

На правах рукописи

**ЖЕЛВАКОВА Евгения Александровна**

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ  
РАЗЛИЧНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА  
И ПРОМЫВКА ИХ ВОДОЙ**

Специальность 06.01.02 – "Мелиорация, рекультивация и охрана земель"

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт - Петербург - 2004

Работа выполнена на кафедре «Инженерных мелиораций,  
гидрологии и охраны окружающей среды» в ГОУ ВПО  
«Санкт – Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор **Михалев Михаил Андреевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Семин Евгений Геннадиевич;**

кандидат технических наук **Гинц Андрей Владиславович**

**Ведущая организация** – Государственный унитарный научно-проектный  
центр «Ленводпроект»

Защита состоится "    "            2004 г. в \_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д212.229.17  
при ГОУ ВПО «Санкт - Петербургский государственный политехнический  
университет» по адресу:  
195251, Санкт - Петербург, ул. Политехническая, д. 29,  
в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
ГОУ ВПО «Санкт - Петербургский государственный политехнический  
университет»

Автореферат разослан "    " \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Орлов В.Т.

## 1. Общая характеристика работы

Актуальность работы. Разливы нефти и нефтепродуктов в случае аварии на нефтепроводах и продуктопроводах, при железнодорожном, морском, речном и автомобильном транспорте этих продуктов, заправочных станциях, на нефтеперерабатывающих и химических предприятиях часто приводят к катастрофическим ситуациям, а также к многолетним отрицательным последствиям для состояния окружающей среды. При авариях с разрывами трубопроводов, а также при ремонтных работах наблюдаются разливы нефти от нескольких тонн, приводящих к локальному загрязнению окружающего ландшафта, до тысяч тонн с катастрофическими последствиями для экологии района и, в первую очередь, для сельскохозяйственного производства на загрязненных землях.

Методы ликвидации разливов нефти с поверхности почвы менее разнообразны, чем с поверхности воды, к ним относятся: механический (засыпка загрязненных участков грунтом, вывоз загрязненной почвы в отвалы; ее рыхление и вспашка); физико-химический (сжигание, внесение в почву биогенных элементов, обработка почв растворами ПАВ и т.п.); биологический (поддержание оптимальных условий биоразложения нефти путем внесения нефтеокисляющих микроорганизмов, питательных сред, например, молочной сыворотки, дрожжей, посева сельскохозяйственных культур и т.д.).

Проблеме агротехнической и биохимической рекультивации нефтезагрязненных земель в различных климатических регионах посвящено несколько сот работ, не дающих однозначного решения этой задачи.

В настоящей работе излагаются результаты исследований очистки загрязненных песчаных однородных и неоднородных грунтов различного гранулометрического состава путем промывки их водой.

Целью работы является изучение процесса впитывания нефтепродуктов в сухие и насыщенные водой однородные и неоднородные песчаные грунты различного гранулометрического состава и очистки загрязненных нефтепродуктами грунтов путем промывки водой.

Для достижения этой цели были рассмотрены следующие задачи:

- изучить процесс инфильтрации воды и нефтепродуктов в сухие и насыщенные водой и нефтепродуктами песчаные однородные и неоднородные грунты различного гранулометрического состава; найти в этих условиях скорость впитывания и коэффициент фильтрации;

- разработать модели впитывания воды и нефтепродуктов в песчаные грунты с использованием методов теории подобия и размерностей; получить критериальные уравнения зависимости безразмерной скорости впитывания и безразмерного коэффициента фильтрации от критериев подобия;
- исследовать процесс вытеснения из порового пространства одной жидкости другой при различных схемах загрязнения грунтов и режимах подачи воды в грунт и определить величину остаточного загрязнения;
- разработать мероприятия по очистке грунтов, загрязненных нефтепродуктами, путем промывки их водой.

Объект исследования. Для изучения процессов впитывания воды и нефтепродуктов в качестве объекта исследования были выбраны песчаные грунты трех типов различного гранулометрического состава. Выбор объекта не случаен, так как именно такие грунты наиболее подвержены такого рода загрязнениям, а, кроме того, их водно-физические свойства изменяются в узких пределах.

Методика исследования. Исследования проводились на лабораторной установке, которая представляет собой стандартный сосуд Мариотта и колонку, заполненную грунтами. Для определения водно-физических свойств грунтов применялись стандартные приборы и методики, разработанные в курсе механики грунтов. Постановка и проведение опытов, обработка их результатов производились в соответствии с методами физического моделирования явлений, в рамках теории подобия и размерностей. Для составления критериальных уравнений широко использовались комбинации чисел подобия с целью получения критериев подобия. При обработке результатов исследований применялся регрессионный анализ, определялись случайные погрешности измерений. Полученные данные сопоставлялись с результатами в смежных областях, в частности, для определения коэффициента фильтрации воды в песчаные грунты, и с имеющимися опытными данными по вытеснению одной жидкости другой из порового пространства грунта.

