

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ОСНОВЫ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ
РАБОТ**

Казань

2023

УДК 556+532

Рекомендовано к размещению в электронном архиве Научной библиотеки им. Н. И. Лобачевского (протокол № 5 от 16 марта 2023 года)

Основы динамики подземных вод: Методические указания к проведению лабораторных работ. Составители: Муравьев Ф.А., Софинская О.А., Усманов Р.М. – Казань: Казанский федеральный университет, 2023.

Методические указания направлены на обеспечение выполнения лабораторных работ по курсам бакалавриата 05.03.01 геология «Основы динамики и гидрогеохимии подземных вод», магистратуры 05.04.01 геология «Динамика и гидрогеохимия подземных вод в техногенезе», экспериментальной части курсовых и квалификационных работ, выполняемых бакалаврами и магистрами по направлению подготовки «Инженерная геология и гидрогеология» и смежных направлений, практического ознакомления студентов с технологиями проведения измерений и моделирования в гидрогеологии и геоэкологии.

© Казанский федеральный университет

Оглавление

Введение	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ТЕЧЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ	5
Лабораторная работа 1а.....	7
Лабораторная работа 1б.....	7
Лабораторная работа 1в.....	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. НАПОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. БЕЗНАПОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЧЕРЕЗ НАСЫПНУЮ МОДЕЛЬ НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВЕННЫХ ПУТЕЙ ПЕРЕНОСА РАСТВОРА ЧЕРЕЗ НАСЫПНУЮ МОДЕЛЬ ГРУНТА	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ФИЛЬТРАЦИЯ ЧЕРЕЗ МОНОЛИТ ГРУНТА	26
Приложение 1. Структура журналов испытаний.....	37
Приложение 2. Расчетные методы оценки проницаемости в зависимости от гранулометрического состава грунта.....	40
Приложение 3. Классы проницаемости грунтов.....	41
Приложение 4. Примерные темы квалификационных работ, выполняемых на фильтрационном приборе:.....	42

Введение

Спектр задач, решаемых на представленном оборудовании, связан с испытаниями грунтов на проницаемость. При этом первые две работы направлены на ознакомление с основными физическими законами и принципиальным устройством приборов для измерения скорости и напора течения. Представлены методики прямой оценки изменения проницаемости для несвязных и связных грунтов, нарушенного и ненарушенного сложения, при задаваемом градиенте давления, выбираемом, в том числе, из диапазона значений, характерного для пластовых условий. Сведения о конструкции приборов даны таким образом, чтобы при проведении лабораторных работ была возможна замена приборов – аналогов или конструктивных элементов. Предлагаемый математический аппарат адаптирован для специалистов, использующих гидродинамические расчеты в технических целях, с указанием границ применимости базовых положений. Выполнение предложенных лабораторных работ позволяет студентам получить наглядное представление о реализации теоретических законов подземной гидродинамики и одновременно – освоить методы получения натуральных данных о фильтрации.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ТЕЧЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Теория: режимы течения подземных вод

Режим течения воды устанавливается с помощью числа Рейнольдса:

$$R = \frac{vD\rho}{\eta}$$

где D – поперечный размер трубы, v – скорость потока, ρ – плотность жидкости, η – динамическая вязкость. Число Рейнольдса - величина безразмерная. Оно указывает на характер течения.

Турбулентное течение ($Re > 2300$ для круглой трубы) – с перемешиванием элементарных струек и пульсацией скорости потока и давления (карстовые полости, прифилтровые зоны скважин, при резкой смене диаметра канала, извилистости).

Ламинарное течение – без перемешивания элементарных струек (в трещинах горных пород с небольшой кривизной и шероховатостью).

Нестационарное течение – наблюдается при изменении скорости потока в зависимости от координат и времени.

Стационарное течение – означает, что скорость потока зависит от координат, но не зависит от времени (установившаяся фильтрация).

Течение несжимаемой жидкости - подразумевает, что плотность жидкости одинакова во всех точках потока.

Условие неразрывности потока – заключается в том, что величина расхода жидкости не зависит от изменения сечения трубки тока: $Q = v \cdot S = const$, т.е. при стационарном течении несжимаемой жидкости через любые сечения трубки тока, каждую секунду протекают одинаковые объемы жидкости.

Движущие силы течения подземных вод:

- ✓ сила тяжести (в зоне аэрации, безнапорное течение)
- ✓ приложенное давление (напорное течение)
- ✓ гидростатический напор
- ✓ скоростной напор (в трещинах и полостях)
- ✓ вязкость
- ✓ градиент капиллярного давления (в зоне аэрации)

- ✓ градиент расклинивающего давления (в тонких пленках)

Закон Бернулли рассматривает *стационарное течение несжимаемой идеальной жидкости*. Давление при этом одинаково во всех поперечных сечениях трубки тока.

Уравнение Бернулли является следствием закона сохранения полной энергии системы:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = const$$

где ρ — плотность жидкости, v — скорость потока, h — высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости, p — давление в точке пространства, где расположен центр массы рассматриваемого элемента жидкости, g — ускорение свободного падения. Постоянная величина в уравнении называется **гидродинамическим напором**.

При данном виде течения возникает *гидродинамическое сопротивление* – сопротивление движению жидкости, вызванное влиянием стенок труб, каналов и пр. Оно вызывает постепенное падение гидродинамического напора при движении вдоль трубы.

Оборудование

- трубки одинакового диаметра, но разной длины
- трубка Пито
- пьезометр
- насос перистальтический
- емкость с водой
- мерная емкость
- секундомер
- штативы
- подъемное устройство с регулируемой высотой

Лабораторная работа 1а

Цель работы: найти полную энергию гидродинамической системы.

Задачи работы:

1. Откалибровать перистальтический насос для каждого рабочего режимного деления.
2. Рассчитать расход воды для каждого входного давления системы.
3. Рассчитать полную энергию системы для каждого входного давления системы.

Ход работы:

1. Собрать гидродинамическую систему, состоящую из:
 - трубок, присоединенных к насосу;
 - подъемного устройства;
 - приемного стакана для жидкости.
2. Измерить диаметр трубок.
3. Произвести запуск насоса и для каждого рабочего режима измерить ВЫСОТЫ:
 - входа в систему трубок,
 - выхода из системы.
4. Перевести высоту приемного стакана на удобный уровень и для каждого режима измерить расходы жидкости, предварительно измерив высоты по п.3.
5. Заполнить таблицу из Приложения 1а.

Лабораторная работа 1б

Цель работы: найти гидродинамическое сопротивление системы.

Ход работы:

1. Воспользоваться собранной гидродинамической системой и значениями входных давлений, полученными в л.р. 1а.
2. Меняя длины трубок, рассчитать скорости потока для каждой длины на каждом из рабочих режимов насоса.

3. Заполнить таблицу из Приложения 1б.

4. Проверить утверждение о том, что для каждого рабочего режима насоса полная энергия системы остается постоянной, независимо от длины трубки.

Лабораторная работа 1в

Цель работы: определить гидродинамический напор экспериментальной системы.

Ход работы:

1. Собрать установку, состоящую из:

- трубок, присоединенных к трубке Пито и к вертикальному пьезометру;
- насоса, присоединенного входом к емкости с водой, а выходом к трубке системы.

Насос расположить на столике, зафиксировав его высоту. Мерную емкость закрепить на штативе и соединить с выходом из системы трубок. Трубку Пито и пьезометр закрепить на штативах, зафиксировав высоту.

