

УДК 69.001.5

ИССЛЕДОВАНИЯ ИНЪЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА

МЕНЕЙЛЮК А. И.^{*1}, д. т. н., проф.,
ПЕТРОВСКИЙ А. Ф.^{*2}, к. т. н., проф.,
БОРИСОВ А. А.^{*3}, к. т. н., доц.,
БАБИЙ И. Н.^{*4}, к. т. н., доц.

^{1*}Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, 65029, Одесса, Украина, тел. +380487236151, e-mail: pr.mai@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1007-309X

^{2*}Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, 65029, Одесса, Украина, тел. +380487236151, e-mail: paf2012@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8232-1245

^{3*}Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, 65029, Одесса, Украина, тел. +380487989083, e-mail: etinvest@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6930-3243

^{4*}Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, 65029, Одесса, Украина, тел. +380487716969, e-mail: igor_babiy76@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8650-1751

Аннотация. Постановка проблемы. Статья содержит сведения о методах и принципах планирования, используемых при проведении экспериментальных исследований инъекционной технологии создания противодиффузионного экрана. Существующие способы создания противодиффузионных экранов и завес решают вопросы защиты грунта в местах расположения водоупорного слоя на небольшой глубине. Однако для Украины на объектах захоронения радиационных и других отходов является актуальным вопрос защиты подземного пространства в местах с глубоким залеганием водоупорного слоя. Классические методы не могут в полной мере решить такие задачи. Необходимо разработать инновационную технологию создания такого экрана, который будет залегать аутентично подошве защищаемого объекта, на проектной глубине. Для проведения экспериментов необходимо выбрать наиболее значимый показатель и технологические факторы, оказывающие на него влияние. Предложенная технология предусматривает малоизученные технологические решения, применение которых в конечном итоге должно привести к получению противодиффузионных экранов с заданными свойствами. **Цель исследования** — подбор технологических параметров инъектирования, планирование экспериментов и выбор показателя, характеризующего эффективную работу экрана, а также изучение влияния технологических параметров на коэффициент фильтрации защитного экрана. **Вывод.** В результате проведения экспериментов определены основные технологические факторы, которые оказывают существенное влияние на изучаемый показатель, и уровни варьирования этих факторов, что, в свою очередь, дает возможность определить оптимальные технологические параметры создания экрана, который соответствует всем заданным свойствам и характеристикам. На основании серии экспериментов возможно получить оптимальные составы для различных видов грунтов.

Ключевые слова: защитный экран, водонепроницаемость, сокращенное планирование, экспериментально-статистическое моделирование

ДОСЛІДЖЕННЯ ІН'ЄКЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ЗАХИСНОГО ЕКРАНА

МЕНЕЙЛЮК О. І.^{*1}, д. т. н., проф.,
ПЕТРОВСЬКИЙ А. Ф.^{*2}, к. т. н., проф.,
БОРИСОВ О. О.^{*3}, к. т. н., доц.,
БАБІЙ І. М.^{*4}, к. т. н., доц.

^{1*}Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +380487236151, E-mail: pr.mai@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1007-309X

^{2*}Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +380487236151, E-mail: paf2012@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8232-1245

^{3*}Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +380487989083, E-mail: etinvest@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6930-3243

^{4*}Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +380487716969, E-mail: igor_babiy76@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8650-1751

Анотація. Постановка проблеми. Стаття містить відомості про методи і принципи планування, які застосовуються для проведення експериментальних досліджень ін'єкційної технології створення протифільтраційного екрана. Існуючі способи створення протифільтраційних екранів і завіс вирішують питання захисту ґрунту в місцях розташування водотривкого шару на невеликій глибині. Однак для України на об'єктах поховання радіаційних та інших відходів надто актуальне питання захисту підземного простору в місцях з глибоким заляганням водотривкого шару. Класичні методи не можуть повною мірою проблем. Необхідно розробити інноваційну технологію створення такого екрану, який буде залягати аутентично підосві споруди,

що захищається, на проектній глибині. Для проведення експериментів необхідно вибрати найбільш значимий показник і технологічні фактори, що впливають на нього. Запропонована технологія передбачає маловивчені технологічні рішення, застосування яких у кінцевому підсумку повинні привести до отримання протифільтраційних екранів із заданими властивостями. **Мета дослідження** – підбір технологічних параметрів ін'єктування, планування експериментів і вибір показника, якщо характеризує ефективну роботу екрана, вивчення впливу технологічних параметрів на коефіцієнт фільтрації захисного екрана. **Висновок.** Визначено основні технологічні чинники, які впливають на досліджуваний показник, та рівні варіювання цих факторів, що, у свою чергу, дає можливість визначити оптимальні технологічні параметри створення екрана, який відповідає всім заданим властивостям і характеристикам. На підставі серії експериментів можливо отримати оптимальні склади для різних видів ґрунтів.