Научная новизна работы. Разработана методика физического моделирования процесса инфильтрации воды и нефтепродуктов в песчаные однородные и неоднородные грунты различного гранулометрического состава. На основании методов теории подобия и размерностей получены зависимости для скорости инфильтрации и установившейся скорости впитывания от определяющих параметров: плотности, вязкости и коэффициента поверхностного натяжения жидкости, контролирующего диаметра частиц и коэффициента неоднородности грунта как отношения контролирующего диаметра к эффективному, которые определяют размеры частиц грунта и порового пространства между ними.

Найдена зависимость коэффициента фильтрации воды, подаваемой на промывку загрязненного нефтепродуктами грунтов, в условиях, когда их поровое пространство полностью заполнено водой и нефтепродуктами. Определено относительное остаточное содержание нефтепродуктов в грунтах, которое с помощью такого метода очистки не может быть вытеснено водой.

Получена зависимость скорости впитывания воды в грунт от относительного содержания ее в поровом пространстве при условии, что поры полностью заполнены водой и нефтепродуктами. Исследована зависимость относительного содержания воды и нефтепродуктов в грунте от относительного количества подаваемой в грунт воды.

Личный вклад автора включает в себя решение следующих задач:

- создание методики проведения опытов и обработки их результатов;
- получение формул для определения скорости впитывания и коэффициента фильтрации в зависимости от определяющих характеристик грунтов и жидкостей, а также формулы для коэффициента фильтрации в случае, когда поровое пространство полностью заполнено водой и нефтепродуктами;
- разработка методики промывки водой грунтов, загрязненных нефтепродуктами.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов подтверждается использованием стандартных приборов и методов измерений, анализом и обобщением данных экспериментальных исследований на базе современных положений теории и практики физического моделирования сложных гидромеханических явлений, оценкой погрешностей измерений, привлечением теоретических разработок из области гидромеханики многофазных жидкостей, сопоставлением полученных результатов с данными, приведенными в работах других авторов.

Практическая ценность работы. Разработанная методика экспериментальных исследований может быть рекомендована для изучения инфильтрации при различных схемах подачи жидкостей в однородные и неоднородные песчаные грунты различного гранулометрического состава и промывок их водой. Предложенные зависимости позволяют производить расчеты параметров вертикальной инфильтрации при различных режимах подачи жидкостей в грунты, а также эффективности промыва их водой. Обоснована методика промыва грунтов, загрязненных нефтепродуктами, путем устройства дренажа.

Реализация работы. Отдельные положения и результаты исследований вошли в отчет ФЦП «Интеграция» «Развитие и поддержка филиала кафедры инженерных мелиораций, гидрологии и охраны окружающей среды СПбГПУ при Агрофизическом институте РАСХН».

На правах рукописи

**ЖЕЛВАКОВА Евгения Александровна**

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ  
РАЗЛИЧНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА  
И ПРОМЫВКА ИХ ВОДОЙ**

Специальность 06.01.02 – "Мелиорация, рекультивация и охрана земель"

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт - Петербург - 2004

Работа выполнена на кафедре «Инженерных мелиораций,  
гидрологии и охраны окружающей среды» в ГОУ ВПО  
«Санкт – Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор **Михалев Михаил Андреевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Семи́н Евгений Геннадиевич**;

кандидат технических наук **Гинц Андрей Владиславович**

**Ведущая организация** – Государственный унитарный научно-проектный  
центр «Ленводпроект»

Защита состоится "    "    2004 г. в \_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д212.229.17  
при ГОУ ВПО «Санкт - Петербургский государственный политехнический  
университет» по адресу:  
195251, Санкт - Петербург, ул. Политехническая, д. 29,  
в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
ГОУ ВПО «Санкт - Петербургский государственный политехнический  
университет»

Автореферат разослан "    " \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Орлов В.Т.

Результаты исследования внедрены организацией "Управление по мелиорации и сельскохозяйственному водоснабжению Ленинградской области и г.Санкт-Петербург".

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Анализ явления инфильтрации воды и нефтепродуктов в сухие однородные и неоднородные песчаные грунты различного гранулометрического состава, а также воды и нефтепродуктов в грунты, поровое пространство которых заполнено нефтепродуктами и водой, с позиций методов теории подобия и размерностей.
2. Критериальные уравнения связи скорости инфильтрации и установившейся скорости впитывания в зависимости от определяющих параметров - основных физических характеристик жидкостей и грунтов.
3. Методика проведения опытов и обработка их результатов с использованием методов математической статистики.
4. Подбор сглаживающих кривых для скоростей впитывания и коэффициентов фильтрации жидкостей с помощью методов корреляционного и регрессионного анализов.
5. Разработка методики очистки однородных и неоднородных песчаных грунтов различного гранулометрического состава, загрязненных нефтепродуктами.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов и заключения и 7 приложений. Диссертация содержит 96 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 5 таблиц, список использованной литературы, состоящей из 87 наименований и приложения на 38 страницах (всего 134 страницы).