2. Измерить диаметр трубок.

3. Измерить высоты:

- входа в систему трубок,
- входа в трубку Пито,
- входа в пьезометр,
- выхода из системы.

4. Включить насос, зафиксировав входное давление.

5. Добиться устойчивого течения в системе трубок.

6. Измерить расход воды по наполнению мерной емкости с помощью секундомера.

7. Измерить уровень воды в трубке Пито и пьезометре.

8. Зафиксировать появление пузырьков газа и пульсаций.

9. Измерения повторить при разных режимах насоса и разном перепаде высот между входом и выходом системы трубок.

10. Заполнить таблицу результатов из Приложения 1в.

Контрольные вопросы

1. Какие допущения приняты в расчетах к данной работе?
2. Как можно определить C_i , если оно не равно 0?
3. Как проявляется гидродинамическое сопротивление в трубе?
4. Какие факторы усиливают, а какие ослабляют гидродинамическое сопротивление?
5. В каких случаях может быть нарушено условие несжимаемости жидкости?
6. В каких случаях может быть нарушено условие неразрывности потока?
7. По каким причинам при течении жидкости в трубке могут выделяться пузырьки газа?
8. Что из себя представляет трубка Пито?
9. Приведите примеры применения закона Бернулли на практике.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Теория

Течение вязкой жидкости задано, исходя из представления о трении текущих слоев друг о друга. Используется закон вязкого трения Ньютона (рис. 1):

$$F_{\text{тр}} = \eta S \frac{u_0}{h},$$

где η – коэффициент динамической вязкости, S – площадь трущихся поверхностей, u_0 – скорость потока на максимальном удалении от неподвижной поверхности, h – расстояние от неподвижной до свободной поверхности или полуширина потока.

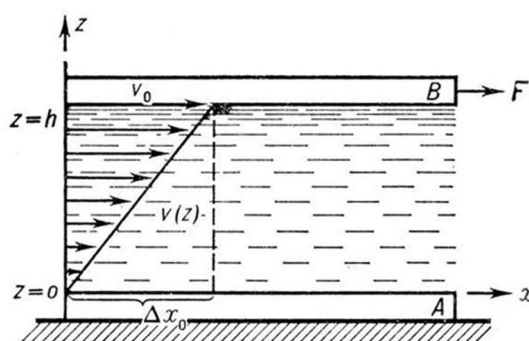


Рис. 1. Вязкое трение в жидкости между поверхностями А и В

Течение идеальной жидкости – представляет собой упрощенную модель, в которой предполагается, что слои жидкости не испытывают касательных напряжений при движении друг относительно друга (нет внутреннего трения).

Вязкое течение ньютоновской жидкости – подразумевает постоянную вязкость жидкости при заданной температуре. Характерно для пор более 1 мкм.

Вязкое течение неньютоновских жидкостей – проявляется, когда вязкость жидкости зависит от градиента скорости потока. Такие вещества подразделяются на: *вязкопластичные* (тиксотропные) – имеющие порог напряжения сдвига, необходимый для начала течения (течение воды в порах менее 1 мкм, буровых растворов, глинистые суспензии); *дилатантные* (в частности, реопексные) – увеличивающие вязкость при росте скорости деформации (зыбучий песок).

Закон Пуазейля связывает объемную скорость течения жидкости (*расход*) с разностью давления в начале и конце трубки как единственной движущей силой

потока, вязкостью жидкости (противодействующей силой), радиусом и длиной трубки:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)\pi r^4}{8\eta l}$$

где Q - расход жидкости ($\text{м}^3/\text{с}$), $(P_1 - P_2)$ - разность давлений жидкости на концах трубки (Па), r - внутренний радиус трубки (м), l - длина трубки (м), η - вязкость жидкости ($\text{Па}\cdot\text{с}$).

Закон Пуазейля используют в случае, если течение жидкости ламинарно.

Для линейной скорости потока в трубке закон Пуазейля выглядит как

$$q = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r^2}{8\eta l}$$

Оборудование

- трубки разных диаметров
- пьезометр
- насос перистальтический
- емкость с водой
- мерная емкость
- секундомер
- штативы
- столик с регулируемой высотой

Цель работы: рассчитать линейную скорость потока для каждого участка системы трубок.

Ход работы:

1. Собрать установку, состоящую из:
 - последовательно соединенных трубок разных диаметров, присоединенных к вертикальному пьезометру;
 - насоса, присоединенного входом к емкости с водой, а выходом к трубке системы.

Насос расположить на столике, зафиксировав его высоту. Мерную емкость закрепить на штативе и соединить с выходом из системы трубок. Пьезометр закрепить на штативе, зафиксировав высоту.

2. Измерить диаметры и длины трубок.
3. Измерить высоты:
входа в систему трубок, входа в пьезометр, выхода из системы.
4. Включить насос, зафиксировав входное давление (входное давление для каждого режима насоса измерено в Лабораторной работе 1).
5. Добиться устойчивого течения в системе трубок.
6. Измерить расход воды по наполнению мерной емкости с помощью секундомера.
7. Измерить уровень воды в пьезометре.
8. Зафиксировать появление пузырьков газа и пульсаций.
9. Выполнить расчеты линейных скоростей потока для разных участков и заполнить таблицу результатов из Приложения 2.

Контрольные вопросы

1. Что происходит с потоком вязкой жидкости при внезапном сужении трубки?
2. Что происходит с потоком вязкой жидкости при внезапном расширении трубки?
3. В каких условиях течения вязкостью жидкости можно пренебречь, а в каких нельзя?
4. На какой из линий тока достигается максимальная скорость движения вязкой жидкости при ламинарном течении?
5. В каких случаях рассматривается течение неньютоновской жидкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. НАПОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

ЧЕРЕЗ НАСЫПНУЮ МОДЕЛЬ ГРУНТА

Теория: основные понятия теории фильтрации подземных вод

Водопроницаемость грунта - свойство грунта, заключающееся в способности пропускать через себя воду. Количественно водопроницаемость характеризуется коэффициентом фильтрации.

Фильтрация - движение жидкости в пористой и трещиновато-пористой среде (грунте) под действием напорного градиента в условиях полного водонасыщения.

Фильтрационный поток - поток фильтрующейся в грунте жидкости.

Скорость фильтрации - воображаемая (условная) скорость движения фильтрующейся в грунте жидкости, равная отношению ее расхода в данном живом сечении к полной площади этого сечения.

Действительная скорость фильтрационного потока - средняя скорость движения жидкости в самих пустотах (порах) грунта, вмещающего фильтрационный поток.

Ламинарная фильтрация - движение фильтрующейся жидкости со скоростью, линейно зависящей от градиента напора.

Турбулентная фильтрация - движение фильтрующейся жидкости со скоростью, пропорциональной градиенту напора в степени меньше единицы.

Напорная фильтрация - фильтрация жидкости в условиях, когда поверхности, выделяющие область фильтрации вдоль потока жидкости, непроницаемы.

Гидравлически эквивалентный диаметр пор - вычисленный по расходу фильтрации диаметр поровых каналов в грунте, приблизительно равный поперечникам каналов в местах их сужений (перехватов).

Коэффициент фильтрации, K_f [м/с] - коэффициент пропорциональности в формуле Дарси, характеризующий степень водопроницаемости пористого тела (грунта) и зависящий, главным образом, от поперечника поровых каналов в материале.

