

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н.А. Бродская

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
по лабораторным работам  
и практическим заданиям по дисциплинам  
«Гидрогеология», «Науки о Земле», «Геофизика»

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2020

УДК [378.14.016:001.891.53](072)  
ББК 74.58я73  
Б88

**Бродская Н.А.**

Б14 Методическое пособие по лабораторным работам и практическим заданиям по дисциплинам «Гидрогеология», «Науки о Земле», «Геофизика». – СПб.: РГГМУ, 2020. – 40 с.

В учебном пособии приводятся задания по лабораторным и практическим работам по дисциплинам «Геофизика», «Науки о Земле» и «Гидрогеология» для студентов, обучающихся по направлениям «Прикладная гидрометеорология», «Техносферная безопасность». Эти работы предусмотрены как для выполнения в специализированной фильтрационной аудитории, так и для домашнего задания по вариантам. Дается подробный алгоритм каждой работы. После выполнения работы защищаются по предлагаемым теоретическим вопросам, приводимым в учебнике «Гидрогеология».

УДК [378.14.016:001.891.53](072)  
ББК 74.58я73

© Бродская Н.А., 2020  
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2020

## **Указания по выполнению**

Каждая лабораторная и практическая работа включают в себя ряд задач и вопросов, основы для графических построений и приложение, в котором указано, какой вариант задачи следует решать и как оформить результаты расчета.

Для выполнения работ необходимо владеть материалом курса в объеме программы [1]. В качестве справочного материала могут использоваться приведенные методические указания и литература.

Работы должны быть написаны аккуратно, разборчивым почерком, с соблюдением указаний. При оформлении решений задач необходимо привести все исходные данные, ход решений и сам расчет. Результат должен быть написан отдельно с указанием единиц измерения и выделен рамкой. При оформлении задач, исходные данные которых приведены в виде таблицы, а результат включает несколько величин, приводятся только исходные данные и результаты расчета в форме таблиц, указанных в приложении. Точность вычислений не должна превышать точность исходных данных. Все графические работы должны иметь номер задания, заголовок, масштаб, условные обозначения и фамилию автора. Графические зависимости (кроме карт и разрезов) надо строить на миллиметровой бумаге размером в страницу тетради, не более. Ответы на вопросы должны быть по существу и объемом не более двух страниц каждый.

### **Лабораторная работа № 1. Определение гранулометрического (зернового) состава песчаных грунтов ситовым методом**

Гранулометрический состав является одним из важных факторов, определяющих физические свойства грунта. От него зависят такие свойства как пластичность, пористость, сопротивление сдвигу, сжимаемость, усадка, разбухание, высота капиллярного поднятия, водопроницаемость и др.

Гранулометрический (зерновой) состав грунта определяют по массовому содержанию в нем частиц различной крупности, выраженному в процентах по отношению к массе сухой пробы грунта, взятой для анализа.

В настоящее время основным методом определения гранулометрического состава песчаных грунтов является ситовый метод. Этот

метод позволяет определять содержание в грунте фракций диаметром  $> 0,1$  мм, не требует применения сложной аппаратуры, прост для использования и дает достаточно точные результаты. Ситовой метод может быть использован для анализа чистых песков, песков с примесью гравия и гальки (гравелистых песков), а также гравийно-песчаных грунтов.

### Ход работы

Перед началом выполнения работы образец грунта доводят до воздушно-сухого состояния. Комки грунта растирают резиновым пестиком в фарфоровой ступке. Среднюю пробу для анализа отбирают методом квартования. Для этого распределяют грунт тонким слоем по листу плотной бумаги, проводят ножом в продольном и поперечном направлениях борозды, разделяя поверхность грунта на квадраты, и отбирают понемногу грунт из каждого квадрата.

Масса средней пробы должна составлять:

- для грунтов, не содержащих частиц размером более 2 мм, – 100 г;
- для грунтов, содержащих до 10 % (по массе) частиц размером более 2 мм, – не менее 500 г;
- для грунтов, содержащих от 10 до 30 % частиц размером более 2 мм, – 1000 г;
- для грунтов, содержащих свыше 30 % частиц размером более 2 мм, – не менее 2000 г.

Отобранная проба взвешивается на весах с точностью до 0,01 г.

Сита монтируются в колонку от поддона в порядке увеличения отверстий (рис. 1). На верхнее сито надевается крышка. Взвешенную пробу грунта следует просеять сквозь набор сит с поддоном ручным способом путем неоднократного встряхивания. Полноту просеивания фракций грунта проверяют встряхиванием каждого сита над листом белой бумаги. Если при этом на лист выпадают частицы, то их высыпают на следующее сито; просев продолжают до тех пор, пока на бумагу перестанут выпадать частицы.

Фракции грунта, задержавшиеся после просеивания на каждом сите и прошедшие в поддон, следует перенести в заранее взвешенные фарфоровые чашечки и взвесить. Каждая чашечка с грунтом взвешивается на весах с точностью до 0,01 г. Допустимо использование одной и той же фарфоровой чашечки при последовательном взвешивании фракции.

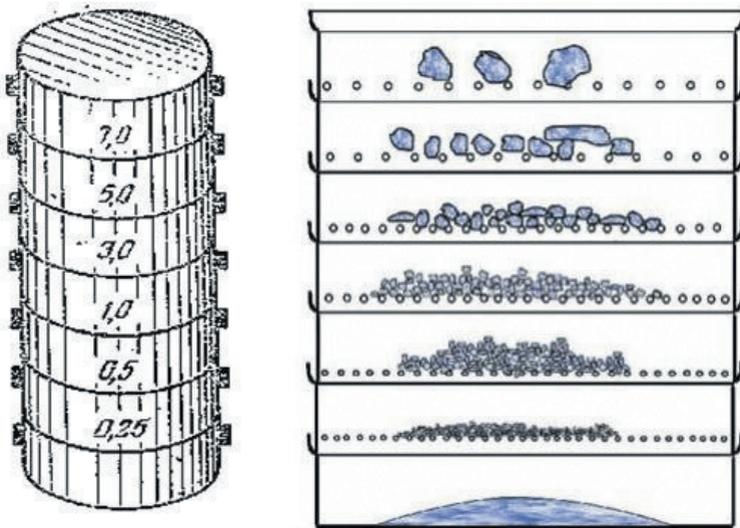


Рис. 1. Схема сборки сит для ситового анализа

## Обработка результатов гранулометрического анализа грунта и определение коэффициента фильтрации по эмпирическим зависимостям

*Цель работы:* получение практических навыков в обработке результатов гранулометрического анализа грунтов с помощью интегральной кривой совокупностей фракций, треугольной диаграммы и определения расчетных параметров.

### Задание

1. Определить гранулометрический состав грунта, крупные фракции которого (более 0,25 мм) анализируются ситовым методом. Исходные данные предоставляются преподавателем, в лаборатории выдается проба грунта и ее номер [2, 3].
2. Результаты занести в табл. 1. Оценить ошибку ситового анализа.
3. Построить интегральную кривую совокупностей фракций в простом и полулогарифмическом масштабе (рис. 2).
4. По интегральной кривой определить контролирующий диаметр, эффективный или действующий диаметр, и произвести расчет коэффициента неоднородности.
5. Дать полное наименование грунта по треугольной диаграмме.

6. Произвести расчет высоты капиллярного поднятия  $H_k$ .
7. Произвести расчет коэффициента фильтрации  $K_\phi$  по эмпирическим зависимостям.

**Табл. 1. Определение гранулометрического состава образца № ...  
ситовым методом**

Показатели	Фракции, мм								
	> 10,0 мм	10,0–7,0 мм	7,0–5,0 мм	5,0–3,0 мм	3,0–2,0 мм	2,0–1,0 мм	1,0–0,5 мм	0,5–0,25 мм	< 0,25 мм
Вес чаши с фракцией, г									
Вес чаши, г									
Вес фракции А, г									
Доля фракции С, %									
Суммарное содержание фракций $\Sigma C$ , %									

Последняя величина суммирования характеризует долю всех выделенных фракций от веса исходной навески. Поэтому отличие этой величины от 100 % характеризует общую ошибку анализа. Эта разница не должна превышать 1 %, в противном случае анализ считается некорректным.