## **2. Основное содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы. Сформулированы основные цели и задачи исследований.

В первой главе дается обзор современного состояния вопроса по изучению вертикальной инфильтрации воды и нефтепродуктов в грунт.

Движение воды при инфильтрации происходит, в основном, под действием силы тяжести, вязкого трения и капиллярных сил. Этому вопросу посвящены работы С.Ф.Аверьянова, А.Н.Костякова, В.В.Ведерникова, Хазена, Козени и др.

В теории фильтрации существует большой раздел, который тесно связан с теорией и практикой добычи из глубоко залегающих подземных пластов основных энергоносителей, которыми и в XXI веке остаются нефть и газ. В этом случае фильтрация жидкостей происходит при преобладающем влиянии сил давления (межпластового и искусственного создаваемого избыточного), вязкого трения и капиллярных сил. Накопление нефти и газа в



пористых пластах-коллекторах, вытеснение нефти пластовой или искусственно закачиваемой водой или газом и основные технологии добычи управляются законами теории фильтрации. По сравнению с первым разделом количество работ здесь велико (Г.И.Баренблатт, И.А.Чарный, К.С.Басниев, В.М.Ентов, П.Я.Полубаринова-Кочина, Р.Е.Коллинз и многие другие).

Процесс впитывания нефтепродуктов в грунт изучен недостаточно, но именно с ним связано загрязнение грунтов при разливах нефтепродуктов на поверхности земли. Одна из задач изучения инфильтрации – установление закономерности изменения скорости впитывания от времени. Наиболее известным является решение В.В.Ведерникова. Однако это решение лишь косвенно учитывает (через высоту капиллярного подъема, дефицит влажности грунта и коэффициент фильтрации) такие важные водно-физические свойства грунтов и физические свойства жидкостей, как размер частиц, слагающих грунт, плотность, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Но и дефицит влажности, и высота капиллярного подъема, и коэффициент фильтрации зависят от этих свойств грунтов и жидкостей. Впервые такая задача была экспериментально поставлена и изучена, исходя из этих позиций, для однородного, практически равнотермического материала, на кафедре ИМГиООС СПбГУ.

На основании выполненного обзора литературных источников в диссертации сделан вывод о том, что и теоретические, и экспериментальные работы в области впитывания жидкостей в грунты основываются не на непосредственном учете параметров грунта и жидкости, от которых зависит явление, а учитывают их косвенно. Поэтому возникает необходимость в постановке исследований на физических моделях, по результатам которых можно было бы определить непосредственное влияние этих параметров на рассматриваемые явления.

Вторая глава посвящена постановке основных целей и задач исследований и обоснованию выбора условий проведения экспериментов.

В настоящее время существуют различные возможности для моделирования процесса инфильтрации воды в почву, в том числе широко применяется физическое моделирование. Физическое моделирование – изучение явления на физической модели (схеме) оригинала (натурного объекта), выполняемое на основе принципов теории подобия и размерностей. Модельный эксперимент позволяет изучать такие явления и процессы, которые выполнить непосредственно на оригинале затруднительно, экономически невыгодно, либо вообще невозможно в силу тех или иных причин.

Обработка данных лабораторных измерений и обобщение их результатов в виде эмпирических формул ведутся в соответствии с методами теории подобия и размерностей.

Конечная цель физического моделирования состоит в получении критериального уравнения, представляющего собой функциональную зависимость числа подобия, в котором содержится искомая физическая величина, от критериев, составленных из величин, характеризующих явление.

Изучаемое явление впитывания жидкости в грунт характеризуется следующими кинематическими и динамическими величинами: скоростью впитывания воды в грунт  $u$ , временем движения  $t$ , перепадом давления  $p$ , ускорением силы тяжести  $g$ . Свойства жидкости определяют ее плотность  $\rho$ , динамический коэффициент вязкости  $\mu$  и поверхностное натяжение жидкости  $\sigma$ . Грунт характеризуют крупность его частиц  $x$ , размеры порового пространства между ними  $y$ , а также пористость (или коэффициент пористости). Но отношение размеров порового пространства к крупности частиц грунта и есть характеристика его пористости. Кроме того, для исследуемых грунтов пористость оказалась практически одинаковой, поэтому в уравнение связи между перечисленными величинами она не вошла. С учетом этого замечания напишем уравнение в общем виде:

$$\varphi(x, y, u, t, p, g, \rho, \mu, \sigma) = 0. \quad (1)$$

Заметим, что скорость впитывания не является характерной величиной, поскольку она зависит от времени впитывания воды в грунт. Характерной величиной для данного процесса является коэффициент фильтрации, который будет определяться по опытным данным как установившаяся скорость впитывания из кривой зависимости скорости впитывания от времени.