Проницаемость пористой среды представляет собой способность горной породы пропускать флюид при перепаде давления. Проницаемость измеряется в Дарси (darcy, обозначение «Д»), внесистемных единицах; 1 Д приблизительно равен 1 мкм².

Проницаемость бывает абсолютной, фазовой и относительной.

Абсолютная проницаемость – это проницаемость пористой среды для однородной жидкости и газа.

Фазовая проницаемость – проницаемость пористой среды для данного флюида в присутствии другой фазы (нефть – вода, нефть – газ, газ — вода).

Закон Дарси - основной закон сопротивления при фильтрации воды (являющейся однородной и практически несжимаемой жидкостью) в песчаных грунтах экспериментально установлен Дарси в 1852-1855 гг. Впоследствии этот закон был распространен на другие грунты и пористые материалы. Закон Дарси состоит в том, что расход жидкости, фильтрующейся через пористый материал, пропорционален всей площади поперечного сечения потока (включая частицы материала и свободное пространство между ними) и градиенту напора:

$$q = -K_{\phi} \nabla H$$

Ограничения на применимость закона Дарси. Закон Дарси справедлив для большинства потоков подземных вод, однако он нарушается в следующих случаях:

- ✓ при резком ускорении фильтрационного потока, например, при фильтрации в высокопроницаемых породах, попадании потока в трещины, карстовые полости, в локальных зонах около скважин, шахт;
- ✓ при очень низких скоростях фильтрации и переходе течения в вязкопластический режим, например, иногда в глинах.

Оборудование

- секундомер
- установка для измерения коэффициента фильтрации в нарушенных образцах - пермеаметр

Схема пермеаметра (рис. 2):

1, 2, 3 – система подачи воды с постоянным напором (величина которого поддерживается вакуумом в верхней части сосуда)

4, 5 – краники расходомера

6, 7 – измеритель расхода воды

8, 9 – рабочая камера с образцом грунта

10 – система регуляции выходного давления (сливной бачок)

11 – пригрузочный пористый диск для противодействия всплыванию грунта и равномерного распределения расхода воды, втекающей в верхний отсек рабочей камеры

12 – мелкая сетка для удержания частиц от вымывания из образца

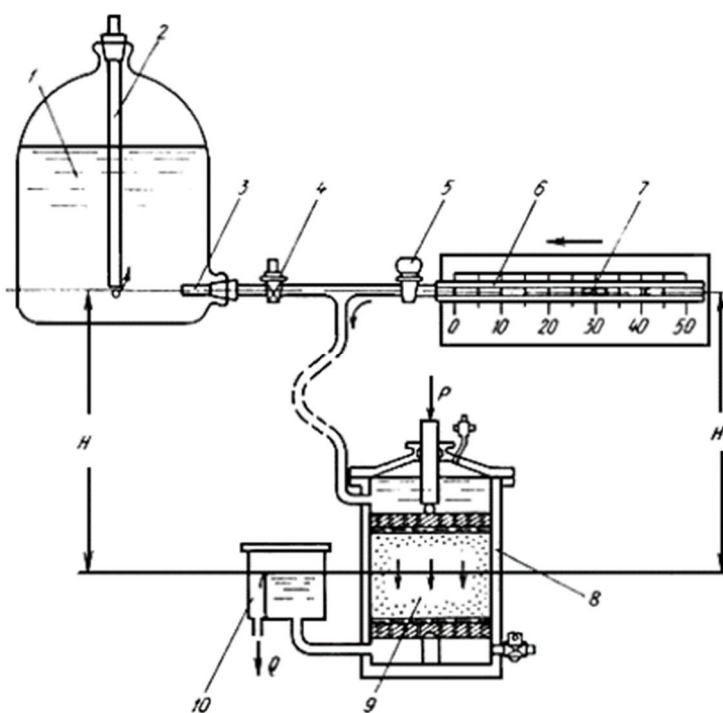


Рис. 2. Схема насыпной модели с регулировкой напора

Цель работы: определить проницаемость грунта в нарушенном сложении при поддержании постоянного напорного градиента.

Ход работы:

1. Подготовка образца к испытаниям.

- Отобрать грунт, не отличающийся по зерновому составу от исходной пробы или грунта с определенными расчетными характеристиками. Размер наиболее крупных частиц в грунте (образце) не должен превышать одной четверти диаметра рабочей камеры прибора. Сильно разнородный грунт с 15 перед укладкой в прибор надо хорошо перемешать и увлажнить до 2-3%, чтобы уменьшить сегрегацию (фракционирование). Перед самой укладкой грунта в прибор надо взять контрольную пробу на влажность, а оставшуюся его часть взвесить.
- Уложить грунт в рабочую камеру прибора слоем не меньше половины диаметра камеры. Зафиксировать толщину будущего слоя меткой на стенке камеры.
- Грунт надо укладывать в прибор отдельными слоями, подвергая его легкому уплотнению трамбованием, а около стенок камеры - штыкованием (чтобы здесь не осталось крупных пристенных пор).
- Уложить на грунт пригрузочный диск. При необходимости грунт до испытаний на водопроницаемость подвергают уплотнению расчетным давлением, фиксируя при этом его деформацию (осадку пригрузочного диска).
- Зафиксировать получившийся объем грунта в рабочей камере и рассчитать его плотность.

2. Насытить грунт дистиллированной или кипяченой водой, подогретой до температуры воздуха в помещении лаборатории и отстоянной в течение одних-двух суток для предотвращения газовыделения из воды (псевдокольматажа пор грунта). Допустимо предварительное вакуумирование используемой в эксперименте воды для тех же целей. Воду подают в нижний отсек рабочей камеры через сливной бачок. Во время замачивания открывают выпускные отверстия краников расходомера, облегчая тем самым выдавливание воздуха из грунта. Проведение измерений водопроницаемости грунта.

- Фиксируют высоту системы регуляции входного напора.

- Заполняют трубку расходомера и верхний отсек рабочей камеры водой из емкости. Измеряют расхода воды: емкость с водой отключают с помощью крана 4 и затем открывают кран 5, после чего вода с тем же напором начинает поступать в рабочую камеру из калиброванной капиллярной трубки 6.
- Замеряют стабильный расход воды, профильтровавшейся при заданном ее напоре через грунт.
- Деля этот расход на площадь сечения камеры прибора, находят скорость фильтрации.
- Заполнить таблицу результатов из Приложения 3.

Контрольные вопросы

1. В каком случае движение грунтовых вод является ламинарным по критерию Рейнольдса?
3. Как определяется эффективный (эквивалентный) диаметр частицы d_e ?
4. Раскройте содержание понятия о скорости фильтрации.
5. Раскройте содержание понятия об объёмной пористости n и площадной пористости (просветности) n' .
6. Сформулируйте основной закон ламинарной фильтрации.
7. Какие существуют методы определения коэффициента фильтрации?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. БЕЗНАПОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЧЕРЕЗ НАСЫПНУЮ МОДЕЛЬ НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА

Теория

Безнапорная фильтрация - случай фильтрации жидкости, когда фильтрационный поток имеет свободную поверхность, на которой сохраняется постоянство функции тока.

Свободная поверхность фильтрационного потока - поверхность, разделяющая две части пористого тела (грунта), одна из которых заполнена фильтрующейся жидкостью.

Депрессионная поверхность = свободная поверхность.