### Пояснения к расчетам

*Гранулометрическим составом* называют относительное содержание по весу групп частиц или фракций грунта (А), выраженное в процентах (С %) к общему весу навески абсолютно сухого грунта (В):

$$C = \frac{A}{B} 100 \%. \quad (1)$$

По классификации осадочных обломочных грунтов рыхлые фракции делятся на:

- гравийные (размер частиц 10–2 мм);
- песчаные грубозернистые (размер частиц 2–1 мм);
- песчаные крупнозернистые (размер частиц 1–0,5 мм);
- песчаные среднезернистые (размер частиц 0,5–0,25 мм);
- песчаные мелкозернистые (размер частиц 0,25–0,1 мм);
- пылеватые (0,1–0,001 мм);
- глинистые (0,001–0,0001 мм).

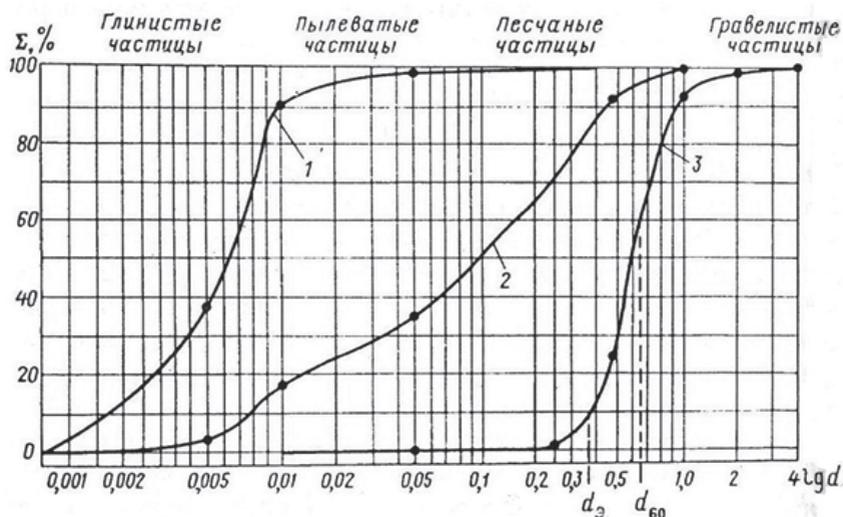


Рис. 2. Интегральная кривая совокупностей фракций в полулогарифмическом масштабе

Эффективный или действующий диаметр  $d_{10}$  (или  $d_3$ ) – это такой диаметр, меньше которого в породе 10 %. Контролирующий диаметр  $d_{60}$  – это такой диаметр, меньше которого в породе 60 %.

Коэффициент неоднородности гранулометрического состава рассчитывается по формуле:

$$K_H = \frac{d_{60}}{d_{10}}. \quad (2)$$

Если коэффициент неоднородности  $K_H < 3$ , то порода считается однородной, если  $K_H > 3$  – порода неоднородная. Для глинистых пород предел однородности 5. Чем круче интегральная кривая неоднородностей, тем более однородная порода. Для сопоставления гранулометрического состава разных грунтов используется треугольная диаграмма (рис. 3).

Диаграмма основана на свойстве равностороннего треугольника. Стороны треугольника делятся на 100 равных отрезков. На сторонах треугольника откладывается содержание (С %) трех основных совокупностей фракций: крупнозернистых,  $> 0,5$  мм; среднезернистых,  $0,5-0,25$  мм; мелкозернистых,  $< 0,25$  мм. Грунт отображается точкой на диаграмме, являющейся пересечением всех трех совокупностей. Например, на рис. 3 точка характеризует грунт, содержащий

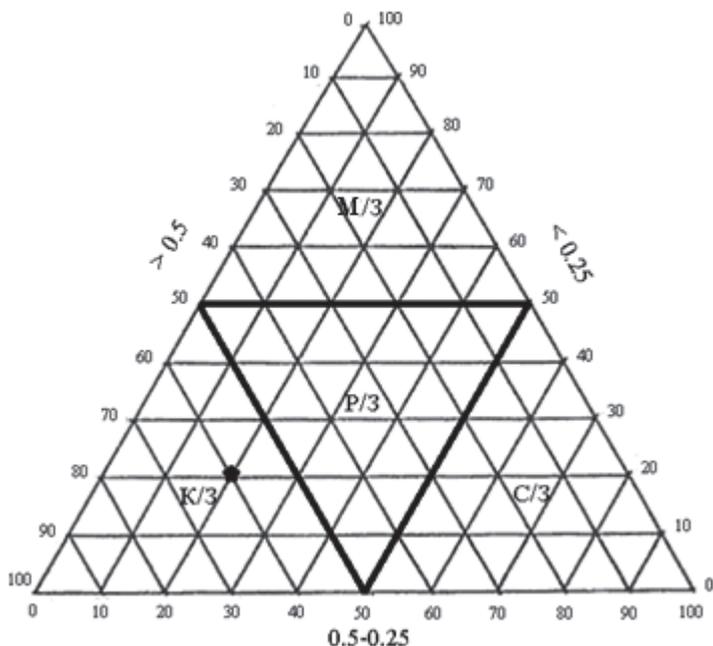


Рис. 3. Треугольная диаграмма

мелкозернистых фракций 20 %, среднезернистых 20 %, крупнозернистых 60 %. Данная порода является песчаной крупнозернистой. На диаграмме можно отобразить множество точек, их близкое расположение характеризует сходство гранулометрических составов различных грунтов.

Расчет высоты капиллярного поднятия производится по формуле Козени:

$$H_K = \frac{0,446(1-n)}{d_3} n, \quad (3)$$

где  $n$  – коэффициент общей пористости,  $d_3$  – эффективный диаметр, мм.

Расчетные методы коэффициента фильтрации ( $K_f$ ), основаны на данных гранулометрического анализа и емкостных свойств грунта. Наиболее часто употребляется формула Хазена, применяемая для однородных грунтов с эффективным диаметром  $d_3 = 0,1 - 3,0$  мм:

$$K_{\phi} = (0,7 + 0,03t)Cd_3^2, \quad (4)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $t$  – температура фильтрующей воды, °С;  $d_3$  – эффективный диаметр, снимаемый с интегральной кривой, мм;  $C$  – коэффициент, величина которого зависит от пористости:

$$C = 400 + 40(n - n_{\min}),$$

где  $n$  – пористость, %;  $(0,7 + 0,03 t)$  – температурная поправка, учитывающая влияние температуры на вязкость воды и скорость ее фильтрации через грунт;  $n_{\min} = 26,2\%$  – теоретическая минимальная пористость песка. Для среднезернистых песков применима формула Слехтера или Крюгера.

**Пример.** Определить коэффициент фильтрации для грунта с пористостью 42 % и эффективным диаметром 0,065 мм при коэффициенте неоднородности 2,45.

$$C = 400 + 40(42 - 26) = 1040.$$

Коэффициент фильтрации обычно определяется при температуре 0 °С. Тогда:

$$K = 0,7Cd_3^2 = 0,7 \cdot 1040 \cdot 0,065 = 3,06 \text{ м/сут.}$$

**Формула Слехтера:**

$$K = 496Md_3^2. \quad (5)$$

Эта формула применима для грунтов с эффективным диаметром от 0,01 до 5,00 мм, обычно для зернистых и отчасти крупнозернистых песков.

**Табл. 2. Значения коэффициента  $M$  в зависимости от пористости  $n$**

$n$	$M$	$n$	$M$	$N$	$M$
0,26	0,1187	0,33	0,2601	0,40	0,4922
0,27	0,1350	0,34	0,2878	0,41	0,5339
0,28	0,1517	0,35	0,3163	0,42	0,5789
0,29	0,1694	0,36	0,3473	0,43	0,6267
0,30	0,1905	0,37	0,3808	0,44	0,6776
0,31	0,2122	0,38	0,4154	0,45	0,7295
0,32	0,2356	0,39	0,4254	0,46	0,7838
				0,47	0,8455

**Пример.** Рассчитать коэффициент фильтрации для грунта с пористостью 42 % и эффективным диаметром 0,065 мм.

$$K = 496 \cdot 0,5789 \cdot 0,065^2 = 1,2 \text{ м/сут.}$$

### Формула Крюгера:

$$K = 240 \frac{n}{(100 - n)^2} d_3^2, \quad (6)$$

где  $n$  – пористость, %;  $d_3$  – эффективный диаметр, мм:

$$d_3 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{d_{cp_i}}}, \quad (7)$$

где  $q_i$  – содержание каждой фракции в гранулометрическом составе, в долях единицы;  $d_{cp_i}$  – средний диаметр зерен фракции, мм.