Выберем из девяти величин, входящих в связь, три с независимыми размерностями. В качестве таковых возьмем те, которые обычно используются с целью получения фундаментальных чисел подобия:  $x$ ,  $u$ ,  $\rho$ . В соответствии с  $\pi$ -теоремой оставшиеся величины выразим через размерности выбранных. Вместо (1) получим:

$$\psi_1\left(\frac{y}{x}, Sh, Eu, Fr, Re, We\right) = 0, \quad (2)$$

где  $Sh = \frac{x}{t \cdot u}$  – число Струхала;  $Eu = \frac{p}{\rho \cdot u^2}$  – число Эйлера;  $Fr = \frac{u^2}{g \cdot x}$  – число Фруда;

$Re = \frac{\mu}{x \cdot u \cdot \rho}$  – число Рейнольдса;  $We = \frac{x \cdot u^2 \cdot \rho}{\sigma}$  – число Вебера.

Фундаментальные числа подобия можно комбинировать, создавая из них различные комбинации с целью получения критериев подобия. Критериями подобия называются числа

подобия, которые составлены из характерных величин сравниваемых явлений и физических констант среды, содержащихся в постановке задачи об определении движения, т.е. являются заданными. Во всех числах подобия содержится величина  $x$ , которая представляет собой линейную величину, определяющую размеры частиц грунта.

В механике грунтов в качестве характерного размера частиц грунта обычно принимается квантиль  $d_{60}$ . Если грунт однородный по линейным размерам частиц и все они имеют одинаковую форму (шарообразную), то размеры порового пространства при плотной укладке грунта целиком определяются размерами частиц. Если грунт неоднородный, то размеры порового пространства определяются размерами мелких частиц, заполняющих поры между крупными частицами. В механике грунтов в качестве таких частиц принимается квантиль  $d_{10}$ . Таким образом, можно утверждать, что симплекс  $y/x$  равен отношению  $d_{10}/d_{60}$ , которое называется коэффициентом неоднородности грунта; если он менее 3, грунт считается однородным.

Поскольку все рассмотренные выше числа подобия содержат заранее неизвестную скорость впитывания, которая будет определяться в результате эксперимента, ни одно из них не является критерием подобия. Между числами подобия могут существовать явные связи, представляющие собой следствие из известных условий движения и интегральных соотношений. В нашем случае такие интегральные условия описываются известным законом Дарси. Он позволяет установить, что числа Фруда и Эйлера находятся в обратной связи друг с другом, поэтому одно из них можно в дальнейшем из уравнения связи исключить.

Для получения критериев подобия в диссертации попарно комбинируются числа подобия так, чтобы в комбинации не входила неизвестная скорость впитывания. При этом имелось в виду, что комбинация чисел подобия может заменить только одно из них, так как система критериев и чисел подобия должна обладать необходимой полнотой. После соответствующих преобразований было найдено следующее критериальное уравнение, связывающее безразмерную скорость впитывания  $\bar{u} = \frac{1}{Mo} = u \frac{v}{g \cdot d_{60}^2}$  с определяющими явлениями критериями в таком виде:

$$\bar{u} = f \left( \frac{d_{10}}{d_{60}}, \bar{t}, \alpha, \bar{d}_{60} \right). \quad (3)$$

В нем присутствуют следующие критерии:

$$\bar{t} = \frac{1}{Re \cdot Sh} = t \frac{v}{d_{60}^2}; \quad \bar{d}_{60} = \sqrt[3]{Ga} = d_{60} \sqrt[3]{\frac{g}{v^2}}; \quad Ga = \frac{Re^2}{Fr} - \text{число Галилея};$$

$$\alpha = \sqrt[4]{Fr \cdot We} \cdot Mo = \sqrt[4]{\frac{\rho}{g\sigma} \cdot \frac{gd_{60}^2}{v}}; \quad \text{а также число Мошени} - Mo = \frac{Re}{Fr}.$$

Опыты проводились таким образом, чтобы можно было определить по их результатам кривую зависимости скорости впитывания от времени, обращая внимание в первую очередь на то, чтобы эта кривая переходила в прямую, параллельную горизонтальной оси координат, и имела на этом участке значительную протяженность. Средняя величина скорости впитывания, которую определяла сглаживающая прямая, параллельная горизонтальной оси, была равна коэффициенту фильтрации, который в данной задаче можно рассматривать как установившуюся скорость впитывания), но тогда для коэффициента фильтрации вместо (3) справедливо следующее критериальное уравнение:

$$\bar{k}_\phi = f\left(\alpha, \bar{d}_{60}, \frac{d_{10}}{d_{60}}\right), \quad (4)$$

в котором  $\bar{k}_\phi = k_\phi \frac{v}{g \cdot d_{60}^2}$ .

