

І. В. Коц, к. т. н., проф.; Н. П. Бадьора

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦЕМЕНТАЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ ІМПУЛЬСНИМ ІН'ЄКТУВАННЯМ

В статті наведено результати експериментальних досліджень підсилення несучих основ споруд із використанням динамічного тиску ін'єктування. Отримані результати підтвердили ефективність імпульсного ін'єктування і довели, що пульсаційна подача розчину сприяє збільшенню проникнення до (30%) порівняно з використанням статичного тиску ін'єктування. Виконано аналіз досліджень імпульсного ін'єктування розчинів у різні структури ґрунту та встановлено оптимальні параметри процесу.

Ключові слова: імпульсне ін'єктування розчину, несуча здатність, фундамент, радіус розповсюдження, глибина ін'єктування, динамічний тиск, частота пульсації.

Вступ

Наявність великої кількості старих будівель зумовлює необхідність постійного моніторингу несучої здатності основних конструктивних елементів цих будівель та їх основ. Як показує практика, дуже часто виникає необхідність підсилення фундаментів і несучих основ будинків і споруд. Останнім часом широкого використання набув метод підсилення несучих основ, що передбачає ін'єктування високонапірного розчину в товщу ґрунтового масиву під певним статичним тиском [1 – 3]. Цей метод має низку вагомих переваг: виключає динамічні навантаження на основу, що виникають під час влаштуванні забивних паль; його можна використовувати в будь-яких ґрунтових умовах, а також в умовах щільної забудови. На сьогодні проблема закріплення ґрунтів є актуальною і потребує подальшого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що ін'єктування основ проводили тільки під статичним (постійним) тиском нагнітання [2 – 4], що не завжди забезпечує якісне проникнення й поширення розчину в товщі ґрунтового масиву, а як наслідок, не гарантує необхідну несучу здатність масиву.

Основна частина

Для підвищення ефективності ін'єкційного способу підсилення ґрунтових основ авторами було запропоновано спосіб використання додаткової пульсації робочого тиску, створюваної спеціальним генератором гідравлічних імпульсів, на стаціонарний потік нагнітання цементного розчину.

Для проведення експериментальних досліджень був розроблений експериментальний стенд (рис. 1) [5, 6], який працює так. Після увімкнення розчинонасоса 3 ін'єктувальний розчин під заданим тиском подається по трубопроводу і заповнює резервуар для подачі ін'єктувального розчину 1. Під дією робочого тиску, створюваного компресором 10, здійснюється подача ін'єктувального розчину через зворотний клапан по трубопроводу 2 в технологічну камеру 5, а далі по трубопроводу 12 до внутрішньої порожнини ін'єктора 11 і в пори ґрунтового матеріалу, який розташований в резервуарі 7.

Після увімкнення привідного насоса гідросистеми 8 робоча рідина під заданим тиском потрапляє в порожнину 4 гідроциліндра 13. Тиск робочої рідини зростає до певного граничного значення, на яке налаштований генератор гідравлічних імпульсів 9. Під дією сили тиску робочої рідини на ефективну площу плунжера 6 він переміщується вправо і створює додаткове навантаження на замкнутий об'єм ін'єктувального розчину, який розміщений у камері 5. У результаті цього додаткова порція ін'єктувального розчину по

трубопроводу 12 нагнітається через ін'єктор 11 в ґрунтовий масив. Після досягнення заданого критичного тиску робочої рідини в порожнині 4 відбувається спрацювання імпульсного клапана 9. При цьому тиск робочої рідини в приводній гідросистемі 8 падає, а робоча рідина віддаляється на злив. Далі процес повторюється в автоматичному режимі.

Експериментальне дослідження проводилося на трьох типах ґрунтових основ: пісок, супісок та суглинок. Фізико-механічні характеристики ґрунтових основ такі:

а) для піску: питома вага ґрунту – $18,1 \text{ кН/м}^3$; коефіцієнт фільтрації – $9,0 \text{ м/добу}$; модуль деформації – $15,3 \text{ МПа}$; питоме щеплення – $8,1 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя – $27,8 \text{ град}$;

б) для супіску: питома вага ґрунту – $18,6 \text{ кН/м}^3$; коефіцієнт фільтрації – $0,48 \text{ м/добу}$; модуль деформації – $12,5 \text{ МПа}$; питоме щеплення – $19,2 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя – $25,3 \text{ град}$;

в) для суглинку: питома вага ґрунту – $19,4 \text{ кН/м}^3$; коефіцієнт фільтрації – $0,04 \text{ м/добу}$; модуль деформації – $9,5 \text{ МПа}$; питоме щеплення – $26,8 \text{ кПа}$; кут внутрішнього тертя – $18,2 \text{ град}$.

Як ін'єктувальний розчин використовували цементний розчин з водоцементним відношенням $\text{В:Ц}=1$. Під час проведення експериментальних досліджень робочий тиск варіювався від $0,2$ до $0,4 \text{ кГс/см}^2$, частота повторення гідравлічних імпульсів тиску змінювалася від 5 до 10 Гц . Окрім того, змінювався об'єм розчину, який нагнітали в ґрунт.

