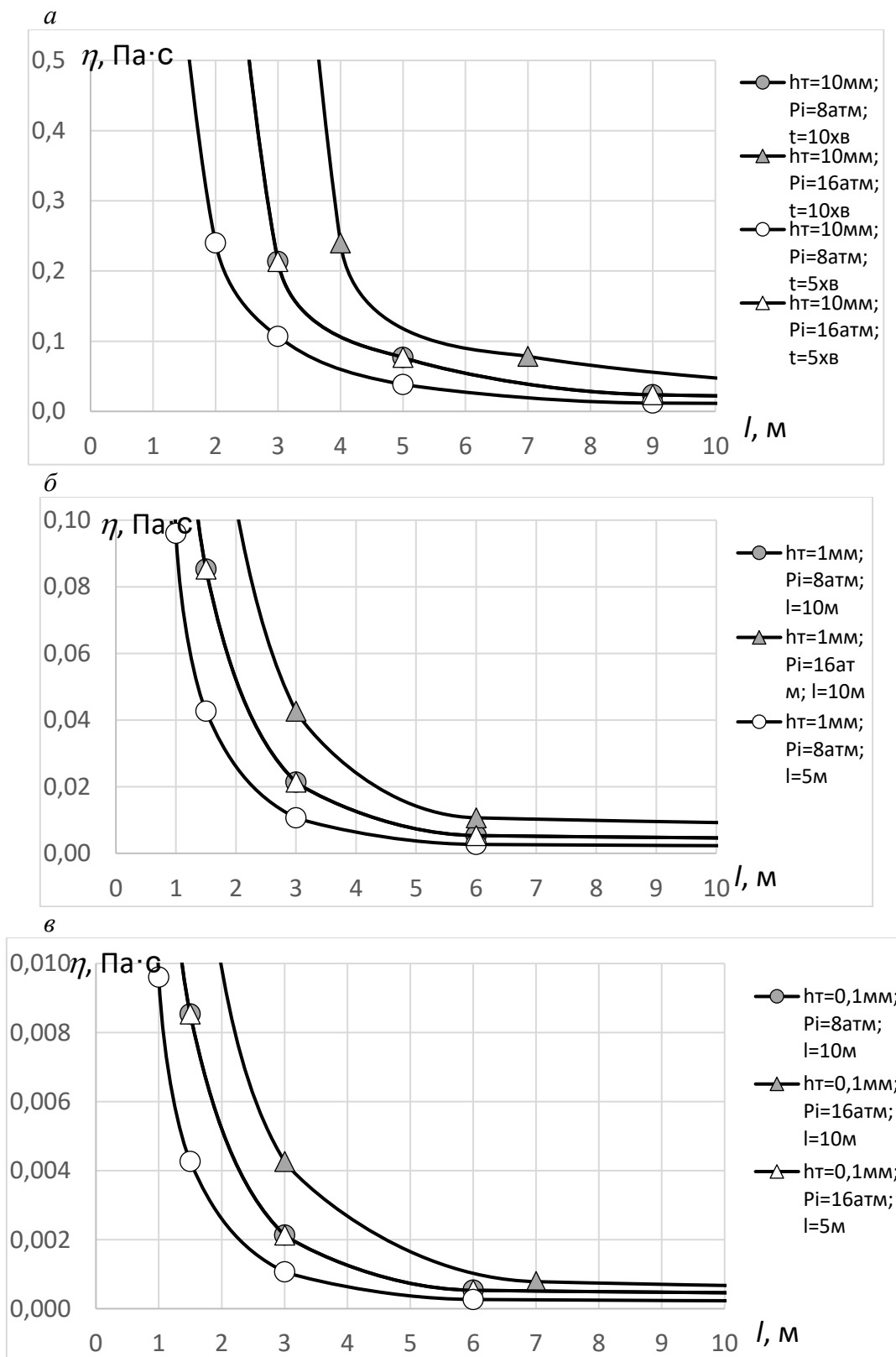


Рис. 4. Залежність динамічної в'язкості цементного розчину η , потрібної для проникнення розчину на глибину l в тріщини шириною розкриття h_t , від l , різної за різного тиску опресування P_i у тріщини шириною розкриття: *а* – 10 мм; *б* – 1 мм; *в* – 0,1 мм

Із рис. 4 видно, що для проникнення цементного розчину на глибину $l = 10$ м динамічна в'язкість η не має перевищувати: у тріщини шириною розкриття $h_T = 10$ мм – $0,05$ Па·с; $h_T = 1$ мм – $0,01$ Па·с; $h_T = 0,1$ мм – $0,001$ Па·с. Для проникнення на глибину $l = 2$ м динамічна в'язкість η не повинна перевищувати залежно від тиску й тривалості опресування: у тріщини $h_T = 10$ мм –

$0,25$ – 1 Па·с; $h_T = 1$ мм – $0,03$ – $0,1$ Па·с; $h_T = 0,1$ мм – $0,0025$ – $0,01$ Па·с.