Ключові слова: захисний екран, водонепроникність, скорочене планування, експериментально-статистичне моделювання

INJECTION TECHNOLOGY RESEARCH OF THE PROTECTIVE SCREEN

MENEJLYUK A. I. ^{*1}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 PETROVSKIY A. F. ^{*2}, *Cand. Sc. (Tech.), Prof.*,
 BORISOV A. A. ^{*3}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,
 BABIJ I. N. ^{*4}, *PhD, Ass. Prof.*

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str., 4, 65029, Odessa, Ukraine, tel. +38(048)7236151, E-mail: pr.mai@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1007-309X

²*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str., 4, 65029, Odessa, Ukraine, tel. +38(048)7236151, E-mail: paf2012@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8232-1245

³*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str., 4, 65029, Odessa, Ukraine, tel. +38(048)7989083, E-mail: etinvest@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6930-3243

⁴*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str., 4, 65029, Odessa, Ukraine, tel. +38(048)7716969, E-mail: igor_babiy76@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8650-1751

Annotation. Formulation of the problem. This article contains information about the methods and the planning principles used in experimental research study of the injection technology of impervious screen. Today, there are ways to create impervious screens and curtains solve soil protection issues in the field impermeable layer arrangement at a shallow depth. However, for Ukraine, in the burial sites of radiation and other wastes is urgent issue of protection of underground space in places with deep impermeable layer. Classical methods can not fully solve such problems. To solve them, you need to develop innovative technology to create such a screen, which will lie authentic sole object to be protected, at the project depth. For the experiments, it is necessary to choose the most important indicator, and technological factors affecting it. This is due to the fact that the proposed technology provides for lesser known technical solutions, the use of which should ultimately result in impervious screens with desired properties. **Goal.** The aim of this study is the selection of technological parameters of injection, design of experiments and the selection of indicators characterizing the efficient operation of the screen. Such constructs must first have almost zero permeability. In this paper, it was of interest to study the influence of process parameters on the filtration rate of the protective screen. **Conclusion.** As a result of the design of experiments, the basic technological factors that have a significant effect on the studied parameters. varying levels of these factors are also identified, which in turn makes it possible to determine the optimum process parameters creating a screen that meets all the desired properties and characteristics. Based on a series of experiments it is possible to obtain optimal formulations for different types of soils.

Keywords: shield, water resistance, abbreviated plan, experimental and statistical modeling

Постановка проблеми. Аналіз проблем, що виникають при захороненні наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, показав, що по масштабах впливу і необхідним фінансовим і технічним ресурсам ведуче місце займають локалізація забруднень і зниження емісій радіоактивних речовин в навколишнє середовище. Відмічено надходження радіонуклідів в ґрунтові води з великої кількості тимчасових могильників радіоактивних відходів в зоні Чорнобильської АЕС. В районі даних могильників водоупорні шари ґрунту знаходяться на великій глибині або взагалі відсутні. Класичні методи не дозволяють створити протифільтраційний екран в таких умовах. Створення захисного екрана можливо за допомогою горизонтально направленої буріння. Це дозволить захистити ґрунти і підземні води від міграції забруднюючих речовин. Це близько 800 траншей, споруджених в більшості випадків без

достаточного обеспечения их герметичности. Устройство противофильтрационных экранов позволит решить данную проблему [1-3].

Анализ публикаций. Предложены многочисленные способы устройства противофильтрационных экранов, однако их анализ показал низкую экономическую и экологическую эффективность [4-8]. Следовательно, разработка нового инновационного способа защиты подземного пространства по инъекционной технологии является актуальной задачей.

Настоящее исследование обладает несомненной экологической, а также социальной значимостью, так как позволит защитить население от последствий заражения загрязнённой радионуклидами водой.

Цель исследования – определение закономерностей влияния технологических параметров инъектирования на противофильтрационные свойства защитного экрана.

Изложение материала. Защитный экран представляет собой сооружение, состоящее из грунта основания, приобретающего, вследствие инъектирования, противофильтрационные свойства и препятствующего поступлению загрязнённых вод в подземные источники. Основным показателем, на который влияет совокупность технологических параметров, является коэффициент фильтрации. В свою очередь, технологические параметры можно разделить на две группы:

- параметры, влияющие на закономерности распределения инъектированного состава в грунте;
- концентрация компонентов в растворе и их способность образовывать противофильтрационный слой в грунте.

