

## РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНЪЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Петровский А.Ф.**, к.т.н., профессор  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
etinvest@gmail.com

**Аннотация.** Данная статья содержит сведения о методах и принципах, использованных при разработке лабораторного стенда, а также перечень приборов и механизмов, использованных при проведении экспериментальных исследований. Лабораторный стенд имеет целью моделировать участок грунтовой толщи под защищаемым объектом, отходящий горизонтально в сторону от направленной параллельно поверхности скважины бурения, которая является каналом для подачи инъецируемого раствора. В статье представлены результаты экспериментов инъекционной технологии с использованием бентонитового раствора.

**Ключевые слова:** защита грунтов, лабораторная установка, коэффициент фильтрации, горизонтальный противofiltrационный экран.

## РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІН'ЄКЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

**Петровський А.Ф.**, к.т.н., професор  
*Одеська державна академія будівництва і архітектури*  
etinvest@gmail.com

**Анотація.** Дана стаття містить відомості про методи і принципи, використаних при розробці лабораторного стенду, а також перелік приладів і механізмів, використаних при проведенні експериментальних досліджень. Лабораторний стенд має на меті моделювати ділянку ґрунтової товщі під об'єктом, що захищається, та відходить горизонтально в бік від спрямованої паралельно поверхні свердловини буріння, яка є каналом для подачі ін'єкційного розчину. У статті представлені результати експериментів по ін'єкційній технології з використанням бентонітового розчину.

**Ключові слова:** захист ґрунтів, лабораторна установка, коефіцієнт фільтрації, горизонтальний протифільтраційний екран.

## DEVELOPMENT OF EQUIPMENT AND THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF INJECTION TECHNOLOGY

**Petrovskiy A.F.**, Ph.D, Professor  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
etinvest@gmail.com

**Abstract.** This article contains information about the methods and principles used in the development of a laboratory stand, as well as a list of devices and mechanisms used during the first series of experimental studies.

The laboratory stand must simulate a portion of ground under the secured object, which is extending horizontally away from a parallel surface of the drilling well, which is the channel for

conveying injected solution. It is assumed that after works on the arrangement of protecting screen the site will have a different coefficient of filtration, depending on the distance to the drilling well. By modeling in the laboratory stand it is planned to determine the patterns of distribution of the injected solution away from the drilling well in the soil. The method of determining given dependencies is the measurement of the filtration coefficient at different distances from the place of entry of the solution. The article presents the results of the experiments on the injection technology with the use of clay slurry.

The article also describes the devices that are used to determine the physical and mechanical properties of the impervious solution and injected soil.

**Keywords:** protection of soils, laboratory apparatus, filtration coefficient, horizontal impervious screen.

**Введение.** Жизнедеятельность человека предопределяет образование большого количества промышленных и бытовых отходов, в результате чего происходит возрастающее загрязнение земной поверхности, гидрографической среды и атмосферы и, как следствие, загрязнение подземных вод. Борьба с загрязнением подземных вод особенно актуальна на территориях городов, где в силу высокой концентрации населения, промышленности, транспорта и коммунального хозяйства оно происходит особенно интенсивно [1].

Несомненно, одним из важнейших загрязнителей подземных вод является радиоактивное заражение. Территория с сильным радиоактивным загрязнением фунту составляет 8,4 млн. га и охватывает 32 района шести областей Украины. Особой проблемой можно обозначить захоронения различных отходов и строительного мусора возникших после аварии на Чернобыльской АЭС [2, 3].

Обзор данного вопроса показал, что по масштабам воздействия и необходимым финансовым и техническим ресурсам, ведущее место занимает локализация загрязнений и снижение эмиссий радиоактивных веществ в окружающую среду. Были предложены многочисленные способы устройства противодиффузионных 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 и задачи исследования.** Целью данного исследования является разработка лабораторного оборудования (в виде специального стенда), которое сможет воссоздать и смоделировать процесс образования противодиффузионного экрана в грунте. К задачам, которые необходимо решить, можно отнести подбор оборудования с заданными техническими параметрами. Также необходимо определить технологическую последовательность проведения испытаний в разработанном стенде. После проведения серии экспериментов, необходимо выполнить, построение экспериментально-статистических зависимостей коэффициента фильтрации защитного экрана, образованного с использованием горизонтально направленного бурения, от технологических факторов.

**Объект и методы исследований.** Создание внутри песчаного массива водонепроницаемого горизонтального экрана в условиях, когда меняются технологические параметры. Метод проведения технологических исследований: экспериментально – аналитический.