Результати досліджень дозволили удосконалити розроблену раніше технологію ремонту тунелів шляхом ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за їх обробку (рис. 5, а) [25] та застосувати її для ремонту не тільки тунелів, а й водопропускних труб, мостових опор (рис. 5, б) [26].

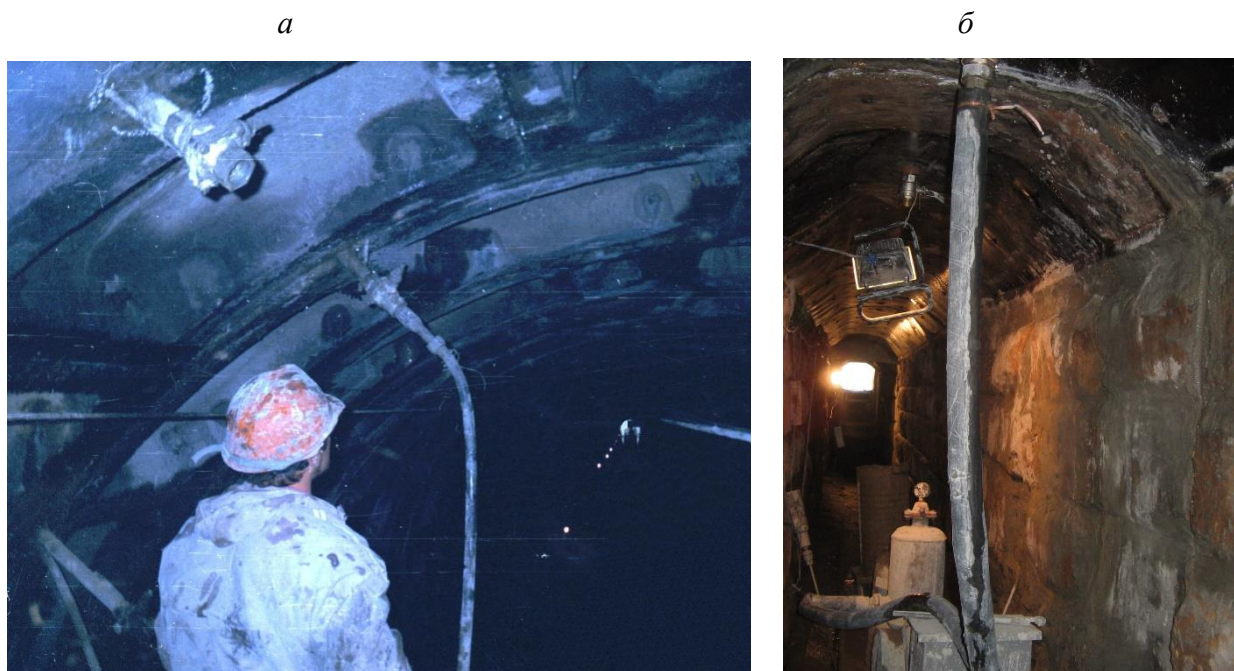


Рис. 5. Ін'єктування цементного розчину з добавкою-суперпластифікатором:
 а – за обробку залізничного тунелю на 128 км ділянки Самбір-Сянки Львівської залізниці;
 б – в зазор між сталевією оболонкою металоін'єкційної сорочки та обробкою водопропускної труби на 110 км дільниці Харків – Куп'янськ Південної залізниці

Висновки та рекомендації

1. Для аналізу залежності глибини проникнення ін'єкційних цементних розчинів у заобробкові тріщинуваті скельні породи l від природних і технологічних факторів як теоретичні передумови обрано закон в'язкості Ньютона. Визначено фактори, що найбільше впливають на глибину проникнення: ширина розкриття тріщин в породах h_T і тиск підземної води в них P_B , динамічна в'язкість розчину η

(визначається наявністю та вмістом добавки-суперпластифікатора та водоцементним відношенням В/Ц), величина P_i і тривалість t прикладання тиску під час ін'єктування (опресування). Розроблено моделі залежностей l від цих факторів.