Кривая депрессии - кривая свободной поверхности в плоскости чертежа.

Каркас (скелет) грунта - совокупность частиц грунта (преимущественно крупнозернистых фракций), образующих пространственную систему (структуру), на которую передается действующее на грунт внешнее давление.

Заполнитель грунта - совокупность частиц, находящихся в поровом пространстве скелета грунта, на которые не передается действующее на грунт внешнее давление.

Фильтрационная прочность грунта - способность грунта сопротивляться разрушающему воздействию фильтрационного потока, которое может иметь вид внутреннего размыва (внутренней суффозии), поверхностного размыва (эрозии), отрыва и выпора целых масс грунта, а также вымывания из грунта содержащихся в нем растворимых минералов (химическая суффозия); фильтрационную прочность грунта обычно характеризуют наибольшей допустимой в данных условиях величиной градиента напора или скорости фильтрующейся через грунт воды, при которой не возникает опасных деформаций грунта, а также резкого изменения его проницаемости.

Суффозионная устойчивость - сохранение частицами грунта своего первоначального положения при воздействии на них фильтрационного потока.

Механическая суффозия - размыв грунта фильтрационным потоком, проявляющийся в виде отрыва и перемещения отдельных его частиц и целых агрегатов внутри пор или трещин.

Допущения при изучении плавно изменяющегося безнапорного течения грунтовых вод:

- а) поперечные сечения считаются плоскими, поскольку кривизна их невелика;
- б) поперечные сечения считаются вертикальными, поскольку уклон i поверхности водоупора мал (малая кривизна зеркала грунтовых вод)
- в) нет дополнительного питания потока в границах задачи.

Формула Дюпюи для безнапорного потока через сечение ширины b (рис. 3).

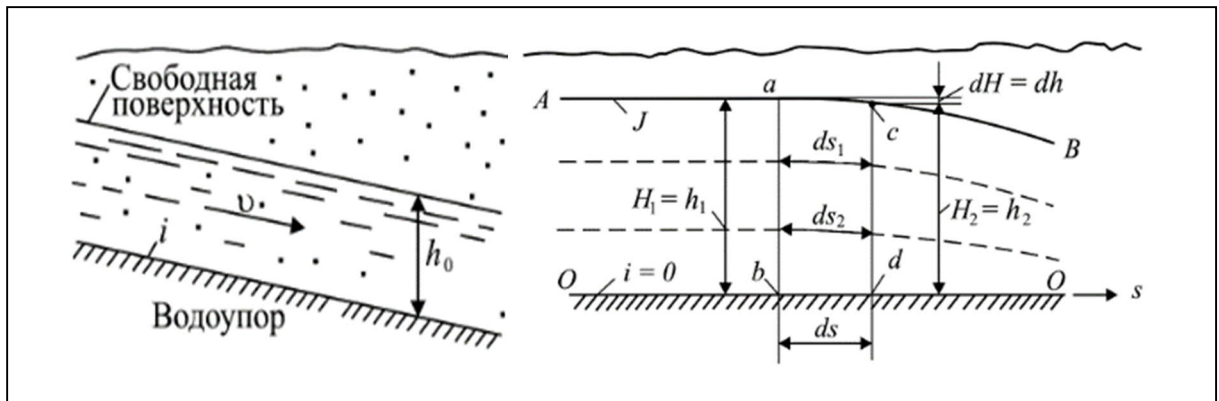


Рис. 3. Профильная схема безнапорного потока

При безнапорной фильтрации движение грунтовых вод происходит только под действием падения гидростатического напора dH . Для сечения $F = H \cdot b$ напор принимается постоянным во времени. Поток через сечение F согласно закону Дарси между точками, удаленными друг от друга на расстояние ds :

$$Q = -K_{\phi} * H * b \frac{dH}{ds}$$

После интегрирования выражения для расстояния между точками вдоль линий тока l в пределах от H_1 до H_2 получается формула для потока через сечение $F_2 = H_2 \cdot b$:

$$Q = \frac{K_{\phi} b (H_1^2 - H_2^2)}{2l}$$

С помощью горизонтального фильтрационного лотка проводят измерения Q для определения коэффициента фильтрации:

$$K_{\phi} = \frac{2Ql}{b(H_1^2 - H_2^2)}$$

Оборудование

- секундомер
- горизонтальный фильтрационный лоток (рис. 4):
- 1 – испытываемый грунт
- 2 – депрессионная поверхность
- 3 – капиллярная кайма
- 4, 5 – сливные бачки
- 6, 7 – пьезометры

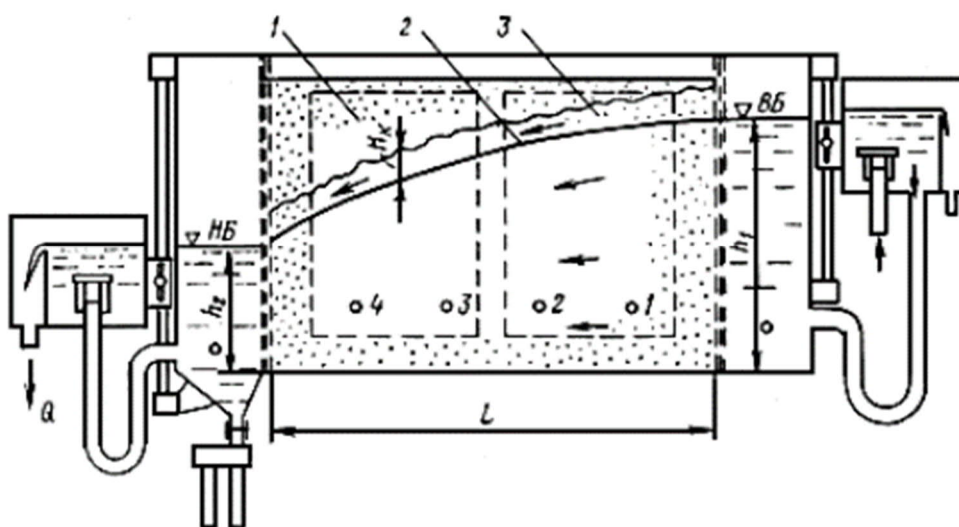


Рис. 4. Схема горизонтального фильтрационного лотка

Цель работы: оценить коэффициент фильтрации насыпной модели несвязного грунта.

Ход работы:

1. Отобрать представительную пробу несвязного грунта и определить его гранулометрический состав ситовым методом.