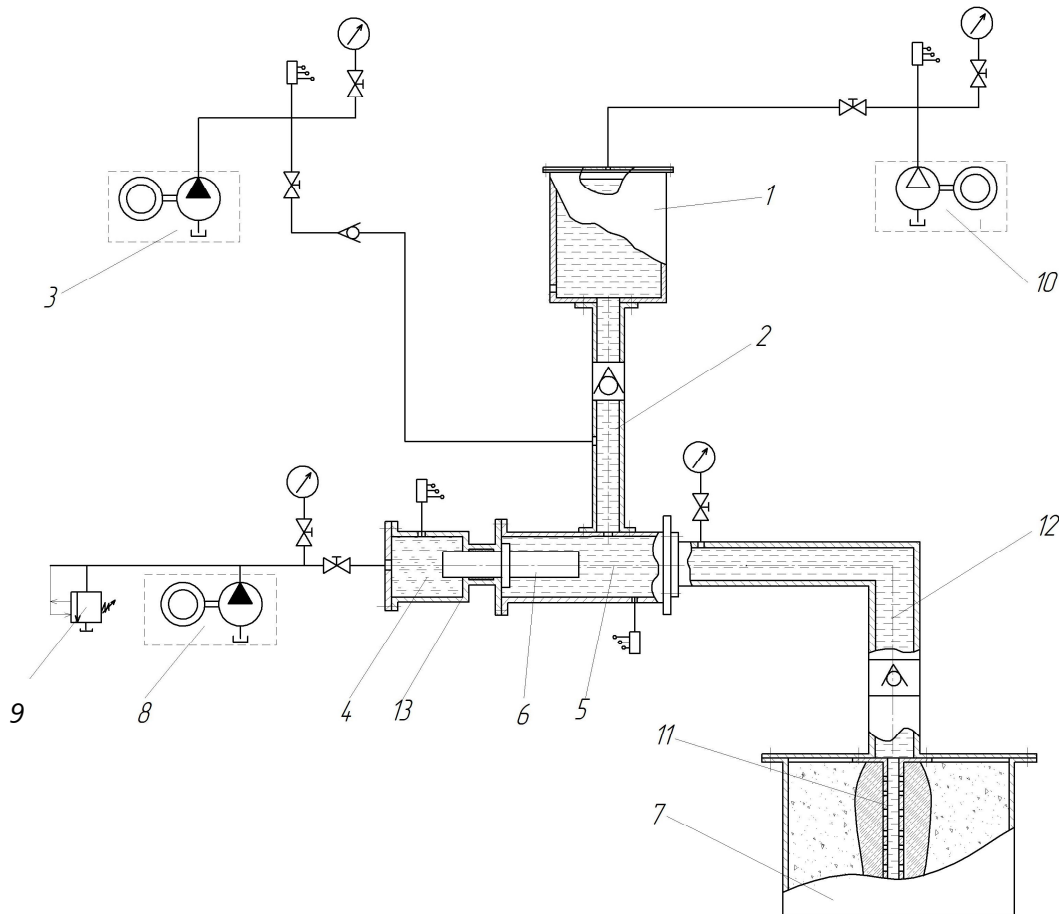


Рис. 1. Загальний вигляд експериментального стенду зі складовими вузлами: 1 – резервуар для подачі ін'єктувального розчину; 2, 12 – трубопроводи; 3 – розчинонасос; 4 – робоча камера; 5 – технологічна камера; 6 – плунжер; 7 – резервуар, заповнений пористим ґрунтовим матеріалом; 8 – гідропривідна станція; 9 – імпульсний клапан; 10 – компресор; 11 – ін'єктор; 13 – гідроциліндр



Рис. 2. Визначення радіуса розповсюдження розчину отриманого експериментального зразка за тиску нагнітання $p = 0,3 \text{ кГс/см}^2$ з частотою пульсації 10 Гц

Дослідження проводили у два етапи [7]. На першому етапі нагнітання розчину здійснювалося під постійним (статичним) тиском. Отримані зразки представлено на рис. 3, в). На другому етапі на стаціонарний потік розчину накладали періодичні імпульси тиску. Експериментальні зразки представлено на рис. 3 а), б). У процесі проведення експериментів усі отримані зразки мали міцну суцільну структуру.

Як видно з рис. 3, найкращу проникність розчину спостерігаємо за частоти пульсації 10 Гц. Це можна пояснити тим, що за рахунок використання гідравлічних імпульсів тиску в потоці цементного розчину зменшуються сили тертя між ґрунтовою основою та цементним розчином, що сприяє збільшенню площі розтікання розчину і збільшенню радіуса його розповсюдження. Унаслідок цього збільшується несуча здатність насиченого ґрунту. Імпульсне ін'єктування дозволяє нагнітати в 1,8 – 2,2 рази більше цементного розчину порівняно з традиційним статичним ін'єктуванням.