Определяется как среднее арифметическое из диаметров, ограничивающих фракцию (например 0,5–1 мм,  $d_{cp} = 0,75$  мм).

## Практическая работа № 1.

### Построение гидрогеологического разреза

Построение гидрогеологического разреза по данным разведочного бурения является самой важной исследовательской работой при характеристике литолого-фациального состава территории, отбора проб на определение водно-физических свойств горных пород, выделения водоносных горизонтов и степени их взаимосвязи с поверхностными водами. По данным разрезов строятся плановые схемы и карты территорий. По сути, это начальные исследования изыскательских работ.

#### Задание

В долине реки пробурено в створе 5 скважин. Скважины 2, 3, 4 располагаются на первой надпойменной террасе. Построить гидрогеологический разрез по данным разведочного бурения и наблюдения за подземными водами. Привести по разрезу характеристику водоносных горизонтов, определить условия их залегания, выяснить положения и источники питания, описать участки и характер дренирования, связь с поверхностными водами и взаимосвязь между водоносными горизонтами. Масштабы: вертикальный 1:200, горизонтальный 1:2000. Описания разрезов по скважинам для вариантов № 1–10 приведены в табл. 3, для вариантов № 11–20 – в табл. 4. Расчетные данные по вариантам приведены в табл. 5.

**Табл. 3. Описание разрезов по скважинам  
для вариантов № 1–10**

№ слоя (сверху вниз)	Глубина залегания		Геологический индекс	Литологическая характеристика	Данные о подземных водах, м	
	от	до			глубина проявления	установившийся уровень
1	2	3	4	5	6	7
Скважина 1: абсолютная отметка устья 184,60 м на расстоянии 300 м от уреза левого берега реки						
1	0,0	0,70	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,70	31,20	K <sub>1</sub>	Глина серая, плотная	–	–
3	31,20	35,00	K <sub>1</sub>	Песок серый, разномзернистый, водоносный	31,20	6,90
4	35,00	37,00	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, опесчаненная	–	–
Скважина 2: абсолютная отметка устья 173 м на расстоянии 180 м от уреза левого берега реки						
1	0,0	0,80	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,80	4,80	aQ <sub>IV</sub>	Суглинок опесчаненный, водонасыщенный	2,20	2,20
3	4,80	9,20	aQ <sub>IV</sub>	Галька, гравий и щебень водоносные	2,20	2,20
4	9,20	11,50	aQ <sub>IV</sub>	Песок кварцевый, разномзернистый, водоносный	2,20	2,20
5	11,50	18,0	K <sub>1</sub>	Глина серая, плотная	–	–
6	18,0	21,80	K <sub>1</sub>	Песок серый, разномзернистый, водоносный	18,0	4,0 м над устьем скважины
7	21,80	25,20	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая	–	–
Скважина 3: абсолютная отметка устья 172,80 м на расстоянии 50,0 м от уреза левого берега реки						
1	0,0	0,80	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,80	4,60	aQ <sub>IV</sub>	Суглинок опесчаненный, с галькой, водонасыщенный	3,0	3,0
3	4,60	9,00	aQ <sub>IV</sub>	Галька, гравий и щебень водоносные	3,0	3,0
4	9,0	12,20	aQ <sub>IV</sub>	Песок желтый, разномзернистый, водоносный	3,0	3,0
5	12,20	16,0	K <sub>1</sub>	Глина серая, очень плотная	–	–

1	2	3	4	5	6	7
6	16,0	19,60	K <sub>1</sub>	Песок серый, разномзернистый, водоносный	16,0	3,40 м над устьем скважины
Скважина 4: абсолютная отметка устья 173,20 м на расстоянии 100,0 м от уреза правого берега реки						
1	0,0	0,70	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,70	5,00	aQ <sub>IV</sub>	Суглинок опесчаненный, с галькой, водонасыщенный	3,15	3,00
3	5,00	9,40	aQ <sub>IV</sub>	Галька, гравий и щебень водоносные	3,15	3,00
4	9,40	10,60	aQ <sub>IV</sub>	Песок желтый, разномзернистый, водоносный	3,15	3,00
5	10,60	14,80	K <sub>1</sub>	Глина серая, плотная	–	–
6	14,80	18,50	K <sub>1</sub>	Песок серый, разномзернистый, водоносный	14,80	3,40 м над устьем скважины
7	18,50	23,00	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, опесчаненная	–	–
Скважина 5: абсолютная отметка устья 185,0 м на расстоянии 180,0 м от уреза правого берега реки						
1	0,0	0,60	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,60	24,20	K <sub>1</sub>	Глина серая, плотная	–	–
3	24,20	28,00	K <sub>1</sub>	Песок серый, разномзернистый, водоносный	24,20	8,20
4	28,00	30,00	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, опесчаненная	–	–

Табл. 4. Описание разрезов по скважинам для вариантов № 11–20

№ слоя (сверху вниз)	Глубина залегания		Геологический индекс	Литологическая характеристика	Данные о подземных водах	
	от	до			глубина проявления	установившийся уровень
1	2	3	4	5	6	7
Скважина 1: абсолютная отметка устья 179,0 м на расстоянии 290 м от уреза левого берега реки						
1	0,0	0,80	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,80	23,80	K <sub>1</sub>	Глина слабоопесчаненная, плотная	–	–

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
3	23,80	32,60	K <sub>1</sub>	Песок разнородный, кварцевый, водоносный	23,80	12,20
4	32,60	35,00	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, плотная	–	–
Скважина 2: абсолютная отметка устья 168 м на расстоянии 210 м от уреза левого берега реки						
1	0,0	0,80	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,80	4,80	aQ <sub>IV</sub>	Суглинок опесчаненный, с мелкой галькой, водонасыщенный	2,40	2,20
3	4,80	9,20	aQ <sub>IV</sub>	Галька, гравий водоносные	2,40	2,20
4	9,20	11,50	aQ <sub>IV</sub>	Песок желтый, разнородный, водоносный	2,40	2,20
5	11,50	16,0	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, плотная	–	–
6	16,0	20,00	K <sub>1</sub>	Песок разнородный, водоносный	16,0	2,20
7	20,00	22,50	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, плотная	–	–
Скважина 3: абсолютная отметка устья 167,80 м на расстоянии 50,0 м от уреза левого берега реки						
1	0,0	0,80	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,80	4,60	aQ <sub>IV</sub>	Суглинок опесчаненный, с мелкой галькой, водонасыщенный	3,50	3,00
3	4,60	9,00	aQ <sub>IV</sub>	Галька, гравий и щебень водонасыщенные	3,50	3,00
4	9,0	12,00	aQ <sub>IV</sub>	Песок разнородный, кварцевый, водоносный	3,50	3,0
5	12,00	13,40	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, опесчаненная	–	–
6	13,40	17,00	K <sub>1</sub>	Песок разнородный, водоносный	13,40	3,00
7	17,00	18,30	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, плотная	–	–
Скважина 4: абсолютная отметка устья 168,20 м на расстоянии 80,0 м от уреза правого берега реки						
1	0,0	0,70	eQ <sub>IV</sub>	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,70	5,00	aQ <sub>IV</sub>	Суглинок опесчаненный, с мелкой галькой, водонасыщенный	3,20	3,15
3	5,00	9,40	aQ <sub>IV</sub>	Галька, гравий и щебень водоносные	3,20	3,15
4	9,40	10,60	aQ <sub>IV</sub>	Песок разнородный, кварцевый водоносный	3,20	3,150
5	10,60	12,20	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, слабоопесчаненная	–	–
6	12,00	15,70	K <sub>1</sub>	Песок разнородный, водоносный	12,20	3,15
7	15,70	20,20	K <sub>1</sub>	Глина синевато-серая, плотная	–	–

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
Скважина 5: абсолютная отметка устья 180,0 м на расстоянии 180,0 м от уреза правого берега реки						
1	0,0	0,60	$eQ_{IV}$	Почвенно-растительный слой	–	–
2	0,60	22,40	$K_1$	Глина синевато-серая, плотная	–	–
3	22,40	26,00	$K_1$	Песок разномзернистый, водоносный	22,40	13,20
4	26,00	27,30	$K_1$	Глина синевато-серая, плотная	–	–

**Табл. 5. Условия вариантов для построения гидрогеологического разреза**

Вариант	Ширина надпойменной террасы, м		Высота уреза в створе, м	Ширина реки, м	Глубина реки, м
	Левый берег	Правый берег			
1	220	160	164	10	3
2	230	115	160,5	15	5
3	225	120	166,5	35	6
4	240	150	164,5	5	2
5	200	110	169	40	2
6	220	150	169	35	5
7	225	120	168,5	20	2
8	260	160	164	20	6
9	180	120	167	25	3
10	190	110	159	30	14
11	223	160	165,5	20	2,5
12	200	120	166	100	4
13	210	110	161	15	3,5
14	180	100	158	17	2
15	190	130	150	25	3
16	210	170	168	40	4
17	215	180	163	35	3
18	230	190	165	30	2
19	240	120	168	20	3
20	225	110	164	18	3,5

Разрез строится на миллиметровой бумаге, описание оформляется согласно требованиям, предъявляемым к печатным работам.

