

И. В. Коц, к. т. н., проф.; Н. П. Бадёра

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕМЕНТАЦИОННОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ИМПУЛЬСНЫМ ИНЪЕКТИРОВАНИЕМ

В статье предложены результаты экспериментальных исследований усиления несущей способности грунтовых оснований с использованием динамического давления инъектирования. Полученные результаты подтвердили эффективность импульсного инъектирования и показали, что пульсационная подача раствора способствует увеличению проникновения (до 30%) по сравнению с использованием статического давления инъектирования. Проведен анализ исследований импульсного инъектирования растворов в разные структуры грунтового массива и установлены оптимальные параметры процесса.

Ключевые слова: импульсное инъектирование раствора, несущая способность, фундамент, радиус распространения, глубина инъектирования, динамическое давление, частота пульсации.

Введение

Наличие большого количества старых зданий обуславливает необходимость постоянного мониторинга несущей способности основных конструктивных элементов этих зданий и их оснований. Как показывает практика, очень часто возникает необходимость усиления фундаментов и несущих оснований зданий и сооружений. В последнее время широкое использование получил метод усиления несущих оснований, предусматривающий инъектирование высоконапорного раствора в толщу грунтового массива под определенным статическим давлением [1 – 3]. Этот метод имеет ряд весомых преимуществ: исключает динамические нагрузки на основание, возникающие при устройстве забивных свай; его можно использовать в любых грунтовых условиях и в условиях плотной застройки. На сегодняшний день проблема закрепления грунтов является актуальной и требует дальнейшего исследования.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что инъектирование укрепляющих растворов в грунтовые основания проводится в основном только под статическим (постоянным) давлением [2 – 4], что не всегда обеспечивает качественное проникновение и распространение раствора в толще грунтового массива, а также, как следствие, не гарантирует необходимую несущую способность массива.

Основная часть

Для повышения эффективности инъекционного способа усиления грунтовых оснований авторами предложен способ использования дополнительной пульсации рабочего давления, создаваемой специальным генератором гидравлических импульсов, на стационарный поток нагнетания цементного раствора.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан экспериментальный стенд (рис. 1) [5, 6], который работает следующим образом. При включении растворонасоса 3 инъектирующий раствор под заданным давлением подается по трубопроводу и заполняет резервуар для подачи инъектирующего раствора 1. Под действием рабочего давления, создаваемого компрессором 10, осуществляется подача инъектирующего раствора через обратный клапан по трубопроводу 2 в технологическую камеру 5, а далее по трубопроводу 12 к внутренней полости инъектора 11 и в поры грунтового материала, который расположен в резервуаре 7.

При включении насоса приводной гидросистемы 8 рабочая жидкость под заданным давлением попадает в полость 4 гидроцилиндра 13. Давление рабочей жидкости возрастает

до определенного граничного значения, на которое настроен генератор гидравлических импульсов 9. Под действием силы давления рабочей жидкости на эффективную площадь плунжера 6 он перемещается вправо и создает дополнительную нагрузку на замкнутый объем инъецирующего раствора, который расположен в камере 5. В результате этого дополнительная порция инъецирующего раствора по трубопроводу 12 выталкивается через инъектор 11 в грунтовый массив. При достижении заданного критического давления рабочей жидкости в полости 4 происходит срабатывание импульсного клапана 9. При этом давление рабочей жидкости в приводной гидросистеме 8 падает, а рабочая жидкость удаляется на слив. Далее процесс повторяется в автоматическом режиме.

Экспериментальные исследования проводили на трёх типах грунтовых основ: песчаной, супеси и суглинке. Грунтовые основы имели следующие физико-механические характеристики:

а) для песка: удельный вес – $18,1 \text{ кН/м}^3$, коэффициент фильтрации – $9,0 \text{ м/сут}$, модуль деформации – $15,3 \text{ МПа}$, удельное сцепление – $8,1 \text{ кПа}$, угол внутреннего трения – $27,8 \text{ град}$;

б) для супеси: удельный вес – $18,6 \text{ кН/м}^3$, коэффициент фильтрации – $0,48 \text{ м/сут}$, модуль деформации – $12,5 \text{ МПа}$, удельное сцепление – $19,2 \text{ кПа}$, угол внутреннего трения – $25,3 \text{ град}$;

в) для суглинка: удельный вес – $19,4 \text{ кН/м}^3$, коэффициент фильтрации – $0,04 \text{ м/сут}$, модуль деформации – $9,5 \text{ МПа}$, удельное сцепление – $26,8 \text{ кПа}$, угол внутреннего трения – $18,2 \text{ град}$.

В качестве инъецирующей смеси использовали цементный раствор с водоцементным отношением В:Ц=1. При проведении экспериментов рабочее давление нагнетания варьировалось от $0,2$ до $0,4 \text{ кгс/см}^2$, частота повторения гидравлических импульсов давления изменялась от 5 до 10 Гц . Кроме того, изменялся также объём нагнетаемого раствора в грунтовой массив.