**Основные результаты исследования.** При моделировании процесса инъецирования было предложено взять за основу современную технологию горизонтально направленного бурения, которая позволяет образовывать противодиффузионный горизонтальный экран под загрязненным объектом. Для этого появилась необходимость создать лабораторный стенд, моделирующий перпендикулярное оси бурения сечение, в котором под воздействием рабочих параметров инъецируемый раствор распространяется на различном от места ввода

раствора расстоянию. Выделяя срединную часть сечения, можно получить представление о характере изменения коэффициента фильтрации, как основного показателя характеризующего эффективность построенного противofильтрационного экрана. На рис. 1 показана модель зоны распространения инъецируемого раствора в грунтовой толще.

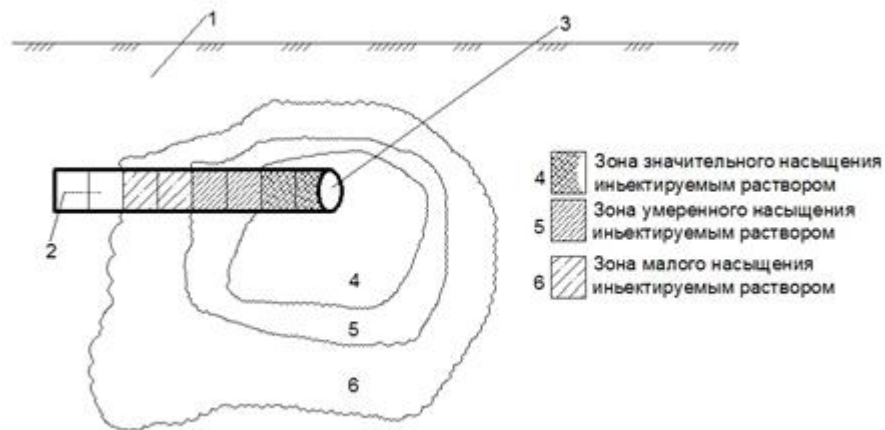


Рис. 1. Зоны распространения инъецируемого раствора в грунтовой толще:  
1 – инъецируемая толща, 2 – моделируемый лабораторным стендом участок толщи,  
3 – скважина горизонтального бурения, 4, 5, 6 – зоны различного насыщения раствором

Под защитным экраном подразумевается подземное сооружение, имеющее целью препятствовать поступлению загрязнённых вод в подземные источники, и состоящее из грунта основания, приобретающего вследствие инъецирования противofильтрационные свойства.

Для решения поставленной цели необходимо разработать оборудование (лабораторный стенд) для проведения экспериментальных исследований. Анализ известных источников показал, что готовых приборов для этой цели не существует, поэтому была разработана специальная лабораторная установка для определения коэффициента фильтрации грунта при изменении технологических параметров и режимов создания горизонтального экрана. Её схема показана на рисунке 2.

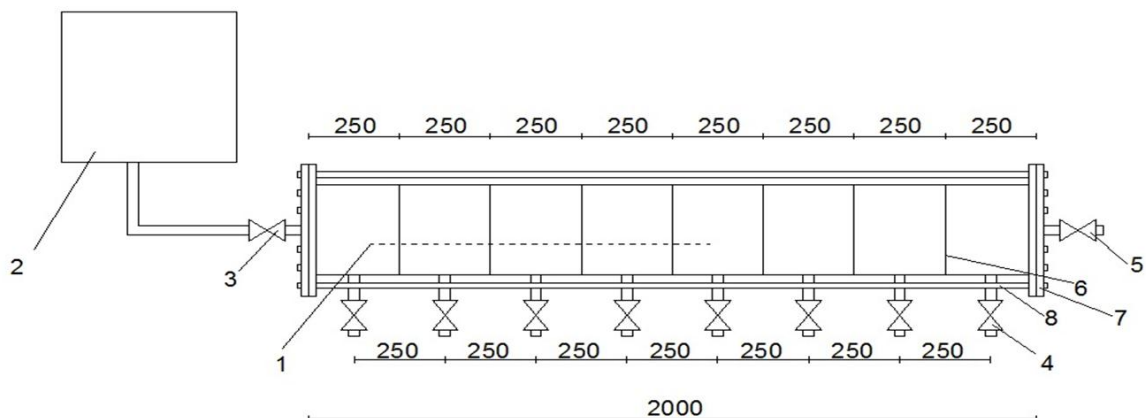


Рис. 2. Схема лабораторного стенда:

1 – цилиндрический резервуар лабораторного стенда; 2 – насос с манометром для подачи раствора в установку; 3 – кран для подачи раствора; 4 – краны для индикации заполнения трубы раствором и водой; 5 – кран для выхода раствора; 6 – резьбовое соединение секций; 7 – фланцевая торцевая крышка; 8 – металлические стяжки для герметизации резьбового соединения.