Так как основным свойством противофильтрационного экрана является его водонепроницаемость, было решено использовать основным показателем такую характеристику грунта как коэффициент фильтрации.

Показатели и факторы, оказывающие на него наибольшее влияние:

X_1 – концентрация веществ в инъектируемых составах, которая придает песчаному грунту противофильтрационные свойства. Данный параметр является ключевым, так как грунт основания препятствует проникновению раствора сквозь инъектируемую толщу. В этой связи концентрация раствора должна быть достаточной, чтобы образовался экран, обладающий максимальной противофильтрационной способностью.

Однако существует лимитирующий фактор – вязкость инъектируемого раствора, который влияет на проникновение материала в промежутки между дисперсными частицами песчаного грунта. Согласно нормативным документам [2; 3], допускаемая вязкость для глинистых и глиноцементных растворов находится в следующих пределах:

- 18–30 с для вязкости, определяемой вискозиметром СПВ-5 объемом 700 мл;
- 26–43 с для вязкости, определяемой вискозиметром «Воронка Марша», объёмом 1 000 мл.

X_2 – давление нагнетания (подачи) инъектируемого раствора в грунт основания. Давление нагнетания является ключевым параметром, влияющим на дальность распространения состава инъекции в толще грунта. Данный фактор очень важен в экономическом аспекте, так как современные промышленные насосы позволяют достичь значений давления вплоть до 100 атм и выше, при этом позволяя увеличить расстояния между горизонтально пробуриваемыми скважинами, что удешевляет проект.

X_3 – продолжительность процесса инъектирования. Фактор длительности позволяет установить прямую пропорциональную зависимость между временем инъекции и концентрацией действующих веществ раствора в рассматриваемой толще, что влияет на противофильтрационные свойства грунта.

При моделировании процесса инъектирования за основу взята современная технология горизонтально направленного бурения, которая позволяет образовывать

противофильтрационный горизонтальный экран под загрязненным объектом. Для этого создан лабораторный стенд, моделирующий перпендикулярное оси бурения сечение, в котором под воздействием рабочих параметров инъецируемый раствор распространяется на различном от места ввода раствора расстоянии. Выделяя срединную часть сечения, можно получить представление о характере изменения коэффициента фильтрации.

При подборе составляющих инъецируемого раствора были определены следующие параметры:

- выраженная способность проявлять гидрофобные свойства или способность образовывать устойчивую структуру;
- экологическая безопасность и целесообразность использования составляющих;
- технологичность при производстве работ (хорошая смешиваемость, удобство при измерении пропорций и т. д.).

Посредством анализа актуальных исследований по теме работы установлено, что заявленным принципам наиболее соответствуют следующие составляющие:

- бентонит как вещество, обладающее наиболее выраженными гидрофобными свойствами;
- портландцемент марки не менее М400 как вещество, обладающее наиболее выраженными свойствами образовывать структуру из частиц грунта в условиях обводнённости;
- гидросиликат натрия (жидкое стекло) как вещество, являющееся синергистом и интенсификатором свойств двух других составляющих.

Особенностью планирования экспериментов является то, что в каждом опыте по определенному закону одновременно варьируются все факторы [4].

В расчетах данного исследования оценку влияния факторов решено искать в виде линейной функции отклика: [5]

$$Y = B_0 \cdot x_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_3 \cdot x_3 + B_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (1)$$

где: Y – функция отклика;

B_i – коэффициенты регрессии;

x_i – изменяемые факторы.

Были проведены три серии экспериментов, каждая из которых давала независимую оценку закономерностям влияния в каждой из трёх групп исследуемых технологических параметров. Следовательно, в результате экспериментов было получено три статистических массива данных, использованных для оценки влияния каждого из факторов на конечный результат опыта, характеризующих защитные качества экрана в виде функции отклика.

Рассмотрим исследуемые факторы в каждой из выделенных групп технологических параметров.

Для первой группы, охватывающей технологические параметры режима инъецирования, было решено выделить следующие факторы:

1. Концентрация в инъецируемом растворе основного вяжущего, которое образует противофильтрационную пленку.
2. Давление нагнетания (подачи) инъецируемого раствора в грунт основания.
3. Продолжительность процесса инъецирования.

Факторы, выделенные во вторую группу параметров по определению оптимального состава раствора:

1. Концентрация бентонитового порошка в единице раствора.
2. Концентрация портландцемента.
3. Концентрация гидросиликата натрия.