Рис. 3. Отримані експериментальні зразки: а) за частоти пульсації 10 Гц; б) за частоти пульсації 5 Гц; в) за постійного тиску ін'єктування

Порівняльна таблиця зміни радіуса розповсюдження розчину під час різних режимів ін'єктування

Тиск ін'єктування	Статичне ін'єктування	Імпульсне ін'єктування $\omega=5$ Гц	Імпульсне ін'єктування $\omega=10$ Гц
пісок			
$p=0,2$ кгс/см ²	64 мм	84 мм	108 мм
$p=0,3$ кгс/см ²	78 мм	96 мм	118 мм
$p=0,4$ кгс/см ²	86 мм	106 мм	124 мм
супісок			
$p=0,2$ кгс/см ²	53 мм	74 мм	92 мм
$p=0,3$ кгс/см ²	62 мм	88 мм	102 мм
$p=0,4$ кгс/см ²	70 мм	93 мм	110 мм
суглинок			
$p=0,2$ кгс/см ²	29 мм	40 мм	56 мм
$p=0,3$ кгс/см ²	34 мм	46 мм	64 мм
$p=0,4$ кгс/см ²	38 мм	53 мм	74 мм

Після проведення експериментальних досліджень визначили радіус розповсюдження розчину за різних режимів ін'єктування (рис. 3). Результати зміни радіуса розповсюдження представлено в таблиці 1. Як видно із запропонованої таблиці, під час використання імпульсного ін'єктування за частоти пульсації 5 Гц можна збільшити радіус розтікання розчину в середньому на 25 – 30%, а за частоти пульсації 10 Гц радіус збільшується в середньому на 35 – 40%. Варіюючи частоту пульсації цементного розчину, можна прогнозувати забезпечення необхідного радіусу розтікання в ґрунтовій основі.

На основі експериментальних досліджень побудовано графіки зміни радіуса розповсюдження розчину від тиску ін'єктування (рис. 4 – 6). Як видно із запропонованих графіків, максимальний радіус поширення розчину спостерігаємо за частоти пульсації 10 Гц при всіх значеннях зміни тиску. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що зі збільшенням частоти пульсації збільшується проникність розчинів і збільшується площа їх розтікання. За умови практичного використання імпульсного ін'єктування слід пам'ятати, що частоту пульсації розчину можна збільшувати лише до певного граничного значення, за якого спостерігатимуть подальший гідророзрив пористого середовища.

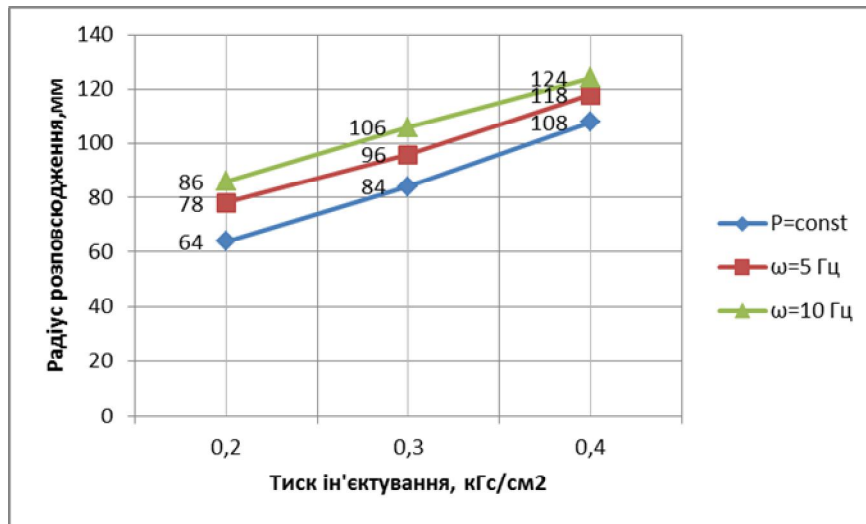


Рис. 4. Графік залежності зміни радіуса розповсюдження розчину від динамічного тиску ін'єктування для піску

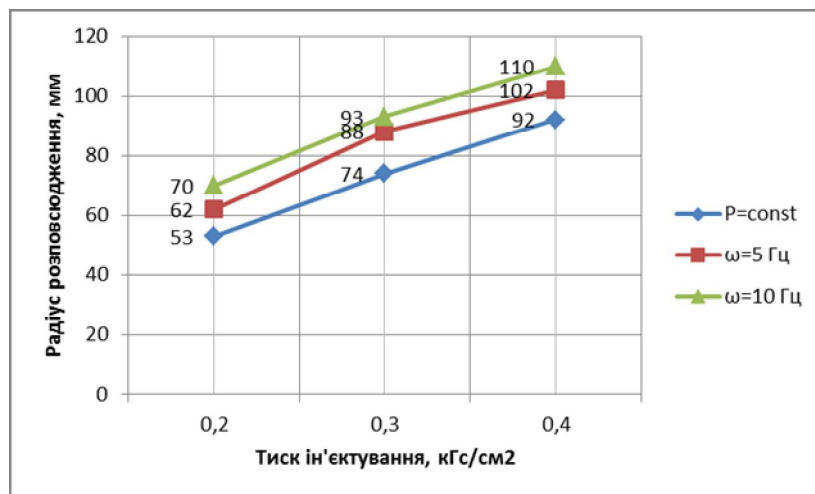


Рис. 5. Графік залежності зміни радіуса розповсюдження розчину від динамічного тиску ін'єктування для супіску