В результате выполненного в диссертации анализа критериальное уравнение для безразмерной скорости впитывания оказалось возможным критериальное уравнение для скорости впитывания представить в таком виде:

$$\bar{u} - \bar{k}_\phi = f(\bar{t}, \bar{k}_\phi, \alpha) \quad (5)$$

В третьей главе приведено описание экспериментальной установки и методики проведения опытов. Были исследованы основные водно-физические свойства песчаных грунтов.

Лабораторные опыты по инфильтрации воды и нефтепродуктов в песчаный грунт проводились в колонке, выполненной из оргстекла, диаметром 0,06 м и высотой 0,40 м. Колонка была заполнена сухим чистым кварцевым песком высотой 0,33 м. К нижней части колонки прикреплена сетка, удерживающая грунт и пропускающая жидкость на выходе из колонки. Профильтровывавшаяся жидкость собиралась в приемном поддоне. Колонка была оклеена изнутри грунтом, который исследовался в экспериментах. Оклеенный слой был достаточно равномерным и плотным, что позволяло предполагать существенное снижение пристенного эффекта.

Из двух грунтов, классифицированных по результатам ситового анализа как мелко- и среднезернистые пески, было создано три искусственных грунта. При этом в основу было положено условие: степень неоднородности каждого грунта должна быть различной и постепенно увеличиваться от самого мелкого из рассматриваемых грунтов до самого

крупного с различными значениями характерных диаметров частиц  $d_{10}$  и  $d_{60}$ : II тип грунта -  $d_{10}/d_{60} = 0,0155/0,024 = 0,6458$ , I тип грунта -  $d_{10}/d_{60} = 0,0175/0,042 = 0,4167$ , III тип грунта -  $d_{10}/d_{60} = 0,020/0,061 = 0,3279$ .

В соответствии с ГОСТ-25100-82 рассматриваемые грунты имеют следующие наименования: II – мелкий песок, I и III – средние пески. В экспериментах изучалась инфильтрация в грунты трех жидкостей: воды, керосина и дизельного топлива.

В диссертации разработана и предложена методика проведения экспериментов по изучению впитывания воды и нефтепродуктов в грунты, а также промывки загрязненных нефтепродуктами грунтов водой. Было проведено несколько серий экспериментов. В одной из них вначале в сухой грунт с помощью сосуда Мариотта подавался нефтепродукт и определялась скорость его впитывания. Затем в грунт порциями подавалась промывная вода; определялась скорость впитывания воды во время подачи каждой порции и количество воды и нефтепродуктов, которые вытеснялись из загрязненного грунта. Объем подаваемых и вытесняемых жидкостей определялся с помощью стандартных мерных цилиндров. В другой серии экспериментов в грунт сначала подавалась вода, затем – нефтепродукты, после чего – снова порциями промывная вода. В этих опытах также на каждом этапе определялась скорость впитывания жидкости в грунт и количество вытесняемых из него жидкостей.

В четвертой главе проведен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований по изучению впитывания воды и нефтепродуктов в песчаные грунты при различных схемах подачи жидкостей. Выявлены особенности процесса впитывания нефтепродуктов в сухие грунты и грунты, насыщенные водой. Исследовано влияние различных схем подачи воды на промыв.

На основании проведенных опытов можно сделать следующие выводы о коэффициенте фильтрации исследуемых жидкостей: безразмерный коэффициент фильтрации конкретной жидкости в грунт уменьшается от грунта II типа, далее - к грунту I и, наконец, - к грунту III типа, в основном, из-за увеличения коэффициента неоднородности грунта. Безразмерное время, при достижении которого скорость впитывания становится постоянной (для всех типов грунта), у воды 8-10 раз меньше, чем у дизельного топлива, и в 2 раза меньше, чем у керосина.