## Практическая работа № 2. Построение гидрогеологической карты и расчет расхода потока подземных вод

### Задание

Построить карту гидроизогипс и пьезоизогипс с сечением через 1 м на топографической основе, приведенной на рис. 4 (масштаб по указанию преподавателя) [3]. На карте выделить ленту тока и определить подземный сток в реку, выбрав сечение максимально приближенное к реке. Высотные отметки двадцати скважин и четырех шурфов, а также глубина залегания в них подземных вод приведены

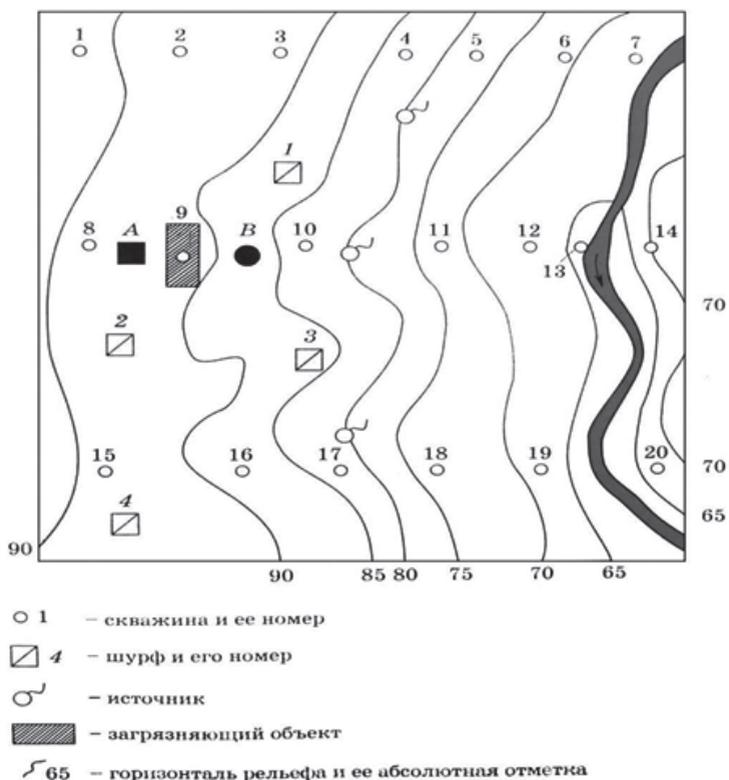


Рис. 4. Топографическая основа для построения карты гидроизогипс (масштаб по указанию преподавателя)

в табл. 6 и 7. Выполнить анализ построенных карт гидроизогипс: показать направление движения грунтовых вод стрелками; определить гидравлический уклон (градиент) потока грунтовых вод в местах максимального (в пределах карты) уклона; определить глубину залегания грунтовых вод в точках *A* и *B*, которые отмечены на рис. 4. Произведя оценку химического состава грунтовых вод, рассчитать ионный сток в реку.

На основе данных бурения по линии скважин 8–14, как показано на рис. 4 и в табл. 7 и 8, построить гидрогеологический разрез.

Горизонтальный масштаб назначают в соответствии с масштабом карты, вертикальный масштаб рекомендуется 1:500. По топографической карте и абсолютным отметкам устьев скважин строят гипсометрический профиль, на котором показывают рельеф поверхности земли и местоположение скважин.

По данным бурения строят геолого-литологические колонки, на основании которых проводят литологические и геологические границы. Используя данные замеров уровней воды в скважинах и построенные карты гидро- и пьезоизогипс, наносят положение зеркала грунтовых вод и пьезометрической поверхности, выходы источников, показывают направление движения подземных вод, выделяют водоносные горизонты и разделяющие их водоупоры.

**Табл. 6. Данные для построения карты гидроизогипс**

Номер скважины или шурфа	Абсолютная отметка устья, м	Глубина залегания статического уровня от устья по вариантам, м									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Скважины</b>											
1	88,3	3,3	3,5	3,7	3,0	2,8	3,9	4,2	4,0	4,5	4,3
2	92,1	5,1	5,3	5,5	4,8	4,6	5,7	6,0	5,8	6,3	6,1
3	90,8	4,3	4,5	4,7	4,0	3,8	4,9	5,2	5,0	5,5	5,8
4	83,0	1,2	1,4	1,6	0,9	0,7	1,8	2,1	1,9	2,4	2,2
8	91,5	4,6	4,8	5,0	4,3	4,1	5,2	5,5	5,3	5,8	5,6
9	91,0	4,0	4,2	4,4	3,7	3,5	4,6	4,9	4,7	5,2	5,0
10	84,9	2,4	2,6	2,8	2,1	1,9	3,0	3,3	3,1	3,6	3,4
16	88,2	2,2	2,4	4,6	1,0	1,7	2,8	3,1	2,9	3,4	3,2
17	83,1	1,1	1,3	1,5	0,8	0,6	1,7	2,0	1,8	2,3	2,1
<b>Шурфы</b>											
1	87,3	2,8	3,0	3,2	2,5	2,3	3,4	3,7	3,5	4,0	3,8
2	92,4	5,0	5,2	5,4	4,7	4,5	5,6	5,9	5,7	6,2	6,0
3	87,0	4,0	1,2	4,4	3,7	3,5	4,6	4,9	4,7	5,2	5,0
4	91,6	4,6	4,8	5,0	4,3	4,1	5,2	5,5	5,8	5,8	5,6

**Табл. 7. Данные для построения карты пьезоизогипс**

Скважина	Абсолютная отметка устья, м	Глубина залегания статического (пьезометрического) уровня по вариантам, м									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	88,3	11,3	11,5	11,7	11,0	10,8	11,9	12,2	12,2	12,3	12,3
2	92,1	12,1	12,3	12,5	11,8	11,6	12,7	13,0	12,8	13,3	13,1
3	90,8	11,6	11,8	12,0	11,3	11,1	12,2	12,5	12,3	12,8	12,6
4	83,0	7,5	7,7	7,9	7,2	7,0	8,1	8,4	8,2	8,7	8,5
5	76,1	4,9	5,1	6,3	4,6	4,4	5,5	5,8	5,6	6,0	5,9
6	70,0	1,9	2,0	1,8	2,1	2,3	1,7	1,5	2,5	2,0	1,6
7	68,5	3,5	3,4	3,3	3,7	3,9	4,0	4,1	3,2	3,5	8,1
8	91,5	17,9	18,1	18,3	17,6	17,4	18,5	18,8	18,6	19,1	19,9
9	91,0	15,8	16,0	16,2	15,6	15,3	16,4	16,7	16,5	17,0	16,8
10	84,9	10,6	10,8	11,0	10,3	1,1	11,2	11,5	11,3	11,8	11,6
11	74,6	4,1	4,3	1,5	3,8	3,6	4,7	5,0	4,8	5,3	5,1
12	67,8	1,8	1,9	2,1	1,7	1,5	2,0	2,3	2,5	1,8	2,3
13	65,0	1,0	1,1	2,2	1,4	1,3	1,5	1,0	0,9	1,6	0,8
14	68,0	3,8	3,9	4,2	4,3	3,6	4,5	4,4	3,6	3,7	4,6
15	90,8	16,4	16,5	16,8	16,1	15,9	17,0	17,3	17,1	17,6	17,4
16	88,2	12,2	12,4	12,6	11,9	11,7	12,8	13,1	12,9	13,4	13,2
17	83,1	9,4	9,6	9,8	9,1	8,9	10,0	10,3	10,1	10,6	10,4
18	74,7	3,7	3,3	4,0	3,9	4,3	4,5	4,4	3,6	3,8	5,1
19	68,0	1,0	1,2	1,1	1,3	1,5	0,9	1,2	1,0	1,6	1,7
20	67,3	2,8	3,0	3,2	2,5	2,3	3,4	3,7	3,5	1,0	3,8