2. Загрузить отмерянную заранее массу грунта в лоток и уплотнить для создания требуемой плотности.
3. Замочить грунт с выполнением требований к лабораторной работе № 3. Тщательно удалить пузырьки воздуха со дна лотка, наклоняя его.
4. Зафиксировать просадку грунта.
5. Открыть краны пьезометров и добиться устойчивой фильтрации.
6. Провести замеры напоров и расходов воды.
7. Заполнить таблицу результатов из Приложения 4.
8. Провести расчет коэффициента фильтрации для определенного действующего диаметра частиц и сравнить с экспериментально определенным.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой основное уравнение плавноизменяющегося установившегося безнапорного движения грунтовых вод?
2. Как определяется удельный расход q плавноизменяющегося установившегося безнапорного потока при горизонтальном водоупоре?
3. Как построить кривую депрессии плавно изменяющегося установившегося безнапорного потока при горизонтальном водоупоре?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВЕННЫХ ПУТЕЙ ПЕРЕНОСА РАСТВОРА ЧЕРЕЗ НАСЫПНУЮ МОДЕЛЬ ГРУНТА

Теория

Под структурным коэффициентом реальной пористой среды понимается величина, характеризующая совокупность элементов, отличающих реальную породу от идеального грунта, под которым подразумевается пучок параллельных цилиндрических каналов одинаковых по площади поперечного сечения и длине. К числу элементов, характеризующих структуру пустот породы, относятся форма и размеры площади поперечного сечения, извилистость, неоднородность, сообщаемость между собой и др. В реальных породах пустоты имеют разную форму и неодинаковую площадь поперечного сечения даже в пределах одного и того же канала. Особенно это относится к зернистым пористым средам, например пескам и песчаникам, в которых каждый поровый канал имеет в той или иной мере чередующиеся переменные сечение и форму, обусловленные укладкой и неоднородностью частиц, образующих пористую среду. По тем же причинам поровые каналы извилисты. Даже при хорошей сообщаемости между собой одна часть пустот проточна, другая — непроточна. Структурный коэффициент есть интегральный показатель отличительных особенностей горных пород. Для оценки структурного коэффициента в качестве эталонной среды рекомендуется рассматривать фиктивный грунт. Однако такой подход при оценке структурного коэффициента нельзя считать удачным, так как сам фиктивный грунт содержит извилистые пустоты с разной площадью поперечного сечения, хотя и состоит из шарообразных частиц одинакового размера.

Для установления составляющих структурного коэффициента возможно использование законов гидравлики. Если принять, что на 1 см^2 поверхности фильтрации F (см^2) реальной пористой среды приходится n поровых каналов со средним радиусом r при средней их длине $L > h$ (h - длина пористой среды), то возникающий в процессе фильтрации жидкости перепад давления согласно закону Пуазейля будет равен:

$$(P_1 - P_2) = \frac{8Q\eta L}{\pi n R^4}$$

Превышение длины порового канала L над длиной пористой среды h вследствие извилистости поровых каналов может быть охарактеризовано соответственно коэффициентом извилистости $\lambda = L/h$, где L – суммарная длина пути, пройденного стружкой, h – высота модели. Так как извилистость поровых каналов различна и I представляет собой среднюю их длину, то ее следует рассматривать как некую среднюю величину коэффициента извилистости поровых каналов. Структурный коэффициент равен

$$\varphi = \frac{\lambda^2}{\varepsilon}$$

где ε - отношение эффективной пористости к полной пористости, или коэффициент проточности поровых каналов.

Цель работы: оценить изменение скорости потока в поровом пространстве и ее воспроизводимость для разных насыпных моделей.

Оборудование и материалы

- секундомер
- фильтрационные рамы с прозрачными стенками, на которых нанесена сетка с шагом 1 см, и вертикальной точечной подачей жидкости (рис. 5)
- насос
- раствор красителя (перманганата калия или метиленового синего) насыщенного цвета
- мерная линейка
- маркер по стеклу
- приемная емкость
- видеокамера

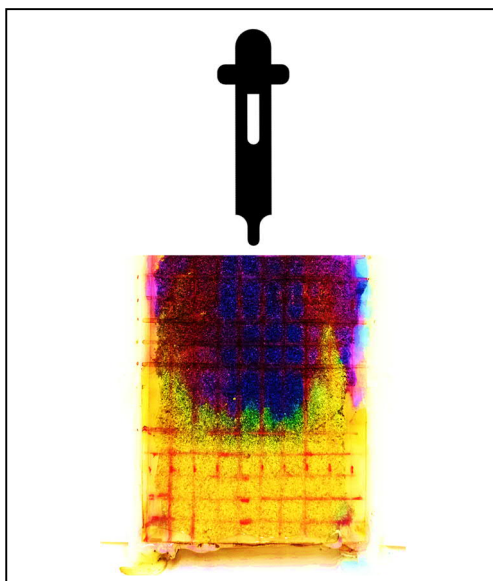


Рис. 5. Пример динамики распространения фронта красителя в фильтрационной раме

Ход работы:

1. Набить одинаковый несвязный грунт в рамы и полностью насытить водой.
2. Заполнить раствором красителя трубку для подачи жидкости, верхний ее конец присоединить к насосу.
3. Установить вертикально трубку в грунт, слегка заглубив ее, отметить точку, до которой погрузился нижний конец.
4. Опустить приемный шланг насоса в стакан с красителем. Стакан и насос должны быть установлены на заранее зафиксированных высотах.
5. Включить насос и секундомером засечь время.
6. Зафиксировать время прохождения цветной струйки отсечек через 1 см по вертикали и по горизонтали с помощью видеокамеры.
7. Выключить насос, передвинуть подающую трубку в другую насыпную модель и повторить пункты 2-7.
10. Заполнить таблицу: номер точки установки трубки, отсечка длины, время прохождения струйки. Нарисовать графики движения жидкости в координатах X;Y для заданных отсечек времени (1, 2, 5, 10, 15 секунд и т.д.).

11. Рассчитать скорость и приращение скорости переноса красителя по координатам X и Y .

12. Оценить отклонение скоростей и их приращений от средних значений для каждой насыпной модели. Сделать вывод о воспроизводимости величин.

Контрольные вопросы

1. Почему жидкость в поровой среде распространяется неровным фронтом?
2. Для чего введен параметр извилистости поровых каналов?
3. Является ли наблюдаемое Вами течение жидкости непрерывным?
4. Объясните по рисунку 5 появление пристенного языка красителя.
5. Совпадают ли скорости движения фронта красителя по вертикали и горизонтали в Вашем опыте?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ФИЛЬТРАЦИЯ ЧЕРЕЗ МОНОЛИТ ГРУНТА

Теория

Грунты в естественном сложении могут обладать *анизотропией проницаемости*, которая выражается *коэффициентом профильной анизотропии* – квадратным корнем отношения проницаемости вдоль направления преимущественного потока к проницаемости в перпендикулярном направлении. Для ленточных глин этот коэффициент низкий, для лёссов – высокий, остальные грунты имеют промежуточные значения.

В зависимости от естественного сложения монолита грунта меняется *фильтрационное сопротивление* - сопротивление движению флюидов в породе - коллекторе, являющееся величиной, обратной гидропроводности :

$$\Phi = \frac{1}{K_{\phi} h}$$

h – мощность пласта (в случае лабораторных испытаний – высота монолита).