Кривые впитывания воды в сухие грунты располагаются существенно выше кривых впитывания воды в грунты, насыщенные нефтепродуктом. В дальнейшем, по мере поступления в грунт, насыщенный нефтепродуктом, промывной воды порциями по 300 мл, кривые впитывания воды поднимаются (установившаяся скорость впитывания после каждой промывки, как правило, увеличивается). Этот подъем однозначен во всей области изменения

кривых для каждого типа грунта. Данные результаты соответствуют выводам, полученным Коллинзом, об увеличении коэффициента фильтрации жидкости с увеличением ее содержания (влажности) в поровом пространстве грунта. Анализируя результаты исследования, можно сделать следующий вывод: если нефтепродукт попал в грунт, насыщенный водой, то он вымывается хуже, чем нефтепродукт, который вначале попал в сухой грунт.

В пятой главе находится вид функциональных зависимостей коэффициента фильтрации и скорости впитывания от основных физических характеристик жидкостей и грунтов.

В ходе проведения экспериментов были получены данные о скорости впитывания нефтепродуктов и воды в изучаемые грунты. Используя эти данные, найдем в явном виде критериальное уравнение (4), выведенное во второй главе. В соответствии с этим уравнением безразмерный коэффициент фильтрации  $\bar{k}_\phi$  зависит от трех критериев:  $\alpha$ ,  $\bar{d}_{60}$ ,  $d_{10}/d_{60}$ . Трудности поиска параметров критериального уравнения связаны с тем, что факторное пространство получилось четырехмерным. Кроме того, критерии  $\alpha$  и  $\bar{d}_{60}$  являются функциями физических параметров грунта и жидкости, а критерий  $d_{10}/d_{60}$  - только грунта. В этой связи решено было вначале искать зависимость коэффициента фильтрации  $\bar{k}_\phi$  от двух критериев  $\alpha$ , и  $\bar{d}_{60}$ , тем самым от четырехмерного пространства перейти к трехмерному. Помимо прочего, в трехмерном пространстве предполагалось, что решение можно представить в виде степенного одночлена, который можно было логарифмировать, тогда в логарифмической системе координат получалось уравнение плоскости. Было обнаружено, что опытные точки расположились в трех плоскостях, каждой из которых соответствовал свой тип грунта. Следовательно, безразмерный коэффициент фильтрации зависит от отношения  $d_{10}/d_{60}$ .

Далее определялись точки пересечения плоскостей с осью  $\lg \bar{k}_\phi$ . Расстояния от этих точек до начала осей координат представлялись в виде линейной функции от  $\lg(d_{10}/d_{60})$ . После потенцирования была получена формула для определения коэффициента фильтрации в виде степенного одночлена. Однако, расчеты по ней дали результаты, которые в отдельных случаях заметно отличались от опытных данных. Но при этом был обнаружен интересный результат: показатели степени у критериев  $\alpha$  и  $\bar{d}_{60}$  оказались практически одинаковыми. Это обстоятельство позволило уменьшить размерность факторного пространства на единицу и представить критериальное уравнение в виде:

$$\bar{k}_\phi = f\left(\frac{\alpha}{d_{60}}, \frac{d_{10}}{d_{60}}\right). \quad (6)$$

Решение уравнения (6) по опытным данным находилось в виде степенного одночлена, но вначале для каждого грунта определялись параметры прямой регрессии: зависимость безразмерного коэффициента фильтрации от отношения  $\alpha/d_{60}$ . Оказалось, что каждому грунту соответствует своя прямая регрессии, отсекающая определенный отрезок на оси  $\lg \bar{k}_\phi$ . Принималось, что эти отрезки находятся в линейной зависимости от величины  $\lg(d_{10}/d_{60})$ . В соответствии с этими данными получено по методу наименьших квадратов уравнения прямой регрессии (коэффициент корреляции близок к единице).

После потенцирования была найдена формула для установившейся скорости фильтрации в зависимости от определяющих характеристик грунта и жидкостей:

$$\bar{k}_\phi = 0,021 \cdot \left(\frac{\alpha}{d_{60}}\right)^{2,3} \cdot \left(\frac{d_{10}}{d_{60}}\right)^{5,8}. \quad (7)$$

В литературе предложены различные эмпирические формулы для расчета коэффициента фильтрации воды. Расчеты по формуле (7), представленной в размерном виде, сравнивались с результатами, полученными по формулам Хазена, Козени и М.П.Павчича для коэффициента фильтрации воды в песчаные грунты. Формула Хазена дает результаты, которые близки к полученным нами данным. В формуле М.П.Павчича принят постоянный коэффициент, учитывающий форму частиц, равный для песчано-гравелистых грунтов единице. По нашим данным для мелко- и среднезернистых песков этот множитель следовало принять равным 2,4. В формуле Козени постоянную можно принять равной 7,7.