2. В результаті дослідження моделей встановлено, що ефективність цементних розчинів без добавок для підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною

породою не може бути високою. Збільшити глибину проникнення цементних розчинів дозволяє застосування добавок-суперпластифікаторів, які знижують їх динамічну в'язкість. Розчин з добавкою проникає у тріщини шириною розкриття 10 мм на глибину 10 м за 0,5–1 хв, у тріщини 1 мм – за 3–7 хв. Тільки такий розчин проникає у тріщини шириною розкриття 0,1 мм, зокрема за 10 хв на 2–2,7 м. Отже, ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами дозволяє ефективно забезпечувати підвищення водонепроникності та несучої здатності обробки спільно з тріщинуватою скельною породою.

3. Встановлено величини динамічної в'язкості η , за яких забезпечується проникнення цементного розчину на глибину 10 м:

у тріщини 10 мм – не більше 0,05 Па·с; 1 мм – 0,01 Па·с; 0,1 мм – 0,001 Па·с. Для проникнення на глибину 2 м η не повинна перевищувати: у тріщини 10 мм – 0,25–1 Па·с; 1 мм – 0,03–0,1 Па·с; 0,1 мм – 0,0025–0,01 Па·с.

4. З урахуванням отриманих результатів удосконалено й опрацьовано технологію ін'єктування цементних розчинів з добавками-суперпластифікаторами за обробку підземних споруд і в масивні конструкції штучних споруд. Технологію рекомендовано застосовувати для гідроізоляції та підвищення несучої здатності конструкцій тунелів, водопропускних труб, мостових опор, для влаштування прокладного шару між залізобетонним безбаластним мостовим полотном і подовжніми балками металевих мостів.

Список використаних джерел

1. Відновлення експлуатаційних властивостей матеріалів і конструкцій / А. М. Плугін, О. А. Калінін, С. І. Возненко, А. А. Плугін, С. В. Мірошніченко. Харків: ХарДАЗТ, 1999. Ч. 1. 117 с.; Ч. 2. 86 с.
2. Плугін А. А., Трикоз Л. В. Відновлення експлуатаційних властивостей основ, фундаментів, заглиблених і підземних споруд. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 141 с.
3. Гидроизоляция обводненных тоннелей / А. Н. Плугин, Арт. Н. Плугин, С. В. Мирошніченко та ін. *Автомобільні дороги та дорожнє будівництво*. 2000, № 59. С. 182–186.
4. Бетоны и растворы для восстановления эксплуатационных свойств транспортных сооружений / А. А. Плугин, А. Н. Плугин, О. А. Калинин та ін. *Будівельні конструкції*. 2009. Вип. 72. С. 357–370.
5. Петренко В. И., Петренко В. Д., Тюткин А. Л. Современные технологии строительства метрополитенов. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. 252 с.
6. Petrenko V., Tiutkin O., Heletiuk I., Tkach T. The new approach in evaluating the mechanism of the blast effect and organizing the blasting operations while tunneling. *E3S Web of Conferences*. 2020. 168. 00034.
7. Goncharenko D., Starkova O., Aleinikova A., Kolomiiets Y., Greenchuk O. Efficient method of eliminating accidental damage of sewer tunnel. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230. 02011.
8. Goncharenko D., Shumakov I., Starkova O., Aleinikova A., Mikautadze R. Methodological and computer-based support for choosing underground utility networks renovation method. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 230. 02010.
9. Goncharenko D., Bondarenko D., Starkova O. Repair and refurbishment technologies for inspection shafts in deep-level sewer tunnels. *World Journal of Engineering*. 2018. 15(1). P. 48–53.
10. Булатов А. И. Тампонажные материалы и технология цементирования скважин. Москва: Недра, 1971. 328 с.