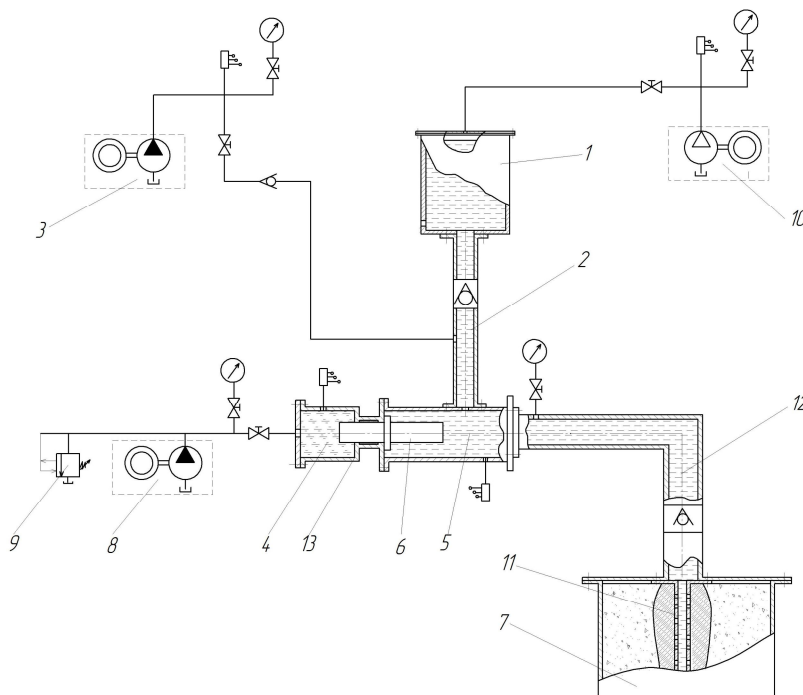


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда с составляющими узлами: 1 – резервуар для подачи инъецирующего раствора; 2, 12 – трубопроводы; 3 – растворонасос; 4 – рабочая камера; 5 – технологическая камера; 6 – плунжер; 7 – резервуар, заполненный пористым грунтовым материалом; 8 – гидроприводная станция; 9 – импульсный клапан; 10 – компрессор; 11 – инъектор; 13 – гидроцилиндр



Рис. 2. Определение радиуса распространения раствора полученного образца при давлении инъектирования $p=0,3 \text{ кгс/см}^2$ и частоте пульсации 10 Гц

Исследования проводили в два этапа [7]. На первом этапе нагнетание раствора осуществлялось под постоянным (статическим) давлением. Полученные образцы представлены на рис. 3, в). На втором этапе на стационарный поток раствора накладывали периодические импульсы давления. Экспериментальные образцы представлены на рис. 3 а), б). В процессе проведения экспериментов все полученные экспериментальные образцы имели прочную сплошную структуру.

Как видно из рис. 3, наилучшую проницаемость раствора наблюдали при частоте пульсации 10 Гц. Это можно объяснить тем, что за счет использования гидравлических импульсов в потоке цементного раствора уменьшаются силы трения между грунтовой основой и цементным раствором, что способствует увеличению площади растекания раствора и увеличению радиуса его распространения. Вследствие этого увеличивается несущая способность насыщенного грунта. Импульсное инъектирование позволяет нагнетать в 1,8 – 2,2 раза больше цементного раствора по сравнению с традиционным статическим инъектированием.



Рис. 3. Полученные экспериментальные образцы: а) при частоте инъектирования 10 Гц; б) при частоте инъектирования 5 Гц; в) при постоянном давлении инъектирования

Таблица 1

**Сравнительная таблица изменения радиуса распространения раствора
при разных режимах инъектирования**

Давление инъектирования	Статическое инъектирование	Импульсное инъектирование $\omega=5 \text{ Гц}$	Импульсное инъектирование $\omega=10 \text{ Гц}$
песок			
$p=0,2 \text{ кГс/см}^2$	64 мм	84 мм	108 мм
$p=0,3 \text{ кГс/см}^2$	78 мм	96 мм	118 мм
$p=0,4 \text{ кГс/см}^2$	86 мм	106 мм	124 мм
супесь			
$p=0,2 \text{ кГс/см}^2$	53 мм	74 мм	92 мм
$p=0,3 \text{ кГс/см}^2$	62 мм	88 мм	102 мм
$p=0,4 \text{ кГс/см}^2$	70 мм	93 мм	110 мм
суглинок			
$p=0,2 \text{ кГс/см}^2$	29 мм	40 мм	56 мм
$p=0,3 \text{ кГс/см}^2$	34 мм	46 мм	64 мм
$p=0,4 \text{ кГс/см}^2$	38 мм	53 мм	74 мм

После проведения экспериментальных исследований определили радиус распространения раствора при различных режимах инъектирования (рис. 3). Результаты изменения радиуса распространения представлены в таблице 1. Как видно из предложенной таблицы, при использовании импульсного инъектирования при частоте пульсации 5 Гц можно увеличить радиус растекания раствора в среднем на 25 – 30%, а при частоте пульсации 10 Гц радиус увеличивается в среднем на 35 – 40%. Варьируя частоту пульсации цементного раствора, можно прогнозировать обеспечение необходимого радиуса растекания в грунтовой основе.