Для третьей группы, охватывающей технологические параметры режима инъецирования, было решено выделить только два фактора:

концентрация в инъецируемом растворе основного вяжущего, которое образует противофильтрационную пленку;

давление нагнетания (подачи) инъецируемого раствора в грунт основания.

При этом принято, что концентрация бентонитового порошка остается неизменной на протяжении всех лабораторных опытов и соответствует максимальной концентрации бентонита при проведении первой группы исследований, а концентрация портландцемента и гидросиликата натрия меняется.

Для получения доверительных откликов предложено:

а) Для первой серии экспериментов, исследующих три изменяемых фактора, принять 15-точечный симметричный план B_3 с повторением опытов в каждой точке пласта не менее трех раз.

б) Для второй серии опытов, исследующих два изменяющих фактора, принять 9-точечный симметричный план B_2 .

в) Для третьей серии опытов, исследующих два изменяющих фактора, принять 9-точечный симметричный план B_2 .

Количество опытов в полном факторном эксперименте значительно превосходит число определяемых коэффициентов ЭС-модели [9; 10]. Другими словами, полный факторный эксперимент обладает некоторой избыточностью опытов, а проведение каждого требует определенных затрат. Было бы заманчивым сократить их число за счет той информации, которая не очень существенна при построении моделей выбранного типа. При этом нужно стремиться к тому, чтобы матрица планирования не лишилась бы своих оптимальных свойств.

Для трех факторной задачи теоретически возможно снижение числа строк (точек) плана до 10. Однако такие насыщенные планы всегда имеют низкую точность. Наиболее же оптимальным для большинства трех факторных задач является 15-точечный симметричный план. Он получен путем сокращения 12 точек из полного факторного плана.

В этом случае все три фактора изменяются на трех уровнях, и план эксперимента является полным факторным планом типа 33. Уровни факторов изображаются тремя точками на каждой из трех координатных осей факторного трехмерного пространства. Эти уровни симметричны относительно основного уровня. Один из них – минимальный, второй – средний, третий – максимальный.

Обозначим факторы:

Соответственно при $X_1 = 10$ г кодированное значение фактора будет равно $x_1 = -1$; при $X_1 = 40$ г $x_1 = 0$, а при $X_1 = 70$ г $x_1 = +1$.

Соответственно при $X_2 = 2$ атм. кодированное значение фактора будет равно $x_2 = -1$; при $X_2 = 3$ атм $x_2 = 0$, а при $X_2 = 5$ атм. $x_2 = +1$.

Соответственно при $X_3 = 10$ мин, кодированное значение фактора будет равно $x_3 = -1$; при $X_3 = 60$ мин, $x_3 = 0$, а при $X_3 = 110$ мин $x_3 = +1$.

Выводы. В результате проведения экспериментов определены основные технологические факторы, которые влияют на исследуемый показатель. Также определены уровни варьирования этих факторов, что, в свою очередь, дает возможность определить оптимальные технологические параметры создания экрана, который отвечает всем заданным свойствам и характеристикам. На основании серии экспериментов можно получить оптимальные составы для различных видов почв.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Вальков В. Ф. Экология почв. Ч. 3 : Загрязнение почв / В. Ф. Вальков, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников – Ростов-на-Дону : УПЛ РГУ, 2004. – 54 с.
2. Чернобыльская катастрофа / Нац. акад. наук Украины ; гл. ред. Баряхтар В. Г. – Киев : Наук. думка, 1995. – 560 с.
3. Горицкий О. В. Чернобыль: післяаварійна програма будівництва : монографія / О. В. Горицкий, В. Я. Пінчук. – Київ : Іван Федоров, 1998. – 456 с.
4. Бойко Г. А. Применение тонких противо-фильтрационных диафрагм в условиях Белоруссии / Г. А. Бойко, Г. Г. Азбель, Г. Н. Никольская // Строительство и архитектура Белоруссии : произв.-техн. бюл. Госстроя БССР и Союза архитекторов БССР. – 1980. – № 4. – С. 31.
5. Бунтман А. Д. Об использовании противофильтрационных завес для защиты котлованов от притока грунтовых вод / А. Д. Бунтман // Энергетическое строительство. – 1978. – № 2. – С. 86–87.