Для создания лабораторного стенда было необходимо проанализировать существующее в Украине оборудование и приборы, которые можно включить в проектируемую схему (рис. 2) создаваемой лабораторной установки. Это насос для нагнетания раствора, прибор СПЕЦГЕО для определения коэффициента фильтрации, вискозиметр «воронка Марша» для определения вязкости раствора. Ёмкость для замешивания проб, мерный стакан для определения количества воды в растворе, миксер для приготовления раствора, лабораторные электронные весы (точность  $\pm 1\text{г}$ ), секундомер, таймер. Также вспомогательные инструменты: гаечные разводные ключи, кельма, ёмкость для приготовления раствора, ключи для затягивания резьбовых соединений секций лабораторного стенда, приспособления для уплотнения песчаного грунта [9].

Лабораторная установка имеет целью моделировать участок грунтовой толщи под защищаемым объектом, отходящий горизонтально в сторону от направленной параллельно поверхности скважины бурения, которая является каналом для подачи инъецируемого раствора. Предполагается, что после работ по устройству защитного экрана данный участок будет иметь различный коэффициента фильтрации в зависимости от расстояния до скважины бурения. Посредством моделирования в лабораторном стенде планируется определить закономерности распространения инъецируемого раствора в сторону от скважины бурения в грунтовой толще. Методом определения данных зависимостей является измерение коэффициента фильтрации на разных от места ввода раствора расстояниях. Вследствие этого, был запроектирован и создан лабораторный стенд, представляющий собой полую трубу с внутренним диаметром 300 мм, длиной 2000 мм, разделённую на 8 секций по 250 мм. Толщина стенки – 10мм. Секции соединяются между собой резьбовым соединением. Внизу каждой секции находятся отверстия с кранами для индикации распространения раствора в резервуаре. Крайние секции закрываются торцевыми заглушками с отверстиями для подачи и отбора инъецируемого раствора. Способ соединения заглушек и крайних секций – фланцевый. По бокам расположены стяжки с резьбой на концах, предназначенные для герметизации стыков и сохранения конструкции лабораторного стенда рис. 3.

Для установки лабораторного стенда на рабочую высоту используются деревянные или металлические козловые подставки. Материал трубы – полипропилен; материал металлических элементов – сталь С245.

Посредством настоящего экспериментального моделирования предполагается определить максимально возможное расстояние между скважинами бурения, достаточное для того, чтобы получить необходимое для обеспечения противofильтрационных свойств экрана значение коэффициента фильтрации.



Рис. 3. Общий вид лабораторного стенда

Исходя из выше изложенного, можно выделить принципы, использованные при проектировании лабораторной установки:

- соответствие условий распространения раствора в лабораторной модели и в натуральной грунтовой толще;
- точность и достоверность получаемых в ходе исследования результатов;
- простота конструкции лабораторного стенда и удобство в обслуживании.

Методы, использованные при проектировании лабораторной установки:

- обеспечение достаточного внутреннего объёма цилиндрического резервуара стенда для сохранения естественных закономерностей распространения инъецируемого раствора в грунтовой толще;
- соответствие грунтового заполнителя параметрам, предъявляемым к идеальному грунту: плотность, пористость, влажность, дисперсность и др.;
- наличие отдельных секций лабораторного стенда для удобства забора проб проинъецированного заполнителя как нарушенной, так и ненарушенной структуры;
- герметичность и технологичность стыков составляющих элементов лабораторного стенда;
- наличие кранов, обеспечивающих выход избытка инъекционного раствора в процессе опыта.

В процессе проведения опытов на разработанном оборудовании следует обращать особое внимание на следующие условия, которые могут привести к значительным погрешностям полученных результатов. Степень уплотнения грунта по всей длине лабораторного стенда, степень нарушения структуры забираемых из резервуара проб проинъецированного грунта, равномерность давления ввода раствора на всём протяжении опыта, недопущение образования полостей вследствие гидроразрыва в резервуаре лабораторного стенда.

В результате проведения серии экспериментов было установлено, что разработанное лабораторное оборудование является несовершенным с точки зрения удобства проведения исследований. Работы, связанные с необходимостью использования насоса с ручным приводом, отсутствие эффективных механизированных приспособлений для уплотнения и трамбовки грунта, а также необходимость загрузки/разгрузки резервуара лабораторного стенда вручную приводит к большой трудоёмкости проведения опытов.