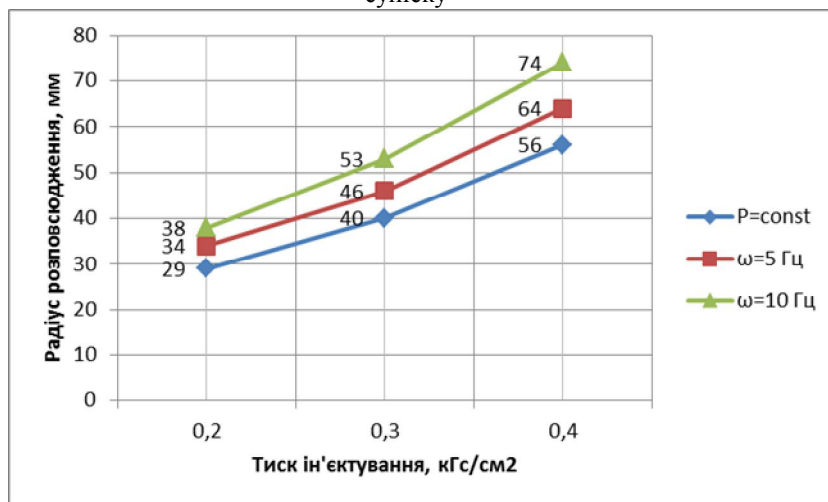


Рис. 6. Графік залежності зміни радіуса розповсюдження розчину від динамічного тиску ін'єктування для суглинку

Висновок

1. Проведено експериментальну перевірку функціонування запропонованого гідроімпульсного обладнання, кількісне і якісне оцінювання параметрів та характеристик нагнітання технологічних розчинів в ґрунтовий масив, які підтвердили ефективність запропонованого обладнання.

2. Зіставлення результатів експериментальних досліджень, яке проводили відповідно до аналізу отриманих тіл заповнення (рис. 2, 3), показало, що імпульсне нагнітання ін'єктувальних розчинів у масив більш ефективне порівняно зі статичним, причому за умови збільшення частоти пульсації розчину збільшується його поширення в товщі ґрунтового масиву. Зрештою, під час практичного застосування це може гарантувати високу міцність ґрунтового масиву й значну несучу здатність основи.

3. Експериментальні дослідження показали, що імпульсне ін'єктування дозволяє в 1,8 – 2,2 рази нагнати більше цементного розчину порівняно зі статичним. При цьому спостерігають збільшення радіуса розповсюдження розчину в середньому на 30 – 40% порівняно з традиційним статичним ін'єктуванням, що суттєво впливає на стійкість і несучу здатність основи, що закріплюється.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богомолов В. А. Метод высоконапорной инъекции связных грунтов при устройстве и усилении оснований и фундаментов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.23.02 «Основания и фундаменты» / В. А. Богомолов. – Пермь, 2002. – 18 с.

2. Зоценко М. Л. Використання методу електрохімічного закріплення ґрунту при підсиленні основ і фундаментів у процесі реконструкції будівель і споруд. / М. Л. Зоценко, Ю. В. Алпатов // Будівельні конструкції. – 2007. – Вип. 57. – С. 367 – 374.

3. Головки С. И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной цементации: Монография. / Головки С. И. – Днепропетровск: Пороги, 2010. – 247 с.

4. Ланис А. Л. Упрочнение грунтов методом напорных инъекций / А. Л. Ланис, В. И. Пусков, М. Я. Крицкий, В. Ф. Скоркин // Строительные конструкции. – 2004. - №61, т. 2. - С. 53 – 58.

5. Пат. № 79358 У Україна, МПК⁸ Е 02 D 3/12, Е 02 D 5/42. Ін'єкційний спосіб укріплення ґрунтів / Коц І. В., Бадьора Н. П.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u 2012 09822 ; заявл. 14.08.12 ; опубл. 25.04.13, Бюл. № 8.

6. Патент № 81613 Україна, МПК⁸ Е 02 D 5/46. Ін'єктор для закріплення несучих основ споруд / Коц І. В., Бадьора Н. П.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201214112 ; заявл. 11.12.12 ; опубл. 10.07.13. Бюл. № 13.

7. Експериментальне дослідження процесу імпульсного нагнітання сумішей в ґрунтовий масив : (Сборник материалов международной научно-практической конференции "Научный потенциал мира") [Електронний ресурс] / Н. П. Бадьора, І. В. Коц // Научный потенциал мира. Строительство и архитектура – 2011. – том 2. – с. 71 – 73.: – Режим доступу : http://www.rusnauka.com/27_NNM_2011/Stroitelstvo/3_93298.doc.htm.

Коц Іван Васильович – к. т. н., професор кафедри теплогазопостачання.

Бадьора Наталя Петрівна – аспірант кафедри теплогазопостачання.
Вінницький національний технічний університет.

I. V. Kotz, Cand. Sc. (Eng.), Prof.; N. P. Badiora

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SOIL STABILIZATION BY CEMENT PULSE INJECTION

The paper contains the results of experimental research dealing with the study of soil foundations carrying capacity stabilization using injection dynamic pressure. The results obtained proved the efficiency of pulse injection and showed that pulsing supply of the mortar provides 30% increase of its spreading, as compared with the usage of injection static pressure. The analysis of the study of mortars pulse injection in various soil structures has been performed, optimal parameters of the process are determined.