Оборудование

Для подготовки монолита грунта к испытаниям на проницаемость:

- острый нож
- 4 кружка фильтровальной бумаги диаметром 100 мм
- 2 керамических фильтра диаметром 100 мм
- латексная оболочка (рис. 6)
- формовочный металлический цилиндр с ребром и краном для откачки воздуха (рис. 6)
- 4 резиновых кольца – прокладки
- пьедестал фильтрационного прибора (рис. 6)
- распределительная крышка фильтрационного прибора с двумя разъемами под шланги и шлангами
- воздушный компрессор с инвертером для откачки воздуха

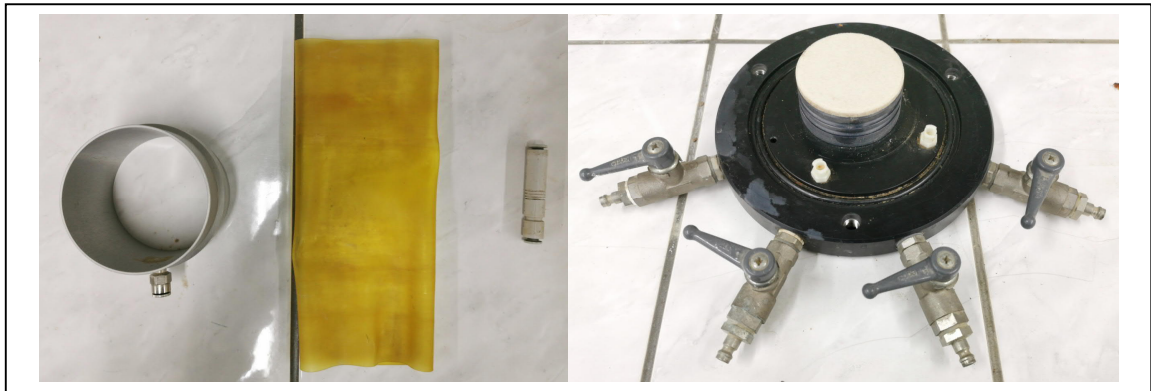


Рис. 6. Применяемые материалы (слева направо): формовочный цилиндр, латексная оболочка, инвертер воздушного компрессора для откачки воздуха, керамические диски на пьедестале прибора

Для испытания монолита грунта на проницаемость:

- секундомер
- фильтрационный прибор

Принципиальная схема фильтрационного прибора D 3325S конструкции Wille Geotechnik (Германия). Фильтрационный прибор представляет собой испытательный стенд с присоединяемыми к нему испытательными камерами и пневмогидравлическими преобразователями (рис. 7). Он состоит из следующих блоков:

- ✓ панель управления трехосной проницаемости ячейки с регулицией давления до 250 кПа при одностороннем давлении насыщения (1):
 - ✓ 3 прецизионных манометра для давления насыщения (1а)
 - ✓ 3 стандартных манометра для давления в ячейке (1б),
 - ✓ 6 прецизионных регуляторов для контроля давления 3 трехосных ячеек проницаемости (1в);
- ✓ силовой блок прибора:
 - ✓ воздушный компрессор (на рисунке не показан)
 - ✓ система воздухопроводов,
 - ✓ нагнетательная камера (2),
 - ✓ краны;

- ✓ испытательная камера (3) - позволяет создавать всестороннее давление на образец путем обжатия его водой за счет внешнего давления, нагнетаемое камерой (2), поровое давление за счет подачи воды непосредственно в образец через пневмогидравлический преобразователь;

Эти системы работают независимо друг от друга.

- ✓ блок отвода воды (4).

Поступление воды в ячейки может быть измерено с помощью бюреточной системы или по непрерывному оттоку из образца в емкости для сбора жидкости (бутылки), путем измерения веса отведенной воды.



Рис. 7. Общий вид фильтрационного прибора D 3325S конструкции Wille Geotechnik (Германия)

Цель работы: рассчитать проницаемости грунта для ряда напоров.

Ход работы:

Подготовка монолита к измерениям проницаемости.

1. Из отобранных или представленных монолитов вырезают с помощью ножа образцы диаметром 95 - 100 мм, высотой от 20 до 50 мм.

2. Перед испытанием определяется природная плотность и природная влажность грунта по ГОСТ 5180-84, для чего используют грунт, оставшийся после изготовления испытуемого образца.

Дальнейшие операции направлены на достижение максимальной герметичности установки с образцом и полное удаление воздуха.

3. На керамический фильтр кладут 2 вырезанных круга фильтровальной бумаги. После этого образец грунта устанавливают сверху и срезают лишнее по краям так, чтобы диаметр монолита грунта совпадал с диаметром керамического фильтра.

4. Грунт вместе с фильтром устанавливают на пьедестал, а сверху располагают еще 2 круга фильтровальной бумаги и над ними – другой фильтр (рис. 8). Сверху кладут распределительную крышку фильтрационного прибора.



Рис. 8. Грунт между распределительной крышкой и пьедесталом прибора

5. На образец надевают латексную оболочку (рис. 9). Для этого на нижнюю часть формовочного цилиндра надевают два резиновых кольца - прокладки до ребра цилиндра. Внутри формовочного цилиндра размещают латексную оболочку. Оболочку нужно натянуть на стенки формовочного цилиндра снаружи таким образом, чтобы в нижней части (где два резиновых кольца) она отстояла от

края цилиндра на 1-2 см, в верхней – до середины расстояния от края до ребра или до ребра. Оболочка достаточно легко повреждается, поэтому работать с ней нужно очень аккуратно.

Рис. 9. Операция подготовки латексной оболочки к размещению на образце



6. Из промежутков между формовочным цилиндром и оболочкой извлекают воздух с помощью инвертера потока воздуха, подключенного к крану цилиндра.

7. Не отключая инвертера, получившуюся на этапах 4-5 установку одевают на пьедестал с грунтом, фильтровальной бумагой и распределительной крышкой (этапы 1-3) таким образом, чтобы часть цилиндра с двумя резиновыми кольцами-прокладками находилась снизу (рис. 10).

8. Латексная оболочка аккуратно стягивается с формовочного цилиндра на пьедестал. Две резиновые прокладки стягивают вниз так, чтобы они попали в два соответствующих паза в пьедестале. С верхней части тоже стягивается латексная оболочка, и отключается инвертер. Формовочный цилиндр снимается. На распределительную крышку натягивают две резиновые прокладки в соответствующие пазы. По краям латексная оболочка загибается так, чтобы освободить разъемы для шлангов. Распределительная крышка соединяется шлангами через пазы с системой отвода воды (на рис. 11 – два коротких жестких шланга).

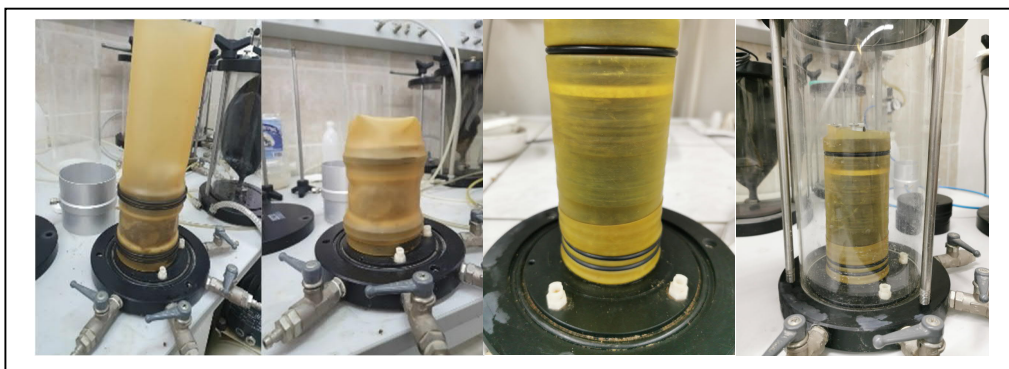


Рис. 10. Операция размещения латексной оболочки на образце и образца в ячейке

9. На получившуюся установку надевают стеклянный цилиндр, накрывают крышкой и закручивают винты (не до предела). Закручивать нужно аккуратно, чтобы не было перекосов).

10. Для окончательной подготовки образца к испытанию получившуюся ячейку (этапы 1-8) заполняют водой через подающий кран пьедестала (рис. 11). Этот процесс проводится до достижения полного насыщения образца и полного вытеснения остаточного воздуха, что в случае глин может занять несколько суток.