Однако, несмотря на указанные недостатки данного оборудования, были получены закономерности изменения коэффициента фильтрации грунта с применением инъекционной технологии.

Так как основным свойством противofильтрационного экрана является его гидрофобность, то есть способность не пропускать подземные воды, было решено использовать основным показателем такую физическую характеристику грунта, как коэффициент фильтрации.

Для проведения экспериментальных исследований использована теория планирования эксперимента. В соответствии с этой теорией использован 15-ти точечный план экспериментальных исследований. В нем каждый из факторов изменяется на трех разных уровнях. Они условно обозначены -1, 0 и +1.

Факторами, оказывающими наибольшее влияние на исследуемый показатель, были определены: концентрация бентонита, давление и продолжительность инъецирования.

Первым варьируемым фактором ( $X_1$ ) принята концентрация в инъецируемом составе бентонита, который придает песчаному грунту противofильтрационные свойства.

Данный фактор является важным, так как грунт основания препятствует проникновению раствора сквозь инъецируемую толщу. В данной связи концентрация раствора должна быть достаточной, чтобы образовался экран, обладающей максимальной противofильтрационной способностью. Однако, существует лимитирующий фактор – вязкость инъецируемого раствора, который влияет на проникновение материала в

промежутки между дисперсными частицами песчаного грунта. Поэтому концентрация бентонита подбиралась в пределах нормативных значений.

Вторым варьируемым фактором ( $X_2$ ) является давление нагнетания (подачи) инъецируемого раствора в грунт основания. Давление нагнетания влияет на дальность распространения состава инъекции в толще грунта. Данный фактор является очень важным в экономическом аспекте, так как современные промышленные насосы позволяют достичь значений давления свыше 100 атм., при этом позволяя увеличить расстояния между горизонтально пробуриваемыми скважинами, что удешевляет проект.

В качестве третьего варьируемого фактора ( $X_3$ ) определено время инъецирования. Фактор длительности позволяет установить прямую пропорциональную зависимость между временем инъекции и концентрацией действующих веществ раствора в рассматриваемой толще, что влияет на противодиффузионные свойства грунта.

Таким образом, в работе приняты следующие факторы и уровни их варьирования:

- количество бентонитового порошка ( $X_1$ ) –  $(40 \pm 30)$  г/л;
- давление ( $X_2$ ) –  $(2,3,5)$  атм.;
- время инъекции ( $X_3$ ) –  $(60 \pm 50)$  мин.

Обработка полученных результатов в ходе экспериментальных исследований произведена способом регрессионного анализа с помощью программы «Comrex» [10, 11]. По результатам этого анализа была построена экспериментально-статистическая модель зависимости коэффициента фильтрации от технологических параметров устройства защитного экрана (1).

$$K_{\phi} = 0,105 \pm 0 x_1 + 0,212x_1^2 + 0,123 x_1x_2 - 0,064 x_1x_3 - 0,087 x_2 \pm 0 x_2^2 \pm 0 x_2x_3 \pm 0 x_3 \pm 0 x_3^2 \quad (1)$$

На рис. 4 показаны графики зависимости показателя от каждого из варьируемых факторов.

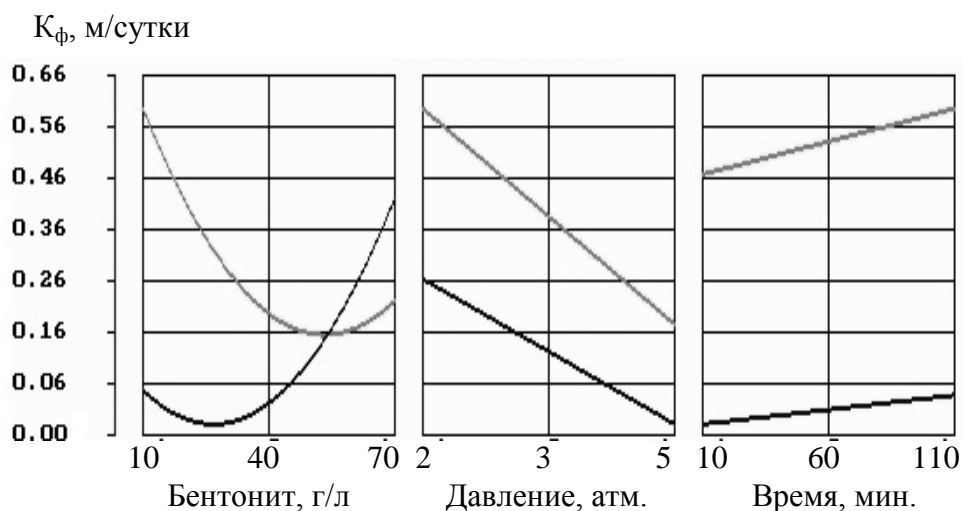


Рис. 4. График влияния кол-ва бентонита, давления и времени на коэффициент фильтрации в зоне максимума и минимума