**Табл. 8. Данные для построения гидрогеологического разреза по линии скважин 8–14**

Породы (Q <sub>4</sub> )	Мощность пород по скважинам, м						
	8	9	10	11	12	13	14
Песок мелкозернистый	11,7	10,5	4,7	–	–	–	–
Суглинок	19,3	21,8	16,5	17,1	8,2	–	7,5
Песок крупнозернистый	4,7	5,0	4,5	4,6	4,8	–	4,7
Разнозернистые пески с гравием и галькой	–	–	–	–	–	12,3	–
Глина (вскрытая мощность)	2,5	3,0	4,5	2,0	3,5	5,0	2,5

Для выполнения работы необходимо уяснить некоторые вопросы, которые помогут выполнить задание.

При построении карты необходимо соблюдать следующие условия:

1) интерполяцию абсолютных отметок удобно осуществлять графически с помощью специально подготовленной палетки;

2) начинать интерполяцию следует на выбранных главных направлениях от максимальных отметок, затем продолжить на остальной территории участка;

3) через водотоки интерполяцию проводить не следует;

4) накопители сточных вод следует рассматривать как водоем с отметкой уровня по всему периметру;

5) линии тока проводить ортогонально к линиям равного напора от максимальных отметок уровня подземных вод к зоне разгрузки;

6) расчетное сечение на ленте тока следует выбирать между двумя последними гидро-, пьезоизогипсами в зоне разгрузки.

Расход потока подземных вод определяется по формуле Дарси:

$$Q = K_{\phi} F I_{\text{ср}}, \quad (8)$$

где  $Q$  – расход потока, м<sup>3</sup>/сут;  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, м/сут, (среднее значение для данной породы);  $F$  – площадь сечения потока, м<sup>2</sup>;  $I_{\text{ср}}$  – средний напорный градиент потока.

Ионный сток рассчитывается также для выбранного расчетного сечения по формуле:

$$Q_{\text{и}} = Q_{\text{п}} \sum C_i, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{и}}$  – ионный подземный сток,  $Q_{\text{п}}$  – подземный водный сток,  $C_i$  – концентрация химических компонентов, определяющих состав подземных вод.

**Анализ химического состава подземных вод** открывает пути для изучения генезиса, пригодности для различных потребителей, определения степени их агрессивности для бетонных и металлических конструкций. Результаты химических анализов воды могут быть выражены в весовой, эквивалентной и процент-эквивалентной формах.

Весовая форма – представление ионно-солевого состава воды в миллиграммах (граммах) в 1 дм<sup>3</sup> или 1 кг воды.

В зарубежной литературе результаты анализа могут быть приведены в частях на миллион (ppm), что соответствует концентрации мг/дм<sup>3</sup>.

Эквивалентная форма записи состава вод позволяет определить соотношение между ионами с точки зрения их способности участвовать в химических реакциях, оценить качество анализа, установить генезис вод.

В расчетах используется форма записи:

$$\left[ \text{мг-экв/дм}^3 \right] = \left[ \frac{\text{мг/дм}^3}{\mathcal{E}} \right] = \left[ \left( \text{мг/дм}^3 \right) \frac{1}{\mathcal{E}} \right] = \left[ \left( \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3} \right) K \right],$$

где  $\mathcal{E}$  – химический эквивалент иона;  $K = 1/\mathcal{E}$  – переводный коэффициент (табл. 9).

**Табл. 9. Химические эквиваленты и переводные коэффициенты наиболее распространенных ионов природных вод**

Ион	$\mathcal{E}$	$K$	Ион	$\mathcal{E}$	$K$
Na <sup>+</sup>	23,0	0,0435	Cl <sup>-</sup>	35,5	0,0282
K <sup>+</sup>	39,1	0,0256	Br <sup>-</sup>	79,6	0,0125
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	18,0	0,0556	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	48,0	0,0208
Ca <sup>2+</sup>	21,0	0,0499	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61,0	0,0184
Mg <sup>2+</sup>	12,2	0,0822	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	30,0	0,0328
Fe <sup>3+</sup>	18,6	0,0537	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	62,1	0,0161
Fe <sup>2+</sup>	27,9	0,0358	I <sup>-</sup>	126,9	0,0079
Al <sup>3+</sup>	8,99	0,1112	F <sup>-</sup>	18,99	0,0526
H <sup>+</sup>	1,0	1,0	HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	46,0	0,0217
Mn <sup>2+</sup>	27,47	0,0364	OH <sup>-</sup>	17,0	0,0588
Zn <sup>2+</sup>	32,68	0,0306	HS <sup>-</sup>	33,07	0,0302
Si <sup>2+</sup>	31,77	0,0314	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	60,82	0,0164
Pb <sup>2+</sup>	103,59	0,0096	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	96,98	0,0103
Ni <sup>2+</sup>	29,35	0,0340	H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	95,10	0,0105
Co <sup>2+</sup>	29,46	0,0339	HSiO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	77,09	0,0129
Fe(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	36,43	0,0274	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	47,98	0,0208

При выражении содержания какого-либо иона в эквивалентной форме перед символом иона ставится знак *r*, например *r*Ca<sup>2+</sup>, *r*HCO<sub>3</sub> и т.д. На основе эквивалентной формы выражения состава можно определить погрешность анализа воды. Эта оценка основана на принципе электронейтральности раствора: сумма концентраций катионов (мг-экв/дм<sup>3</sup>) равна сумме концентрации анионов.

Анализ воды считается удовлетворительным, если погрешность определения менее 5 %.

Процент-эквивалентная форма показывает относительную долю участия того или иного иона в формировании ионно-солевого состава воды.

Для вычисления процентного содержания анионов (катионов) их сумму принимают за сто процентов и рассчитывают процент содержания каждого аниона (катиона) по отношению к их сумме.

Процент-эквивалентная форма позволяет устанавливать черты сходства вод, различающихся по минерализации. Затем состав воды изображается в виде формулы М.Г. Курлова.

Это псевдодробь, в числителе которой в убывающем порядке расположены анионы, а в знаменателе – в таком же порядке катионы. Ионы, содержание которых не превышает 1 %, в формулу не включают. Слева перед дробью указывают минерализацию в г/дм<sup>3</sup>, слева записывают температуру воды, рН.

Минерализация воды (M<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) – это сумма минеральных веществ, выражается в граммах или миллиграммах, содержащихся в 1 дм<sup>3</sup> воды. Для определения M<sub>H<sub>2</sub>O</sub> суммируют содержание всех ионов, определенных химическим анализом и выраженных в весовой форме.

Жесткость воды определяется содержанием в ней солей Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>. Различают: общую, карбонатную, временную (устраняемую), некарбонатную, неустраняемую (постоянную) жесткость.

**Общая жесткость Ж<sub>о</sub>** определяется как сумма мг-экв ионов Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> в 1 дм<sup>3</sup> воды и складывается из **карбонатной Ж<sub>к</sub>** и некарбонатной **Ж<sub>нк</sub> жесткости**:

$$Ж_о = Ж_к + Ж_{нк}; Ж_о = Ca^{2+} + Mg^{2+}. \quad (10)$$

### Оценка агрессивности подземных вод

Агрессивность воды связана с присутствием в ней ионов водорода, свободного диоксида углерода, сульфатов и магния. Агрессивные свойства воды проявляются по отношению к бетону и металлам.

Агрессивность воды по отношению к бетону выражается в разрушительном воздействии подземных вод определенного состава на бетонные сооружения. Оценка качества воды по отношению к бетону производится по нормам и техническим условиям Н 114-54 «Бетон гидротехнический. Признаки и нормы агрессивности воды-среды». Эти нормы учитывают воздействие на бетон следующих видов агрессивности: выщелачивающую, углекислую, общекислотную, сульфатную и магниальную.