Для неустановившейся скорости впитывания определялись параметры критериального уравнения (5). В результате регрессионного анализа оказалось, что опытные точки относительно сглаживающей кривой лежат со значительным разбросом, при этом они расслоились в зависимости от вида жидкости. Такой результат можно объяснить, опираясь на формулу В.В.Ведерникова для скорости впитывания, в которую, кроме коэффициента фильтрации, входит высота капиллярного подъема воды в грунтах и дефицит влажности (недостаток до полного насыщения), то есть параметры, которые характеризуют физические свойства жидкостей и свойства грунтов. В качестве такого параметра, комплексно учитывающего физические свойства жидкостей и свойства грунтов, в нашей задаче выступает безразмерный критерий подобия  $\alpha$ . (этот критерий имеет наибольшее значение у дизельного топлива и наименьшее – у воды). Следовательно, можно предложить критериальное уравнение для избытка безразмерной скорости впитывания в таком виде:

$$\bar{u} - \bar{k}_\phi = a \cdot \left( \frac{\bar{k}_\phi}{\alpha^e} \right)^b \cdot \bar{t}^c.$$

В результате регрессионного анализа была получена следующая формула:

$$\bar{u} = 215,0 \cdot \frac{\bar{k}_\phi^{0,25}}{\alpha^{2,00} \bar{t}^{1,20}} + \bar{k}_\phi. \quad (8)$$

Кривые впитывания исследуемых жидкостей в грунты, построенные по формуле (8), не только хорошо описывают процессы впитывания жидкостей в песчаные грунты, но и правильно отражают момент времени, когда скорость впитывания максимально приближается к коэффициенту фильтрации (установившейся скорости впитывания).

Для того, чтобы произвести промывку грунтов, загрязненных нефтепродуктами, водой, необходимо знать, как изменяется скорость впитывания воды в зависимости от ее содержания в поровом пространстве грунта при условии, что общее содержание воды и нефтепродукта остается постоянным (поры полностью заполнены жидкостью, но одна из них (вода) вытесняет другую (нефтепродукт)). Скорость впитывания воды в песчаные грунты изменяется на всех этапах промывки, так как она зависит от относительного содержания воды в поровом пространстве грунта.

По найденной в результате проведения экспериментов скорости впитывания воды  $u$  при различных схемах ее подачи в грунт и известной установившейся скорости впитывания воды в сухие грунты определялось отношение  $u/k_\phi$ . Относительное содержание воды в поровом пространстве  $\theta_e$  на разных этапах проведения опытов определялось расчетом по количеству поданных в грунт, вытесненных из него и задержанных в нем жидкостей. После этого определялось отношение  $\theta_e/m$ , где  $m$  – пористость грунта.

Опытные точки наносились на плоскость прямоугольной системы координат, в которой вертикальной осью было отношение  $\bar{u}/\bar{k}_\phi$ , а горизонтальной -  $\theta_e/m$ ; затем определялось уравнение сглаживающей кривой в виде функции:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{k}_\phi} = F\left(\frac{\theta_e}{m}, \frac{d_{10}}{d_{60}}\right), \quad (9)$$

Сглаживающая кривая в виде полинома 2-й степени была построена с использованием компьютерной программы Excel, она имеет следующий вид:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{k}_\phi} = 0,9 \left( \frac{\theta_e}{m} \right)^2 \left( \frac{d_{10}}{d_{60}} \right)^{0,4} + 0,15 \frac{\theta_e}{m} \left( \frac{d_{10}}{d_{60}} \right)^{0,2} - 0,05. \quad (10)$$



Выравнивающая сглаживающей кривой была получена с высоким значением коэффициента корреляции, равным 0,8. Она отвечает верхнему граничному условию: при

$\frac{\theta_e}{m} \cdot \left( \frac{d_{10}}{d_{60}} \right)^{0,2} = 1$ ,  $\bar{u}/\bar{k}_\phi = 1$ . Что касается нижнего граничного условия, то скорость

впитывания воды в грунт становится равной нулю не в точке  $\theta_e/m = 0$ , а при

$\frac{\theta_e}{m} \cdot \left( \frac{d_{10}}{d_{60}} \right)^{0,2} = 0,1668$ . Это означает, что для грунтов рассмотренных типов - II, I, III -

скорость впитывания приближается к нулю при содержании воды в поровом пространстве соответственно: 0,18, 0,20 и 0,21, что вполне соответствует физике явления. Таким образом,

зависимость (10) справедлива при  $0,1668 \leq \frac{\theta_e}{m} \cdot \left( \frac{d_{10}}{d_{60}} \right)^{0,2} \leq 1$ .