На основе экспериментальных исследований построены графики изменения радиуса распространения раствора от давления инъектирования (рис. 4 – 6). Как видно из предложенных графиков, максимальный радиус распространения раствора наблюдаем при частоте пульсации 10 Гц при всех значениях изменения давления. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что с увеличением частоты пульсации увеличивается проницаемость растворов и увеличивается площадь их растекания. При условии практического использования импульсного инъектирования следует помнить, что частоту пульсации раствора можно увеличивать только до определенного граничного значения, при котором наблюдают дальнейший гидроразрыв пористой среды.

Выводы

1. Проведена экспериментальная проверка функционирования предложенного гидроимпульсного оборудования, количественное и качественное оценивание параметров и характеристик нагнетания технологических растворов в грунтовой массив, которые подтвердили эффективность данного оборудования.

2. Сопоставление результатов экспериментальных исследований, которое проводили в соответствии с анализом образованных тел заполнения (рис. 2, 3), показало, что импульсное нагнетание инъектирующих растворов в массив более эффективно по сравнению со статическим, причем при увеличении частоты пульсации раствора увеличивается его распространение в толще грунтового массива. В конечном итоге, при практическом применении это может гарантировать высокую прочность укрепляемого грунтового массива и большую несущую способность основания.

3. Экспериментальные исследования показали, что импульсное инъектирование позволяет нагнетать в 1,8 – 2,2 раза больше цементного раствора по сравнению со статическим. При этом наблюдают увеличение радиуса распространения раствора в среднем

на 30 – 40% по сравнению с традиционным статическим инъецированием, что существенно влияет на устойчивость и несущую способность укрепляемого основания.

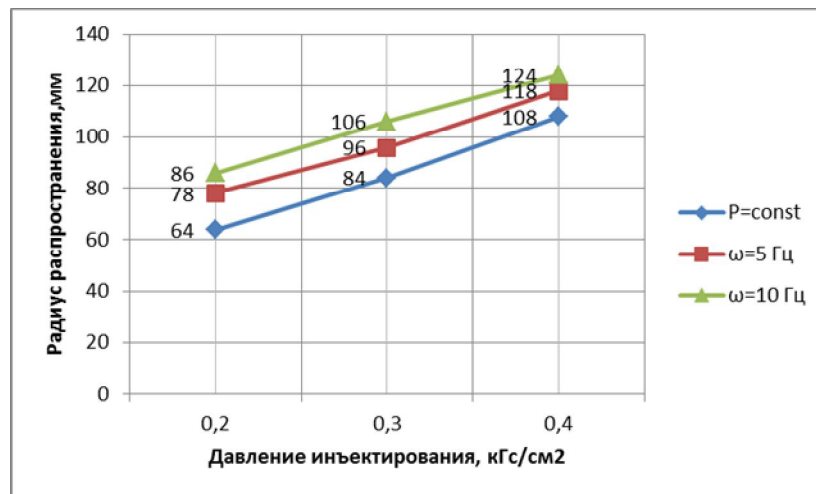


Рис. 4. График зависимости изменения радиуса распространения раствора от динамического давления инъецирования для песка

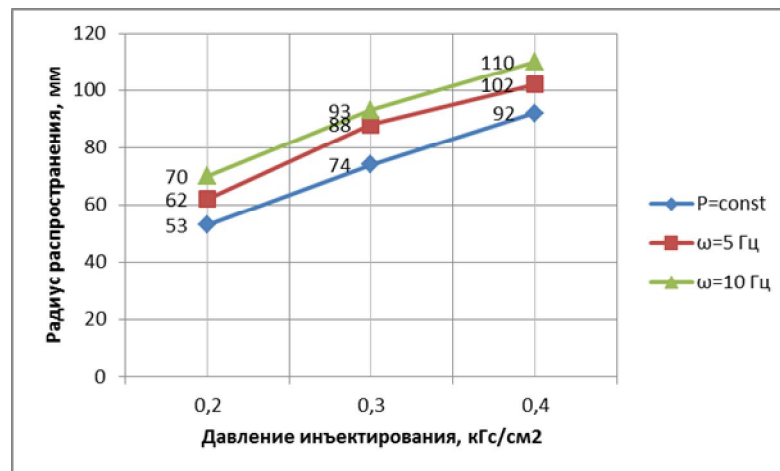


Рис. 5. График зависимости изменения радиуса распространения раствора от динамического давления инъецирования для супеси



Рис. 6. График зависимости изменения радиуса распространения раствора от динамического давления инъецирования для суглинка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Головкин С. И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной цементации: Монография. / Головкин 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.

Коц Иван Васильевич – к. т. н., профессор кафедры теплогазоснабжения.

Бадёра Наталья Петровна – аспирант кафедры теплогазоснабжения.
Винницкий национальный технический университет.