Key words: pulse injection of the mortar, carrying capacity, foundation, spreading radius, depth of injection, dynamic pressure, pulsation frequency.

Introduction

Numerous old buildings require constant monitoring of carrying capacity of main constructive elements of these buildings and their foundations. Practical experience shows that there exists the necessity to strengthen foundations and carrying basements of building and constructions. Recently, method of soil base strengthening and establishment of new foundations in condition of building density, providing the injection of high-pressure mortar in the depth of soil mass under certain static pressure has been widely used [1 – 3]. This method has a number of important advantages: it excludes dynamic loads on the foundation, emerging while driving piles; it can be used in any soil conditions and in conditions of dense building. Nowadays the problem of soil stabilization is actual and requires further research.

Analysis of the recent research and publications showed that the injection of foundations was carried out under the static (constant) pressure [2 – 4], it does not always provide high quality penetration and spreading of mortar in the depth of soil mass, and, as a result, does not ensure the necessary carrying capacity of the mass.

Main part

To improve the efficiency of injection method of soil foundations stabilization, the authors suggested the method of usage of additional pulsation of operation pressure, created by special generator of hydraulic pulses, on stationary flux of cement mortar delivery.

For carrying out experimental research experimental stand was developed (Fig. 1) [5, 6], it operates in the following way. When mortar pump 3 is switched on, injecting mortar under the preset pressure is fed across the pipeline and fills up the tank for injecting mortar supply 1. Under the action of working pressure, created by the compressor 10, the supply of injecting mortar across the check valve along the pipeline 2 in technological chamber 5 and further along the pipeline 12 to internal cavity of the injector 11 and pores of soil material, located in the tank 7 is performed.

When the pump of drive hydraulic system 8 working fluid under the preset pressure enters the cavity 4 of hydraulic cylinder 13. The pressure of the working fluid increases to certain boundary value, at which generator of hydraulic pulses 9 is adjusted. Under the action of working fluid pressure on the area of the plunger 6, it moves to the right and creates additional load on the closed volume of the injecting mortar, located in the chamber 5. As a result, additional portion of injecting mortar in the pipeline 12 is pushed across the injector 11 into the soil mass. When critical pressure of working fluid is achieved, the pulse valve 9 operates in the cavity 4. The pressure of working fluid in drive hydraulic system 8 drops and working fluid is removed to discharge. Further the process is repeated in automatic mode.

Experimental research were carried out at three types of soil foundations: sand, sand loam and loam. Soil foundations had the following physical-mechanical characteristics:

a) for sand: specific weight – 18.1 KN/m³; filtration factor – 9.0 m/day; deformation modulus – 15.3 MPa; specific adhesion – 8.1 kPa; angle of internal friction – 27.8 degr;

b) for sand loam: specific weight – 18.6 KN/m³; filtration factor – 0.48 m/day; deformation modulus – 12.5 MPa; specific adhesion – 19.2 kPa; angle of internal friction – 25.3 degr;

c) for loam: specific weight – 19.4 KN/m³; filtration factor – 0.04 m/day; deformation modulus – 9.5 MPa; specific adhesion – 26.8 kPa; angle of internal friction – 18.2 degr.

As injecting mixture, cement mortar was used, ratio water/cement=1. While performing the experiments, working discharge pressure varied within the range 0.2 – 0.4 kgf/cm², frequency of pressure hydraulic pulses repetition varied from 5 to 10 Hz. Besides, the volume of injected mortar in soil mass also changed.