1. Выщелачивающая агрессивность связана с выщелачиванием карбонатов, главным образом кальция.

Если вода, контактирующая с бетоном, содержит низкие концентрации Ca<sup>2+</sup>, а также HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, то карбонат кальция бетона переходит в раствор. В зависимости от типа цемента в составе

бетона вода считается агрессивной при карбонатной жесткости, меньшей 0,54–2,14 мг-экв/дм<sup>3</sup>.

2. Углекислая агрессивность обусловлена высокими концентрациями растворенной в воде углекислоты CO<sub>2</sub>.

Эта агрессивность проявляется как в отношении металла (коррозия), так и бетона. Разрушение бетона, как и при выщелачивающей агрессивности, сводится к растворению карбоната кальция. Воды, обладающие карбонатной жесткостью менее 1,4 мг-экв/дм<sup>3</sup>, следует считать агрессивными, независимо от всех других показателей.

3. Общекислотная агрессивность воды связана с повышенной концентрацией иона водорода (пониженная величина pH).

При этом бетон разрушается из-за растворения в кислой среде защитной карбонатной корки. Вода считается агрессивной для всех типов цементов: при pH < 7, если карбонатная жесткость меньше 8,6 мг-экв/дм<sup>3</sup>; при pH < 6,7, если карбонатная жесткость больше 8,6 мг-экв/дм<sup>3</sup> (в пластах высокой проводимости). Для слабопроницаемых пластов вода считается агрессивной при pH < 5.

4. Сульфатная агрессивность обусловлена присутствием в воде иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

Этот вид агрессии проявляется в кристаллизации в бетоне новых соединений и выщелачивании бетона. По сульфатной агрессии для обычных цементов воду относят к слабоагрессивной при содержании иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> от 250 до 800 мг/дм<sup>3</sup> и к агрессивной при содержании более 800 мг/дм<sup>3</sup>. В породах высокой проводимости для бетона на портландцементе вода считается агрессивной при следующих попарных содержаниях ионов (в мг/дм<sup>3</sup>):

Cl <sup>-</sup>	0–3000	3001–5000	5000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250–500	501–1000	1000

В породах слабой водопроницаемости вода считается агрессивной при содержании иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > 1000 мг/дм<sup>3</sup>, а для бетонов на пуццолановом, шлаковом и песчано-пуццолановом портландцементе – при содержании иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > 4000 мг/дм<sup>3</sup> независимо от содержания Cl<sup>-</sup>.

5. Магнезиальная агрессивность вызывает разрушение и вспучивание бетонных конструкций под воздействием Mg<sup>2+</sup>.

Для портландцемента, находящегося в сильно проницаемых породах, вода считается агрессивной при содержании иона Mg<sup>2+</sup> > 5000 мг/дм<sup>3</sup>, для других видов цемента – при содержании

ионов  $Mg^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$ , превышающем следующие попарные соединения ионов (в мг/дм<sup>3</sup>):

$SO_4^{2-}$	0–1000	1001–2000	2001–3000	3001–4000
$Mg^{2+}$	5000	3001–5000	2001–3000	1000–2000

Агрессивность воды по отношению к металлу связана с корродирующей способностью вод. Агрессивными по отношению к металлу являются воды: углекислые; сероводородные кислоты; обогащенные кислородом.

**Корродирующая способность воды** может быть определена при помощи **коэффициента коррозии**:

– для вод с кислой реакцией:

$$K_k = rH^+ + rAl^{3+} + rFe^{2+} + rMg^{2+} - rCO_3^{2-} - rHCO_3^-; \quad (11)$$

– для щелочных вод:

$$K_k = rMg^{2+} - rHCO_3^-. \quad (12)$$

По величине коэффициента коррозии различают следующие группы вод (содержание  $Ca^{2+}$  в мг/дм<sup>3</sup>):

- корродирующие,  $K_k > 0$ ;
- полукорродирующие,  $K_k < 0$ , но  $K_k + 0,05 Ca^{2+} > 0$ ;
- некорродирующие,  $K_k + 0,05 Ca^{2+} < 0$ .

## Определение водопроницаемости горных пород

Подземные воды, заполняющие трещины и пустоты в горных породах, находятся в движении. Такое движение гравитационной воды в пористой среде называется фильтрацией.

К основным фильтрационным свойствам горных пород относятся:

- водопроницаемость, определяющая способность породы пропускать через себя воду;
- пористость, или пустотность, представляющая собой относительный объем пустот.

Различают три вида пористости: общую, открытую и динамическую.

**Общая пористость** – суммарный объем всех пустот независимо от формы, размера и взаимного расположения. Общая пористость может быть выражена **коэффициентом пористости**, который равен

отношению объема пор к объему всей породы в сухом состоянии и выражается в долях единицы и в процентах:

$$n = \frac{V_n}{V} 100 \%, \quad (13)$$

где  $V_n$  – объем пор;  $V$  – объем породы.

Коэффициенты пористости можно рассчитать по удельному и объемному, весу породы по формуле:

$$n = \left( 1 - \frac{\delta}{\Delta} \right) 100, \quad (14)$$

где  $n$  – коэффициент пористости;  $\delta$  – объемный вес породы, г/см<sup>3</sup>;  $\Delta$  – удельный вес породы, г/см<sup>3</sup>.

Кроме коэффициента общей пористости в гидрогеологии, грунтоведении, инженерной геологии часто используется коэффициент **приведенной пористости**  $\varepsilon$ , который равен отношению объема пор  $V_n$  к объему скелета породы:

$$\varepsilon = \frac{V_n}{V_c}. \quad (15)$$

Зависимость коэффициента общей и приведенной пористости может быть выражена следующими формулами:

$$\varepsilon = \frac{n}{n-1}, \quad (16)$$

$$n = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}. \quad (17)$$

**Открытая пористость** – это отношение объема сообщающихся к между собой открытых пор ко всему объему образца:

$$n_o = \frac{V_{c.o}}{V}, \quad (18)$$

где  $n_o$  – открытая пористость;  $V_{c.o}$  – объем сообщающихся открытых пор;  $V$  – объем породы.

Открытая пористость определяется методом насыщения исследуемого образца породы (предварительно высушенного) керосином под вакуумом (метод И.А. Преображенского).

**Динамическая пористость** – это отношение лишь той части объема пор, через которые может передвигаться жидкость, ко всему объему образца, т. е.

$$n_d = \frac{V_d}{V}, \quad (19)$$

где  $V_d$  – объем движущейся жидкости;  $V$  – объем образца породы.

Динамическая пористость всегда меньше открытой, т. к. в ней, в отличие от открытой пористости, не учитывается объем пор, занятый капиллярно-связанной водой и слабо подвижными пленками воды на поверхности частиц горной породы.

По размерам поры и трещины разделяются на три группы:

- сверхкапиллярные (размер пор более 0,5 мм, трещин – более 0,254 мм);
- капиллярные (поры – 0,5–0,002 мм, трещины – 0,254–0,0001 мм);
- субкапиллярные (поры – менее 0,0002 мм, трещины – менее 0,0001 мм).

Если по сверхкапиллярным порам и трещинам происходит свободное движение воды, а по капиллярным – лишь при значительном участии капиллярных сил, то породы, имеющие субкапиллярные поры, являются практически водонепроницаемыми, например, глины, глинистые сланцы, аргиллиты.

Величина и характер пористости зависят от условий образования породы и последующего воздействия на нее процессов метаморфизма, цементации, выветривания и др. В скальных породах движение воды происходит по системе трещин, в рыхлых, зернистых – по промежуткам между отдельными частицами (рис. 5).

Пористость рыхлых осадочных и скальных пород зависит от ряда условий:

- 1) расположения, размера и формы частиц или зерен, из которых сложена порода;
- 2) степени отсортированности частиц или зерен;
- 3) степени и характера цементации зерен или частиц между собой;
- 4) степени выветрелости породы;
- 5) характера трещиноватости пород.

Зависимость пористости от характера расположения зерен или частиц теоретически исследовал Сликтер для наиболее простого случая, когда «идеальная» порода состоит из шарообразных зерен одинакового диаметра. Заполняя определенный объем этими шарами, легко заметить, что количество шаров, вмещающихся в данном объеме, может быть различным в зависимости от способа укладки.