11. Polozov Ju. A., Spichak Ju. N., Lagunov V. A. Advanced grouting of 960-m-level shaft station in nagolchanskaya mine. *International Journal of Mine Water*. 1985. 4(1). P. 33–42.
12. Kipko B. Ja., Polozov Ju. A., Spichak Ju. N. Hydrosealing and consolidation of geological faults during tunnel driving. *International Journal of Mine Water*. 1984. 3(3). P. 35–41.
13. Физико-химическая механика тампонажных растворов / Н. Н. Круглицкий, И. Г. Гранковский, Г. Р. Вагнер, В. П. Детков. Київ: Наукова думка, 1974. 289 с.
14. Проницаемость гидроизоляционных составов при нагнетании в трещины скальных пород / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин та ін. *Науковий вісник будівництва*. 1999. Вип. 5. С. 31–37.
15. Експериментальні дослідження проникної здатності тампонажних розчинів / А. М. Плугін, О. А. Калінін, Арт. М. Плугін та ін. *Зб. наук. праць ХарДАЗТ*. 2000. Вип. 37. С. 3–13.
16. Количественное описание реологических характеристик цементно-водных суспензий и механизма действия на них суперпластификаторов / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Д. В. Шумик та ін. *Науковий вісник будівництва*. 2001. Вип. 12. С. 173–189.
17. Цементация межтрубного зазора при ремонте коллекторов водоотведения методом вставок / А. Н. Плугин, И. В. Коринько, А. А. Плугин та ін. *Науковий вісник будівництва*. 2002. Вип. 19. С. 162–166.
18. Увеличение проникающей способности жидкого стекла в песчаный грунт / А. Н. Плугин, О. С. Герасименко, Л. В. Трикоз, А. А. Плугин. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2007. Вип. 87. С. 108–120.
19. Донец А. В., Плугин А. А., Титов Д. М. Применимость методов контроля качества строительных смесей для систем управления их приготовлением. *Науковий вісник будівництва*. 2002. Вип. 16. С. 100–105.
20. Контроль технологичности строительных смесей с помощью прибора ЭШ-1 / А. В. Донец, В. И. Бабушкин, А. А. Плугин та ін. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2003. № 5. Ч. I. С. 40–45.
21. Plugın A., Trykoz L., Donets O., Nykytynskyj A., Pluhin A. Diagnostics and regulation of rheological characteristics for injection mortars by electromechanical sensors. *E3S Web of Conferences*. 2020. 166. 06006.
22. Plugın A., Trykoz L., Donets O., Nykytynskyj A., Pluhin A. Diagnostics and regulation of rheological characteristics for injection mortars by electromechanical sensors. *E3S Web of Conferences*. 2020. 166. 06006. DOI: 10.1051/e3sconf/202016606006.
23. Grankovskii I. G., Maul' V. P. Modification of the mixing solution for preparing a concrete mix. *Journal of applied chemistry of the USSR*. 1987. 60(4 pt 2). P. 805–808.
24. Вагнер Г. Р. Физико-химия процессов активации цементных дисперсий. Київ: Наукова думка, 1980. 200 с.
25. Інструкція щодо виконання робіт з нагнітання розчинів за обробку тунелів (ЦП-0136) / УкрДУЗТ. Київ: ЦП УЗ. 2006. 108 с.
26. Нові конструктивно-технологічні рішення ремонту залізобетонних і кам'яних мостів і водопропускних труб: Досвід експлуатації після ремонту / А. А. Плугін, С. В. Мірошніченко, О. А. Калінін та ін. *Українська залізниця*. 2018. №6 (60). С. 19–24.

Плугін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Тел.: (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Калінін Олег Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0003-3063-5659. Тел.: (057) 730-10-68. E-mail: kalinin@kart.edu.ua.

Мірошніченко Сергій Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Тел.: (057) 730-10-64. E-mail: Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Зверева Аліна Сергіївна, асистент кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4832-3760. Тел.: (057) 730-10-25. E-mail: zveirievaAS@kart.edu.ua.

Голіней Василь Михайлович, магістрант, група 223-3С-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту.

Ляхов Максим Сергійович, магістрант, група 223-3С-Д19 Українського державного університету залізничного транспорту.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Tel. (057) 730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Kalinin Oleh, PhD (Tech). Associate Professor, department building materials and structures department Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3063-5659. Tel.(057) 730-10-68.

E-mail: kalinin@kart.edu.ua.

Miroshnichenko Sergii, PhD (Tech). Associate Professor, department building materials and structures department Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Tel. (057) 730-10-64.

E-mail: Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Zvierieva Alina S., assistant, Railway Track and Transport Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4832-3760. Tel.: (057) 730-10-25. E-mail: zveirievaAS@kart.edu.ua.

Holinei Vasyl, master, Group 223- 3С-Д19, Ukrainian State University of Railway Transport.

Liakhov Maksym, master, Group 212-3С-Д19, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 13.04.2021 р.