Характер графика зависимости коэффициента фильтрации от концентрации бентонита можно назвать близким к параболическому. При этом, наименьшее значение данной кривой ярко выражено и находится в пределах  $x_1 = (22...25)$  г/л в зоне минимумов, тогда как для зоны максимумов оно находится в пределах  $x_1 = (58...61)$  г/л). Можно сказать, что для

условий, прийнятих при проведенні експериментів, удалось виявити оптимальну насиченість ін'єкційного розчину основним вяжущим.

Залежність коефіцієнта фільтрації від тиску подачі розчину є обернено пропорційною. При цьому оптимальним є максимальне тиску подачі розчину. Фактор часу ін'єкціювання при вибраних умовах проведення експериментів не має значимого впливу в інженерному сенсі.

#### **Висновки:**

1. Розроблене обладнання (лабораторний стенд) дає можливість моделювати процес створення горизонтального протифільтраційного екрана в масиві ґрунту.

2. Лабораторний стенд потребує оптимізації та доработки для виконання ін'єкціювання ґрунту іншими більш складними (багатокомпонентними) протифільтраційними сумішми.

3. Проведені лабораторні дослідження дозволили визначити значення коефіцієнта фільтрації при різних рівнях технологічних факторів ін'єкціювання.

4. Найбільшим впливом на досліджувану показувачу є концентрація бентоніту в ін'єкційному розчині та тиску подачі розчину. При цьому оптимальним є кількість бентоніту на рівні 22...25 г/л. та максимальне тиску подачі розчину.

#### **Література**

1. Вальков В.Ф. Екологія ґрунту: Навчальний посібник для студентів вузів. Частина 3. Забруднення ґрунту / В.Ф. Вальков, К.Ш. Казеев, С.І. Колесников – Ростов-на-Дону: УПЛ РГУ, 2004. – 54 с.

2. Чорнобильська катастрофа / НАН України; гл. ред. Бар'яхтар В.Г. – К.: Наук. думка, 1995. – 560 с.

3. Чорнобиль. Післяаварійна програма будівництва. Монографія. – К.: "Іван Федорів", 1998. – 456 с.

4. Бойко Г.А. Застосування тонких протифільтраційних діафрагм в умовах Білорусії. Будівництво та архітектура Білорусії / Г.А. Бойко, Г.Г. Азбель, Г.Н. Никольська. – 1980. – № 4. – С. 31.

5. Бунтман А.Д. Про використання протифільтраційних завіс для захисту котлованів від притоку ґрунтових вод / А.Д. Бунтман // Енергетичне будівництво. – 1978. – № 2. – С. 86-87.

6. Посібник по проектуванню полігонів по обезврежуванню та захороненню токсичних промислових відходів (к СНиП 2.01.28–85). – М.: ЦИТП Госстроя СРСР, 1990. – 48 с.

7. Пат. 2015248 С1 Російська Федерація, МПК5 Е 02 D 3/12. Спосіб створення протифільтраційної завіси в лесовому ґрунті / В. І. Осипов, С. Д. Філімонов, Б. Н. Мельников, Е. В. Кайль; заявл. 27.12.91; опубл. 30.06.94.

8. Пат. 2206663 С1 Російська Федерація, МПК7 Е 02 D 5/56, 5/20, 7/22. Спосіб зведення огорожуючої протифільтраційної інженерно-захисної конструкції (варіанти) / А.Н. Басиев, М.В. Зелов, А.Г. Ікусов; заявл. 21.12.2001; опубл. 20.06.2003.

9. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення: ДСТУ Б В.2.1-3-96 (ГОСТ 30416-96).

10. Вознесенський В.А. Статистичні методи планування експерименту в техніко-економічних дослідженнях / В.А. Вознесенський. – 2-е вид. – М.: Фінанси та статистика, 1981. – 263 с.

11. Вознесенський В.А. Численні методи рішення будівельно-технологічних завдань на ЕВМ / В.А. Вознесенський, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.