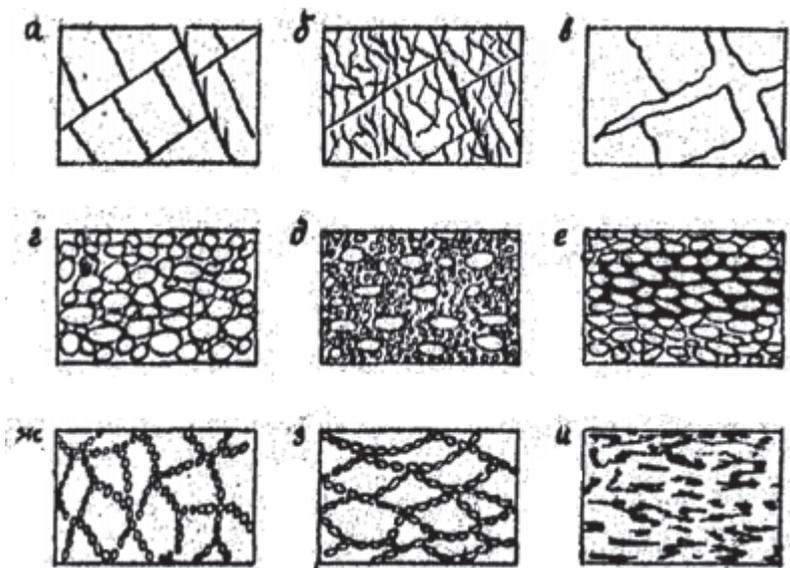


Рис. 5. Схематическое изображение различных видов пор в горных породах:  
*a* – скальная порода с отдельными структурными порами и трещинами;  
*б* – та же порода с пористостью, увеличивающейся в результате  
 процесса выветривания; *в* – кавернозная порода с крупными пустотами,  
 подвергающаяся выщелачиванию и растворению; *г* – рыхлая песчаная порода  
 с относительно хорошо отсортированными зернами и высокой пористостью;  
*д* – рыхлая песчаная порода с малой пористостью вследствие  
 неравнозерности; *е* – песчаная порода с малой пористостью  
 в результате образования цемента пор и обрастания; *ж* – лессовидная порода  
 с микро- и макропористостью; *з* – глинистая микропористая порода;  
*и* – глинистая порода с малой пористостью вследствие уплотнения  
 (последние три типа пород показаны с увеличением)

Расположение зерен можно представить в трех положениях – наиболее рыхлое (рис. 6-*a*), наиболее плотное (рис. 6-*б*) и сложение средней плотности (рис. 6-*в*).

Наиболее рыхлое расположение шаров будет соответствовать положению, при котором центры этих шаров составят тетраэдр. Величина пористости в этой случае составит 26,2 %.

В третьем случае (рис. 6-*в*) пористость будет иметь среднюю величину.

Таким образом, пористость рыхлой породы, сложенной зернами одинакового размера, может колебаться в значительных, но определенных пределах: от 26,2 до 47,6 %.

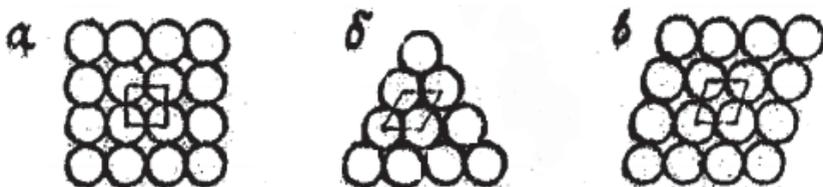


Рис. 6. Влияние расположения шаровых зерен на величину пористости:  
*a* – наименее плотное сложение зерен; *b* – наиболее плотное сложение зерен;  
*v* – сложение средней плотности

Зависимость пористости от формы зерен характеризуется тем, что чем больше формы зерен отклоняются от формы шара, тем значение пористости будет больше. Осадочные породы состоят из зерен, которые далеко не всегда представлены правильными шарами и не все имеют одинаковые размеры. Форма зерен бывает весьма различной, зависящей от характера минерального вещества, степени разрушения и истирания, степени окатанности. Неправильность и разнообразие форм зерен создают большие колебания в значениях пористости. Наибольшая пористость присуща породам, состоящим из минералов пластинчатого строения. Так, например, глины, мельчайшие частицы которых имеют пластинчатую форму, обладают *высокой* пористостью, часто превышающей 50 %.

Зависимость пористости от степени отсортированности зерен или частиц характеризуется уменьшением пористости с увеличением неоднородности рыхлой породы. Например, если рыхлая порода представляет смесь зерен различных размеров, то, вследствие заполнения крупных промежутков между зернами мелкими частицами, значение пористости будет уменьшаться. Количественное выражение степени отсортированности рыхлой горной породы характеризует коэффициент однородности или неоднородности ( $K_{\text{одн}}$ ).

Коэффициент однородности, таким образом, может являться показателем пористости: чем больше  $K_{\text{одн}}$ , тем меньше пористость.

Зависимость пористости от степени цементации частиц и зерен очевидна: менее сцементированные рыхлые породы обладает большей пористостью, более сцементированные – меньшей. Например, пористость рыхлых песчаников может достигать до 40 %, в то время как пористость сцементированных песчаников составляет всего 6–10 %.

Зависимость пористости от степени выветрелости породы и трещиноватости также не требует больших пояснений. Чем больше

рыхлая или скальная порода подверглась физическому и химическому выветриванию, тем большие значения пористости характерны для этой породы.

Совокупность всех этих факторов создает исключительное разнообразие в величинах пористости, значения которой для различных горных пород могут колебаться в пределах от долей процента (плотные магматические, метаморфические породы) до 50 % и более (почвы, торфы, рыхлые пески).

Пределы колебания пористости рыхлых и скальных пород приведены в табл. 9.

Значения общей, открытой и динамической пористости являются прямыми расчетными величинами, входящими в ряд формул при гидрогеологических расчетах.

Водопроницаемость горных пород тоже зависит, главным образом, от пористости, т. е. от характера и размера пустот и пор. Наибольшей водопроницаемостью обладают крупнотрещиноватые и закарстованные породы (известняки, доломиты), а также крупнозернистые рыхлые породы (галечники, пески). Породы с тонкими трещинами (глинистые сланцы) и рыхлые породы, состоящие из мелких фракций (супеси, суглинки), слабо водопроницаемы. Весьма слабой водопроницаемостью обладают глины (при пористости 50 % и более), табл. 10.

**Табл. 10. Фильтрационные свойства главнейших горных пород (по Н.А. Плотникову и Е.Е. Керкис)**

Группа	Характеристика проницаемости пород	Основные виды пород	Коэффициент проницаемости, Дарси	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пористость, %
I	Очень высокая	1. Галечники и гравий без заполнителя (промытые)	> 500 (500–5000)	>350 (350–3500)	25–35
		2. Глыбы и щебень в осыпях и обвалах без заполнителя	> 500 (50–10000)	> 350 (350–6500)	20–35
		3. Сильно закарстованные	> 100 (200–5000)	>70 (70–3500)	2–15
		4. Сильнотрещиноватые интрузивные гнейсы и кристаллические сланцы	> 100 иногда до 1500	> 70 иногда до 1000	1–5

Группа	Характеристика проницаемости пород	Основные виды пород	Коэффициент проницаемости, Дарси	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пористость, %
II	Высокая	1. Галечники и гравий с заполнителем – разнозернистым песком; песчано-галечные отложения, грубозернистые пески	20–100	15–70	25–35
		2. Чистые разно- и среднезернистые пески	10–80	7,0–55	25–35
		3. Закарстованные известняки	10–100	7,0–70	1–8
		4. Трещиноватые магматические (интрузивные и древние эффузивные) гнейсы и кристаллические сланцы	10–50	7,0–35	0,5–2,0
		5. Кавернозные доломиты и известняки	10–100	7,0–70	2–20
III	Средняя	1. Галечники и гравий с заполнителем – мелко- и среднезернистым песком	1–10	7,0–70	25–30
		2. Пески мелко- и среднезернистые	1–10	7,0–70	25–40
		3. Пористые цементированные (песчаники, гравелиты, конгломераты и т.п.)	1–10	7,0–70	6–20
		4. Слабозакарстованные и палеокарстовые	1–10	7,0–70	0,5–1,0
		5. Трещиноватые интрузивные, древние эффузивные и метаморфические со средней интенсивностью трещиноватости	1–10	7,0–70	0,2–0,5
		6. Трещиноватые обломочные цементированные	1–10	7,0–70	0,2–2,0
IV	Низкая	1. Пески тонкозернистые, пылеватые и глинистые, легкие супеси	0,1–1,0	0,7–7,0	25–40
		2. Пористые цементированные (алевролиты, песчаники и т.п.)	0,1–1,0	0,07–0,7	5–20