6. Пособие по проектированию полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов (к СНиП 2.01.28–85) / Госстрой СССР. – Москва : Центр. ин-т типового проектирования, 1990. – 48 с.
7. Способ создания противofiltrационной завесы в лессовом грунте : пат. 2015248 Рос. Федерация : МПК⁷ E 02 D 003/12 / В. И. Осипов, С. Д. Филимонов, Б. Н. Мельников, Е. В. Кайль ; патентообладатели В. И. Осипов, С. Д. Филимонов. – № 5019926/33 ; заявл. 27.12.91 ; опубл. 30.06.94.
8. Способ возведения противofiltrационной инженерно-защитной конструкции : пат. 2211283 Рос. Федерация : МПК⁷ E 02 D 005/56, E 02 D 005/20, E 02 D 007/22 / А. Н. Басиев, М. В. Зелов, А. Г. Икусов. – № 2001134567/03 ; заявл. 21.12.2001 ; опубл. 27.08.2003.
9. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
10. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огарков. – Киев : Вища шк., 1989. – 327 с.

REFERENCES

1. Valkov V.F, Kazeev K.S. and Kolesnikov S.I. *Ekologiya pochv. Ch. 3: Zagryaznenie pochv* [Soil Ecology. Chapter 3: Soil contamination]. Rostov-na-Donu: UPL RGU, 2004, 54 p. (in Russian).
2. Bar'yaxtar V.G *Chepnobylskaya katastrofa* [Chernobl accident]. *Nats. akad. nauk Ukrainy* [National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv: Naukova dumka, 1995, 560 p. (in Russian).
3. Goryts'kyi O.V. and Pinchuk V.YA. *Chornobyl: pisliaavariina programa budivnitstva* [Chernobyl: post-emergency building program]. Kyiv: Ivan Fedorov, 1998, 456 p. (in Ukrainian).
4. Boyko G.A., Azbel G.G. and Nikolskaya G.N. *Primenenie tonkix protivofiltracionnyx diafragm v usloviyax Belorussii* [The use of thin anti-filtration diaphragms in the conditions of Belarus]. *Stroitel'stvo i arxitektura Belorussii: proizv.-texn. byul. Gosstroya BSSR i Soyuza arxitektorov BSSR* [Construction and Architecture of Belarus: the production and technical bulletin of the BSSR and the State Construction Committee of the BSSR Union of Architects]. 1980, no. 4, p. 31. (in Russian).
5. Buntman A.D. *Ob ispol'zovanii protivofiltracionnyx zaves dlya zashhity kotlovanov ot pritoka gruntovyx vod* [Using of impervious curtain to protect the pits from groundwater inflow]. *Energeticheskoe stroitel'stvo* [Energy construction]. 1978, no. 2, pp. 86–87. (in Russian).
6. Gosstroj SSSR. *Posobie po проектированию полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов (к СНиП 2.01.28–85)* [The allowance on the landfills designing for the disposal and dumping of toxic industrial waste (to the State Building Codes 2.01.28-85)]. Moskva: Centr. in-t tipovogo проектирования, 1990, 48 p. (in Russian).
7. Osipov V.I., Filimonov S.D., Melnikov B.N. and Kajl' E.V. *Sposob sozdaniya protivofiltracionnoj zavesy v lessovom grunte: pat. 2015248 Ros. Federaciya: MPK7 E 02 D 003/12* [A method for creating grout curtain in the loess soils: pat. 2015248 Russian Federation: MPK7 E 02 D 003/12]. 1994. (in Russian).
8. Basiev A.N., Zelov M.V. and Ikusi A.G. *Sposob vozvedeniya protivofiltracionnoj inzhenerno-zashhitnoj konstrukcii: pat. 2211283 Ros. Federaciya: MPK7 E 02 D 005/56, E 02 D 005/20, E 02 D 007/22* [A method of fencing erecting of an anti-protection engineering design: pat. 2211283 Russian Federation: MPK7 E 02 D 005/56, E 02 D 005/20, E 02 D 007/22]. 2003. (in Russian).
9. Voznesenskij V.A. *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v texniko-ekonomicheskix issledovaniyax* [Statistical methods in experimental design feasibility studies]. Moskva: Finansy i Statistika, 1981, ed. 2, 263 p. (in Russian).
10. Voznesenskij V.A., Lyashenko T.V. and Ogarkov B.L. *Chislennyye metody resheniya stroitel'no-texnologicheskix zadach na EVM* [Numerical methods for construction and technological problems solving on a computer]. Kiev: Vishha Shk., 1989, 327 p. (in Russian).

Рецензент: Дерев'янюк В. М., д-р т. н., проф.

Надійшла до редколегії: 17.11.2016 р. Прийнята до друку: 24.11.2016 р.