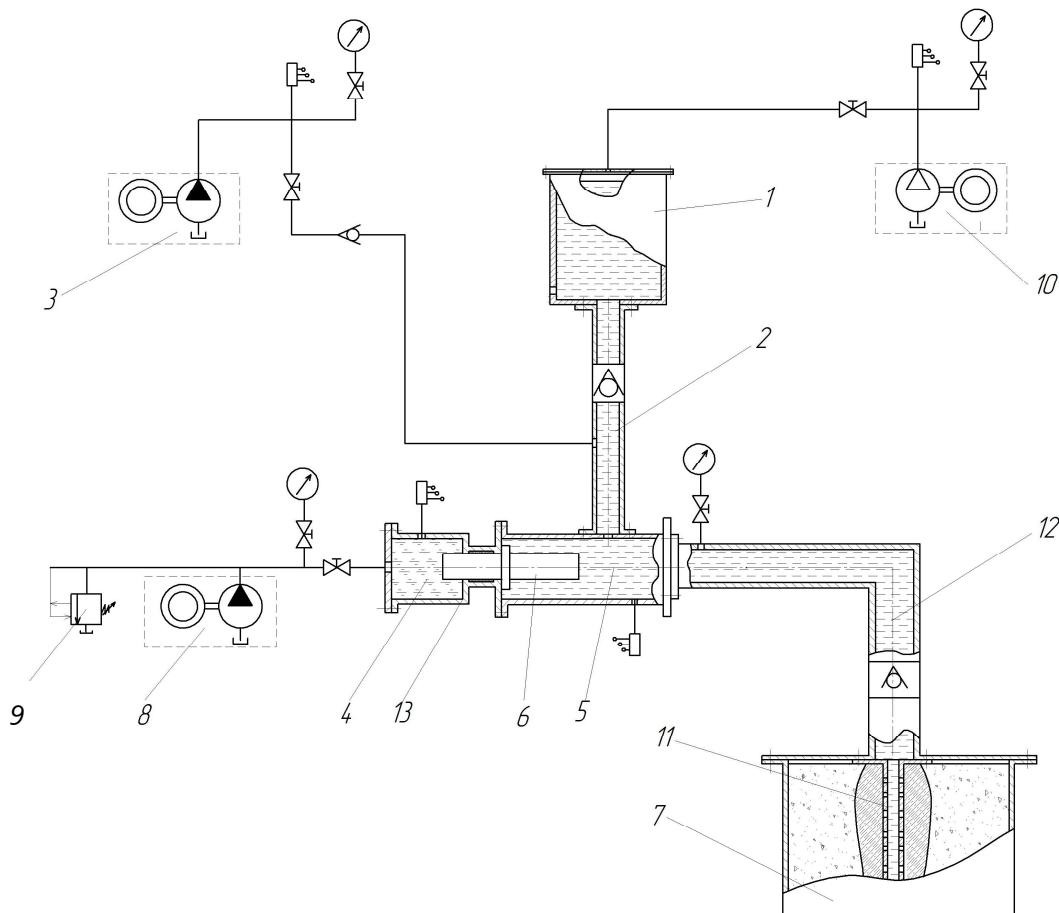


Fig. 1. General view of experimental stand and its components: 1 – vessel for injection mortar supply; 2, 12 – pipe-lines; 3 – mortar pump; 4 – working chamber; 5 – technological chamber; 6 – plunger; 7 – tank, filled with porous soil material; 8 – hydraulic-drive station; 9 – pulse valve; 10 – compressor; 11 – injector; 13 – hydraulic cylinder



Fig. 2. Determination of spreading radius of the mortar of obtained experimental sample under discharge pressure $p = 0,3 \text{ kgf/cm}^2$ with pulsation frequency 10 Hz

Studies were performed in two stages [7]. At the first stage mortar injection was performed under constant (static) pressure. The obtained samples are shown in Fig. 3, c). At the second stage pulsation was imposed on stationary flux of mortar, supplied at the working pressure. The obtained samples are shown in Fig. 3 a), b), correspondingly. While performing the experiments all the obtained experimental samples had solid structure.

As it is seen from Fig. 3 permeability of the mortar was observed at pulsation frequency of 10 Hz. It can be explained by the fact, that as a result of hydraulic pulses application the forces of friction between soil foundation and injected mortar are reduced in the flux of cement mortar, that causes the increase of mortar spreading area and increase the radius of its spreading. As a result, carrying capacity of saturated soil increases. Pulse injection enables to discharge under pressure 1.8 – 2.2 times more cement mortar as compared with conventional static injection.

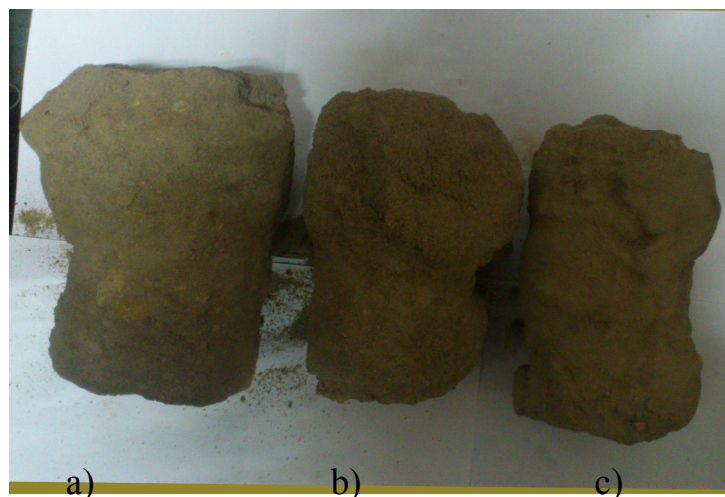


Fig. 3. Obtained experimental specimen: a) at injection frequency 10 Hz; b) at injection frequency 5 Hz; c) at constant injection pressure

Table 1

Comparative table of mortar spreading radius change at various injection modes

Injection pressure	Static pressure	Pulse injection $\omega=5 \text{ Hz}$	Pulse injection $\omega=10 \text{ Hz}$
sand			
$p=0,2 \text{ kgf/cm}^2$	64 mm	84 mm	108 mm
$p=0,3 \text{ kgf/cm}^2$	78 mm	96 mm	118 mm
$p=0,4 \text{ kgf/cm}^2$	86 mm	106 mm	124 mm
sand loam			
$p=0,2 \text{ kgf/cm}^2$	53 mm	74 mm	92 mm
$p=0,3 \text{ kgf/cm}^2$	62 mm	88 mm	102 mm
$p=0,4 \text{ kgf/cm}^2$	70 mm	93 mm	110 mm
loam			
$p=0,2 \text{ kgf/cm}^2$	29 mm	40 mm	56 mm
$p=0,3 \text{ kgf/cm}^2$	34 mm	46 mm	64 mm
$p=0,4 \text{ kgf/cm}^2$	38 mm	53 mm	74 mm

After carrying out experimental research determination of mortar spreading radius at various injection modes was performed (Fig. 3). The results of spreading radius change are shown in Table 1. As it is seen from the Table, while using pulse injection at pulsation frequency 5 Hz, it is possible to increase the radius of mortar spreading on average 25 – 30%, and if pulsation frequency is 10 Hz, then the radius increases on average 35 – 40%. Varying the pulsation frequency of cement mortar we can forecast the necessary radius of its spreading in soil foundation.