Рис. 11. Установленный образец, готовый к работе

Проведение испытаний монолитов грунтов и горных пород на фильтрационном приборе. Методика проведения испытаний принята согласно европейскому стандарту DIN 18 130.

Фильтрация воды через образец грунта происходит при постоянном напорном градиенте, под давлением, создаваемым воздушным компрессором. Величина давления выбирается исходя из плотности грунта и его гранулометрического состава: чем выше дисперсность грунта, тем большее давление необходимо создавать для достижения начального градиента фильтрации. Максимальное значение давления в приборе составляет 2,5 Бар, что соответствует 25 м столба воды.

Испытание может быть начато только после того, как испытательная ячейка полностью заполнена водой, а давление полностью передается от силовой ячейки давления к испытательной камере через панель управления.

1. *Подключение силовой ячейки (с резиновой грушей) и испытательной камеры (с грунтом) к системе подачи воды.* Ячейку заполняют водой, подают внешнее давление на образец, контролируя его с помощью манометра.

Внимание! В нашем случае установка производителей Wille Geotechnik была усовершенствована системой подачи дистиллированной воды (или любой желаемой жидкости) из выносного баллона (разработка и исполнение студентов – инженеров кафедры общей геологии и гидрогеологии А.М. Ахметова и В.Б. Свищева). При заполнении силовой ячейки рекомендуется устанавливать входной кран на подачу дистиллированной воды. При заполнении испытательной ячейки может подаваться вода любого качества, в том числе водопроводная.

1.1 Подключаем шланг от пьедестала силовой ячейки (толстый сетчатый) в разъем прибора «Vorrats-behälter»;

1.2 Подключаем шланг от разъема прибора «Probe» к крану силовой ячейки. После подключения кран открыть. Также, раскрутить верхний воздуховод на верхней крышке, чтобы не создавать избыточного давления при подаче воды;

1.3 Поворачиваем регулятор «bürette befüllen» в большую сторону, устанавливаем верхний красный кран в режим «befüllen» и открываем кран с подачей воды;

1.4 Ждем заполнения, закрываем кран на пьедестале, закручиваем воздуховод на верхней крышке, отключаем шланг «Probe», подключаем короткий шланг-соединитель (пока только одним концом);

1.5 Пункты 1.1 – 1.4 повторить *для испытательной камеры*. Шланг «Probe» следует подключать к самому левому крану (если расположить все краны к себе). Воду следует заполнять до полного покрытия резиновой оплетки (можно чуть-чуть с запасом).

1.6 Короткий шланг-соединитель от силовой ячейки подключаем вторым концом к третьему от левого края (если расположить все краны к себе) крану испытательной камеры.

1.7 К крышке нагнетаемой установки (с грунтом) подключаем шланг «Zelle» силовой ячейки (с резиновой грушей). К четвертому от левого края (если расположить все краны к себе) крану нагнетаемой установки подключаем шланг-отвод, через который будет вытекать фильтрующаяся вода (к неподключенному концу шланга следует подставить емкость, в которую будет стекать вода).

2. Заполнение водой силовой ячейки (с резиновой грушей) и испытательной камеры (с грунтом).

2.1 Все провода подключены. Поворачиваем верхний красный кран в положение «messen»;

2.2 Сначала устанавливаем внутреннее давление в испытательной камере (правый черный вентиль);

2.3 Затем устанавливаем давление в силовой ячейке через пневмогидравлический преобразователь (левый черный вентиль). Делать это нужно постепенно, давление в испытательной камере (внутреннее) должно быть минимум на 20% меньше, чем в силовой ячейке. Это контролируется с помощью собственного манометра;

2.4 Открываем соединенные между собой краны на испытательной и силовой ячейках. Ждем установления фильтрации (когда вода из шланга-отвода фильтруется равномерно, без скачков и задержек).

3. *Выполнение измерений.*

3.1 Показания внутреннего давления (Бар), под действием которого происходит фильтрация, фиксируются; в процессе испытания оно остается постоянным. В таком состоянии происходит водонасыщение образца.

3.2 Затем, после начала фильтрации, переключают шланг внутреннего давления с пневмогидравлического преобразователя на бюретку и снимают замеры объема профильтровавшейся воды (мл) по бюретке, входящей в состав прибора, и времени фильтрации (сек.). Для каждого образца грунта производят не менее 6 частных определений.

3.2.1 После того, как фильтрация установилась, закрываем кран на нагнетаемой установке, отключаем соединительный шланг, подключаем шланг «Probe» в этот же кран;

3.2.2 Берем секундомер и тетрадь. Медленно, аккуратно и по чуть-чуть открываем кран так, чтобы расход в мерном цилиндре на приборе достаточно медленно снижался;

3.2.3 Проводить измерения можно либо засекая время, за которое понижение в мерном цилиндре будет определенным (например, 1 мл профильтровался за 5.38 с), либо отсекая определенное время, записывая показания в мерном цилиндре (например, за 2 с - 1.6 мл). Проводим измерения, фиксируя значения;

Примечание: Если мерный цилиндр опустел, а измерения не проведены, следует:

- Закрывать кран на пьедестале нагнетаемой установки;
- Сбросить давление на манометре силовой ячейки до 0;
- Отсоединить от прибора шланг в разьеме «Probe»;
- Перевести красный кран на приборе в режим «Befüllen»;
- Вентиль «bürette befüllen» раскрутить и открыть кран с дистиллированной водой;

- Набрать в мерном цилиндре воды до значений 2-3 мл;
 - закрыть кран с дистиллированной водой;
 - вентиль «bürette befüllen» закрутить;
 - Перевести красный верхний кран на приборе в положение «messen»;
 - Подключить шланг в разъем «Probe» к прибору и третьему от левого края (если расположить все краны к себе) крану нагнетаемой установки;
 - Следовать действиям 1-3.
4. Отключение прибора.
- Закрывать все краны на нижних пьедесталах обеих установок;
 - Снизить давление СНАЧАЛА НА НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ (ЧЕРНЫЙ ВЕНТИЛЬ СПРАВА), ЗАТЕМ НА НАГНЕТАЕМОЙ (ЧЕРНЫЙ ВЕНТИЛЬ СЛЕВА);
 - Отсоединить от обеих установок шланги;
 - Спустить воду на нагнетаемой установки (самый левый кран, если расположить пьедестал кранами к себе);
 - Раскрутить винты на крышке, снять стеклянный цилиндр, убрать грунт, промыть резиновую оплетку.

Расчет проницаемости по измеренным параметрам фильтрации.

Расчет коэффициента фильтрации, приведенного к условиям фильтрации при температуре 10°C, производится согласно п. 2.4 ГОСТ 25584-90 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации» по формуле:

$$K_{\phi} = \frac{864 \cdot V_w \cdot T}{t_m \cdot A \cdot J}$$

где V_w — объем профильтровавшейся воды при одном замере, см³;

t_m — продолжительность фильтрации при одном замере, с;

A — площадь поперечного сечения образца, см²,

J — градиент напора, $J = h_w/h_{обр}$, $h_{обр}$ — высота образца, см, h_w — высота столба воды (1 Бар = 1000 см столба воды);

$T = (0,7 + 0,03 T_f)$ — поправка для приведения значения коэффициента фильтрации к условиям фильтрации воды при температуре 10°C , где T_f — фактическая температура воды при испытании, $^{\circ}\text{C}$;

864 — переводной коэффициент (из см/с в м/сут).