В шестой главе произведен расчет промывок песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами, при устройстве дренажа на загрязненном массиве. Промывка загрязненных нефтепродуктами песчаных грунтов может осуществляться естественным путем (за счет осадков) и путем искусственного дождевания или напуска воды на поверхность загрязненного грунта. Задача состоит в том, чтобы промыть грунт до такого состояния, когда в грунте остается остаточное содержание нефтепродуктов, промыв которых рассматриваемым методом неэффективен или вообще невозможен. При наличии дренажа в осушаемом и очищаемом от нефтепродуктов массиве поддерживается такое водо-воздушное состояние, которое благоприятно для живых организмов (штаммов бактерий), питающихся нефтепродуктами. Для очистки грунта от остаточного содержания в нем нефтепродуктов используют различные методы очистки – биологические и физико-химические.

В заключении сформулированы обобщенные выводы и задачи дальнейших исследований.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Доказано, что коэффициент фильтрации для песчаных мелко- и среднезернистых грунтов в соответствии с эмпирической формулой (7) зависит от определяющих параметров: плотности, вязкости и коэффициента поверхностного натяжения жидкости, от характеристик грунта - контролирующего диаметра частиц и коэффициента неоднородности. Данная формула получена впервые на основе обобщения опытных данных о скорости впитывания в указанные песчаные грунты трех видов жидкостей – воды и двух нефтепродуктов (дизельного топлива и керосина).

2. Впервые получена зависимость безразмерной скорости впитывания от безразмерного времени и безразмерного коэффициента фильтрации (8), учитывающих комплексно влияние всех сил, определяющих явление.
3. В результате обработки экспериментальных данных доказано, что относительная скорости впитывания воды в грунт при промывках зависит от относительного содержания воды в поровом пространстве (10). Обнаружено, что скорость впитывания увеличивается с увеличением содержания воды в поровом пространстве грунта по мере замещения нефтепродукта водой.
4. Доказано, что нефтепродукты, попавшие в грунт, насыщенный водой, вымывается хуже, чем те же нефтепродукты, которые вначале попадают в сухой грунт.
5. На основании проведенных исследований можно утверждать, что суммарное количество жидкостей в поровом пространстве при промывках стремится к тому же количеству, которое содержалось в порах перед началом промывки, и не зависит от того, какие это жидкости.
6. Выполненные исследования промыва песчаных грунтов водой подтвердили существование остаточного содержания нефтепродуктов в грунте, которое объясняется наличием тупиковых пор, из которых невозможно водой вытеснить нефтепродукт. Графики, позволяющие определить остаточное количество нефтепродуктов в грунте, приведены в диссертации.

Для использования результатов выполненных исследований промывки водой грунтов, загрязненных нефтепродуктами, предлагается устройство дренажа на загрязненной территории. Для реализации метода в натуральных условиях необходимо провести исследования водно-физических свойств загрязненных грунтов и произвести контрольную промывку в лабораторных условиях. В результате определяется объем нефтепродуктов и воды в загрязненном грунте и остаточное содержание нефтепродуктов в порах грунта. Эти данные позволяют определить режим промывок и их продолжительность в естественных условиях, а также при организации искусственной подачи воды на загрязненный массив.

Дальнейшие исследования в этом направлении необходимо продолжать, используя другие типы грунтов, в первую очередь, с различным содержанием в них глинистых частиц, а также изучить свойства глинистых грунтов в качестве материала для создания экранов с целью организации мероприятий по защите грунтов и грунтовых вод от загрязнений в местах возможных разливов нефтепродуктов. Следует также предусмотреть в исследованиях возможность использования других типов и видов нефтепродуктов.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Желвакова Е.А., Сарварова Р.Р. Загрязнение грунтов нефтепродуктами // XXXI Неделя науки СПбГПУ: материалы межвузовской научной конференции/ Санкт-Петербургский гос. политех. университет. - 2003. - С. 33.
2. Кардава М.Г., Сарварова Р.Р., Желвакова Е.А. Защита почвогрунтов и грунтовых вод от загрязнения нефтепродуктами // IV Международный молодежный экологический форум "Экобалтика'2002": тезисы докладов. - С.-Петербург, 2002. - С. 161.
3. Михалев М.А., Желвакова Е.А. Влияние физико-механических характеристик грунтов и физических свойств жидкостей на процессы загрязнения грунтов нефтепродуктами и промывок их водой // 6-я Международная специализированная конференция и выставка «Акватерра»: тезисы докладов. – СПб., 2003. - С. 199-200.
4. Желвакова Е.А. Влияние физико-механических характеристик грунтов и физических свойств жидкостей на процессы инфильтрации // Гидравлика (наука и дисциплина): материалы междунар. науч.-теор. конф. / Санкт-Петербургский гос. политех. университет. - СПб., 2004. - С. 13-14.
5. Желвакова Е.А. Влияние степени неоднородности грунтов на процессы загрязнения их нефтепродуктами и промывок водой // V Международный молодежный экологический форум "Экобалтика'2004": тезисы докладов. - С.-Петербург, 2004. - С. 84.