On the basis of experimental research, carried out, graphs of the radius of mortar spreading change, depending on injection pressure (Fig. 4 – 6) were constructed. As it is seen from the given graphs, maximal radius of mortar spreading is observed at pulsation frequency of 10 Hz at all values of pressure change. Proceeding from the results obtained, the conclusion can be drawn that the permeability of mortars and the area of their spreading increases with the increase of pulsation frequency. For practical application of pulse injection it should be noted that pulsation frequency of the mortar can be increased only till certain limiting value, at which further hydraulic break of porous medium occurs.

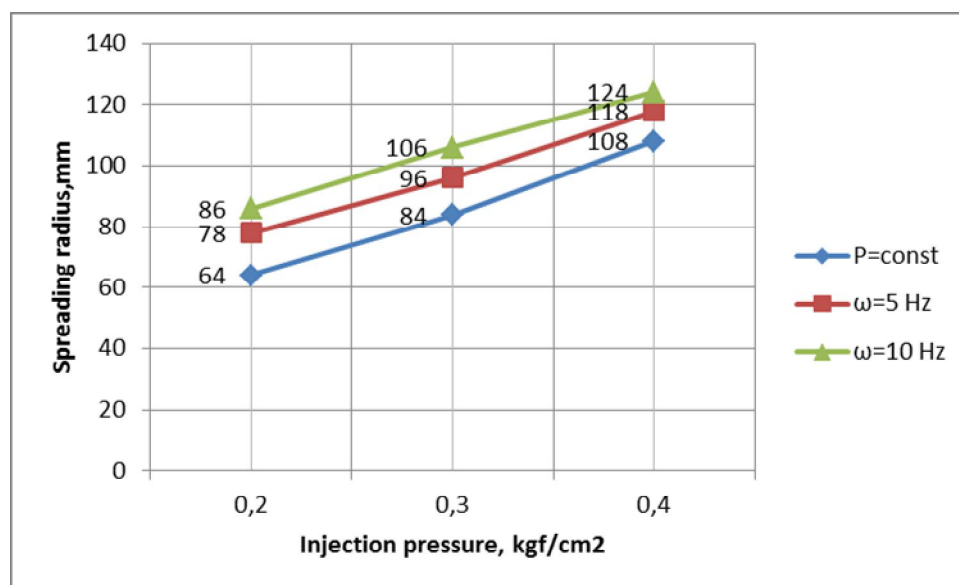


Fig. 4. Graph of mortar spreading radius change dependence on injection dynamic pressure for sand

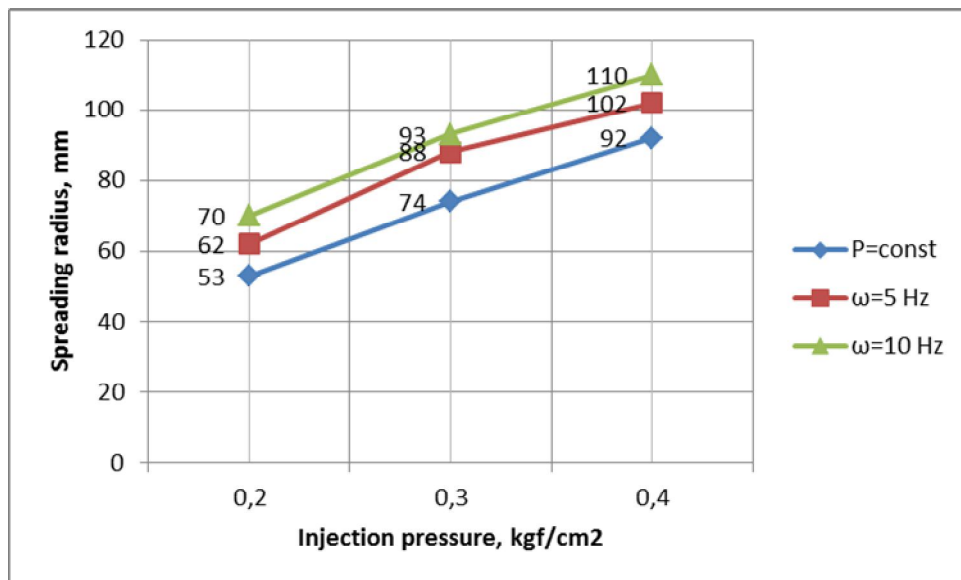


Fig. 5. Graph of mortar spreading radius change dependence on injection dynamic pressure for sand loam