При достаточных размерах, с каждого монолита грунта проводятся 3 параллельных определения K_f , коэффициент фильтрации грунта вычисляется как среднее арифметическое из трех определений. По окончании испытания повторяют определение природной влажности и плотности. Результаты заносят в журнал испытаний.

Контрольные вопросы

1. Для чего выполняют не менее 6 замеров для каждого образца грунта?
2. От каких характеристик грунта зависит его проницаемость?
3. Для грунтов какого гранулометрического состава пригоден описанный фильтрационный прибор?
4. Почему важно сначала подать внешнее давление на образец грунта и лишь после этого внутреннее?
5. Воду какого качества допустимо подавать внутрь образца грунта и почему?

ЛИТЕРАТУРА

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. - М.: Наука., 1986. -736 с.
- Мироненко В.А. Динамика подземных вод: Учебник для вузов. - М.: Изд-во Московского государственного горного ун-та, 2009. - 519 с.
- Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость, П 12-83. – Ленинград: ВНИИГ, 1983.

Приложение 1. Структура журналов испытаний

Журнал испытаний к лабораторной работе 1а

Номер режима, i	Площадь сечения трубок, S	Высота выхода из насоса, h_0	Высота выпускного конца трубки, h_1	$L = h_1 - h_0$	Входное давление, P_{i1}	Расход, Q_i	Скорость потока, v_i	Полная энергия системы, C_i
1								
...								

Журнал испытаний к лабораторной работе 1б

Номер режима, i	P_{i1}	$L_j, м$	v_{ij}	C_{ij}
1		0,15		
...		0,50		
		1,50		

Журнал испытаний к лабораторной работе 1в

Входное давление	Диаметр трубки	Расход	Высоты					
			входа в систему	входа в трубку пито	входа в пьезометр	выхода из системы	воды в трубке Пито	Воды в пьезометре

Журнал испытаний к лабораторной работе 2

Высоты			№ трубки	Диаметр трубки	Длина трубки	Входное давление	Расход воды	Линейная скорость потока	Примечание
ВХОД 1	ВХОД 2	ВХОД 3							

Журнал испытаний к лабораторной работе 3

Название образца	Высота регулятора	Расход	Площадь сечения камеры	Скорость фильтрации

Журнал испытаний к лабораторной работе 4

Название образца	Высота слоя	Высота входа	Высота выхода	Расход воды	Коэффициент фильтрации экспериментальный	Коэффициент фильтрации расчетный

Журнал испытаний к лабораторной работе 5

Название образца	Перепад высот(напор)	Время, с	Координаты фронта		V_x	V_y	ΔV_x	ΔV_y
			X	Y				

Журнал испытаний к лабораторной работе 6

Название образца	№ повторности	Время	Убыль уровня в бюретке	P, Мпа	Площадь сечения образца	Высота образца	$T^0_{\text{воды}}$	Коэффициент фильтрации
	1							
	2							

	3							
	4							
	5							
	6							

Приложение 2

Расчетные методы оценки проницаемости в зависимости от гранулометрического состава грунта

Автор метода расчета	Объект	Формула
Хазен	для песков, действующий диаметр зерна которых колеблется от 0,1 до 3 мм, а коэффициент неоднородности S_n от 1 до 5	$K_f = C \cdot d_{10}^2 \cdot (0,7 + 0,03t)$, $C = 400 + 40(\varepsilon - 26)$
Козени	Песок с d_{10} до 5,0 мм	$K_f = 5400 d_{10}^2 \cdot n^3 / (1-n)$
Зауэрбей	для мелко-, средне- и крупнозернистых чистых и глинистых песков	$K = \beta \cdot d_{17}^2 \cdot n^3 / (1-n)^2$
Слихтер	Фиктивный грунт, пески с d_{10} от 0,01 до 5,0 мм	$K_f = 88,3 d_{10}^2 \cdot m \cdot 1/\mu$

где K_f - коэффициент фильтрации (при 4-5 °С, если не указано иное), м/сут; C - эмпирический коэффициент, ε - пористость, %; n - пористость, доли единицы; d_{10} - действующий диаметр, мм; d_{17} - диаметр зерна (мм), меньше которого в породе содержится 17 % частиц; t - температура воды, °С; β - эмпирический коэффициент, зависящий от крупности и однородности зерен песка (обычно составляет 2880...3010); m - коэффициент, зависящий от пористости (находится по таблице 2.2); μ - коэффициент динамической вязкости

Классы проницаемости грунтов

Класс	Породы	Кф, м/с	Кп, м ²
Очень хорошо проницаемые	Галечники и гравий, чистые и частично заполненные крупнозернистым песком, сильно закарстованные известняки, сильно трещинноватые породы	$1,2 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-2}$ и более	$1,2 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-9}$ и более
Хорошо проницаемые	Галечники и гравий, заполненные крупнозернистым песком, крупно- и среднезернистые пески, трещинноватые породы	$1,2 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-11}$
Проницаемые	Галечники и гравий, заполненные мелкозернистыми и глинистыми песками, средне- и мелкозернистые пески, мало трещинноватые породы, бурые и каменные угли	$1,2 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-11} - 1,2 \cdot 10^{-12}$
Слабопроницаемые	Мелкозернистые пески, супеси, песчанники с глинистым цементом, антрациты, слабо трещинноватые породы	$1,2 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-12} - 1,2 \cdot 10^{-13}$
Весьма слабопроницаемые	Суглинки, песчаные глины, глинистые сланцы, очень слабо трещинноватые породы	$1,2 \cdot 10^{-6} - 1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-13} - 1,2 \cdot 10^{-15}$
Почти непроницаемые	Плотные глины, мергели, аргиллиты, массивные породы	менее $1,2 \cdot 10^{-8}$	менее $1,2 \cdot 10^{-15}$

Приложение 4. Примерные темы квалификационных работ, выполняемых на представленных приборах:

1. Просадочность и фильтрационные свойства элювиально-делювиальных глинистых грунтов ... района.
2. Исследование влияния биосурфактантов на фильтрационно-деформационные характеристики бентонита.
3. Моделирование влияния фильтрационной консолидации на осадку грунта под прямоугольным фундаментом.
4. Влияние процесса кольматации на фильтрационные свойства несвязных грунтов.
5. Определение коэффициента фильтрации глинистых грунтов: сравнение методик.
6. Моделирование изменения фильтрационных характеристик песчаных коллекторов в призабойной зоне на примере ... месторождения.
7. Гидрофизические свойства грунтов с загрязнением нефтепродуктами.
8. Экспериментальное моделирование процесса механической суффозии.
9. Экспериментальное моделирование изменения физико-химических свойств минерального грунта под действием выветривания.
10. Экспериментальное моделирование модификации органического грунта добавлением стимуляторов микробного роста.
11. Модификация физических свойств карбонатно-глинистых грунтов при жизнедеятельности хемолитотрофных организмов.
12. Влияние экспериментального биоцементирующего агента на изменение физико-механических свойств грунтов.
13. Модель упрочнения карбонатного грунта микроаэрофильными хемолитотрофами.
14. Модель транспорта взвешенных и коллоидных частиц грунта в зависимости от насыщения углекислым газом.
15. Управление проницаемостью глинистого грунта с использованием ряда ПАВ.
16. Моделирование выноса взвешенных и коллоидных частиц грунта в зоне аэрации.