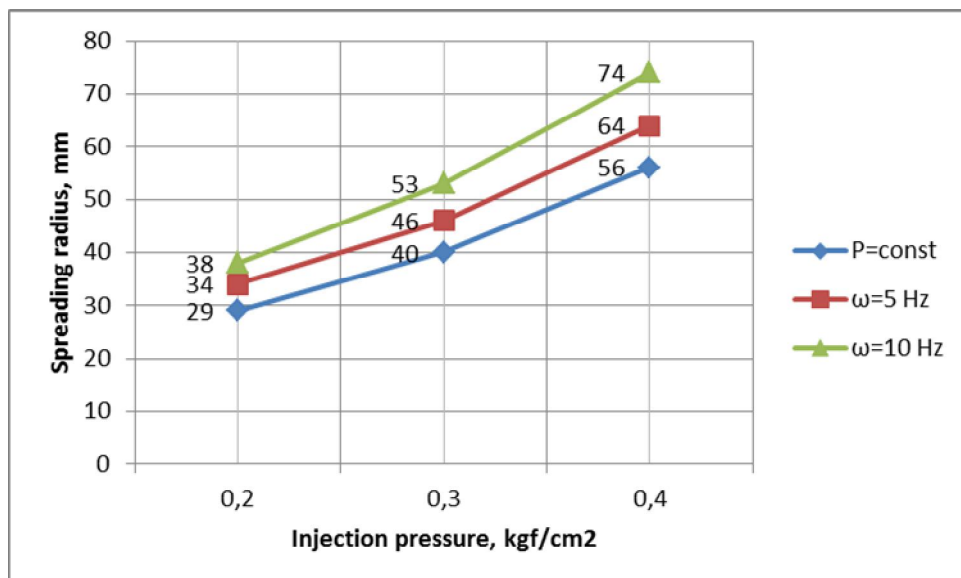


Fig. 6. Graph of mortar spreading radius change dependence on injection dynamic pressure for loam

Conclusion

1. Experimental verification of the suggested hydraulic pulse equipment has been carried out, quantitative and qualitative evaluation of parameters and characteristics of technological mortars discharge under pressure into soil mass has been performed, the verification, carried out proved the efficiency of the equipment.

2. Comparison of research results, carried out in accordance with the analysis of formed filling bodies (Fig. 2, 3) showed that pulse discharge of injecting mortars in the mass is more efficient as compared with static one, at the increase of pulsation frequency of the mortar, its spreading in the depth of soil mass also increases. Finally, in practical application this may ensure high strength of reinforced soil mass and greater carrying capacity of bases and foundations.

3. Experimental research showed that pulse injection enables to discharge under pressure 1.8 – 2.2 times more cement mortar as compared with the static injection. The increase of mortar spreading radius on average by 30 – 40% as compared with conventional static injection is observed, that considerably influences the stability and carrying capacity of stabilized soil mass.

REFERENCES

1. Богомолов В. А. Метод высоконапорной инъекции связных грунтов при устройстве и усилении оснований Наукові праці ВНТУ, 2014, № 1

и фундаментов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.23.02 «Основания и фундаменты» / В. А. Богомолов. – Пермь, 2002. – 18 с.

2. Зоценко М. Л. Використання методу електрохімічного закріплення ґрунту при підсиленні основ і фундаментів у процесі реконструкції будівель і споруд. / М. Л. Зоценко, Ю. В. Алпатов // Будівельні конструкції. – 2007. – Вип. 57. – С. 367 – 374.

3. Головки С. И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной цементации: Монография. / Головки С. И. – Днепропетровск: Пороги, 2010. – 247 с.

4. Ланис А. Л. Упрочнение грунтов методом напорных инъекций / А. Л. Ланис, В. И. Пусков, М. Я. Крицкий, В. Ф. Скоркин // Строительные конструкции. – 2004. - №61, т. 2. - С. 53 – 58.

5. Пат. № 79358 U Україна, МПК⁸ E 02 D 3/12, E 02 D 5/42. Ін'єкційний спосіб укріплення ґрунтів / Коц І. В., Бадьора Н. П.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u 2012 09822 ; заявл. 14.08.12 ; опубл. 25.04.13, Бюл. № 8.

6. Патент № 81613 Україна, МПК⁸ E 02 D 5/46. Ін'єктор для закріплення несучих основ споруд / Коц І. В., Бадьора Н. П.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201214112 ; заявл. 11.12.12 ; опубл. 10.07.13. Бюл. № 13.

7. Експериментальне дослідження процесу імпульсного нагнітання сумішей в ґрунтовий масив : (Сборник материалов международной научно-практической конференции "Научный потенциал мира") [Електронний ресурс] / Н. П. Бадьора, І. В. Коц // Научный потенциал мира. Строительство и архитектура – 2011. – том 2. – с. 71 – 73.: – Режим доступа : http://www.rusnauka.com/27_NNM_2011/Stroitelstvo/3_93298.doc.htm.

Kotz Ivan – Cand. Sc. (Eng.), Professor with the Department of Heat Gas Supply.

Badiora Nataliya – Post-Graduate with the Department of Heat Gas Supply.
Vinnitsia National Technical University.