Группа	Характеристика проницаемости пород	Основные виды пород	Коэффициент проницаемости, Дарси	Коэффициент фильтрации, м/сут	Пористость, %
IV	Низкая	3. Слаботрещинованные магматические, метаморфические и осадочные	0,1–1,0	0,07–0,7	0,1–1,0
		4. Антрацит и сухие каменные угли	0,1–1,0	0,07–0,7	0,1–1,0
		5. Слаборазложившийся торф	0,1–1,0	0,07–0,7	50–70
		6. Лесс и лессовиные суглинки	0,1–1,0	0,007–0,7	25–50
V	Весьма низкая	1. Суглинки, тяжелые супеси	0,01–0,1	0,007–0,7	25–50
		2. Сланцы песчаноглинистые, хлоритовые горючие и др. филлиты	0,01–0,1	0,007–0,7	2–4
		3. Плотносцементированные обломочные с небольшой пористостью (алевролиты, песчаники, песчаные сланцы и т.п.)	0,01–0,1	0,007–0,7	8–10
		4. Различные очень слаботрещиноватые	0,01–0,1	0,007–0,7	0,01–0,1
		5. Хорошо разложившийся торф	0,01–0,1	0,007–0,7	100–150 и более
VI	Близкая к нулю	1. Глины мергелистые, глины, аргиллиты, тяжелые суглинки	0,01	0,005	15–45
		2. Галоидные соли, гипс, ангидрит глубже верхней трещиноватой и закарстованной зоны	Около нуля	Около нуля	Около нуля
		3. Различные скальные и полускальные породы глубже верхней трещиноватой зоны	< 0,01	< 0,005	0,01

Водопроницаемость горных пород характеризуется коэффициентом фильтрации в размерности скорости (см /с, м/с, м/сут), получаемым из основного закона фильтрации подземных вод – Закона

Дарси, согласно которому количество фильтрующейся воды  $Q$  в единицу времени прямо пропорционально коэффициенту фильтрации  $K$ , площади сечения  $F$ , разности уровней  $\Delta H$ , под действием которой происходит фильтрация, и обратно пропорционально длине пути фильтрации  $\Delta l$ :

$$Q = K \frac{H_1 - H_2}{\Delta l} F = K \frac{\Delta H}{\Delta l} F, \quad (20)$$

где  $\frac{\Delta H}{\Delta l} = J$  – изменение уровня по пути фильтрации, называется напорным или гидравлическим градиентом. Гидравлический градиент  $J$  (уклон) – величина безразмерная.

Разделив обе части уравнения (20) на  $F$  и обозначив  $Q/F$  через  $v$ , получим:

$$v = K J, \quad (21)$$

где  $v$  – скорость фильтрации. При градиенте  $J$ , равном единице,  $v = K$ .

Необходимо иметь в виду, что скорость фильтрации  $v$  не равна действительной скорости движения подземных вод, т. к. речь идет о фиктивном потоке жидкости, отнесенном ко всему поперечному сечению фильтрующей породы. Действительная (истинная) скорость движения подземных вод, которая имеет место в сообщающихся порах и трещинах горных пород, будет определяться уравнением:

$$U = \frac{v}{n_a}, \quad (22)$$

где  $U$  – действительная скорость;  $v$  – фиктивная скорость;  $n_a$  – активная пористость в долях единицы.

Из формулы (20) коэффициент фильтрации может быть выражен как расход, если при этом принять  $F = 1$  и  $J = 1$ , т. е.  $Q = K$ . Следовательно, коэффициент фильтрации можно охарактеризовать как количество воды, проходящее в единицу времени через поперечное сечение пористой среды, равное единице при напорном градиенте, также равном единице.

Наиболее удобной единицей измерения коэффициента фильтрации является метр в сутки (имеется в виду фильтрация пресной воды при температуре 5–10 °С).

Наиболее распространенной единицей измерения коэффициента водопроницаемости является 1 дарси, т. е. расход жидкости в кубических сантиметрах в секунду, имеющей вязкость 1 сантипауз

(Спз) и фильтрующей через поперечное сечение площадью  $1 \text{ см}^2$  при градиенте давления  $1 \text{ (кгс/см}^2\text{)/см}$ .

Коэффициенты водопроницаемости в дарси и фильтрации в метрах в сутки численно близки друг к другу, а при температуре пресной воды  $26\text{--}27 \text{ }^\circ\text{C}$  они равны. При температуре пресной воды  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  умножение коэффициента водопроницаемости в дарси на  $0,66$  дает значение коэффициента фильтрации в м/сутки.

Значение результатов изучения водопроницаемости или фильтрационных свойств горных пород особенно велико при выборе местоположения плотин и других гидротехнических сооружений, при разработке противофильтрационных мероприятий, при прогнозе водопритоков в горные выработки, при оценке запасов подземных вод для бытового и промышленного водоснабжения и т.д.

В настоящее время в связи с проблемой охраны окружающей среды от загрязнения промышленными отходами особенно большое значение приобрело изучение фильтрационных свойств горных пород для установления способов борьбы загрязнения поверхностных и подземных вод путём закачки промышленных сточных вод в глубокие горизонты, а также возможные утечки промышленных стоков и фильтрации в подземные воды.

Ниже рассмотрены лабораторные методы определения коэффициента фильтрации.

Отчётность по каждой лабораторной работе заключается в следующем:

- в отдельной лабораторной тетради коротко приводится ход анализа и схематически рисунок прибора;
- таблицы фактических результатов;
- расчет параметров грунта;
- выводы по работе.

## **Лабораторная работа № 2.**

### **Определение коэффициента фильтрации породы трубкой Каменского**

Трубка Каменского имеет длину  $23\text{--}25 \text{ см}$ , диаметр  $2\text{--}4 \text{ см}$  (рис. 7). Нижний конец её закрыт сеткой или марлей и нанесены через  $1 \text{ см}$  деления от  $0$  до  $20$ , причём деление  $20$  должно совпадать с нижним краем трубки. Трубка укрепляется на штативе с металлической поставкой.

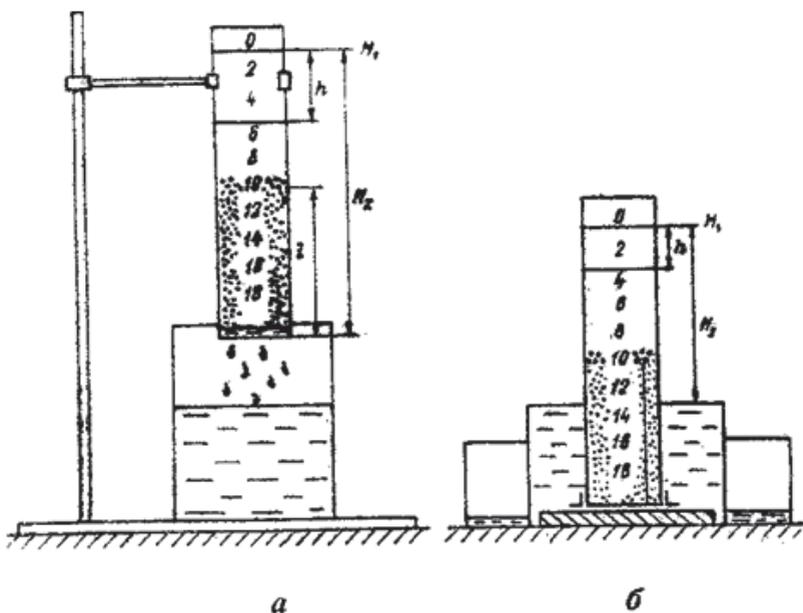


Рис. 7. Трубка Г.Н. Каменского:  
 а – опыт при свободном истечении; б – опыт при несвободном истечении

*Необходимое оборудование:* трубка Г.Н. Каменского, штатив, батарейный стакан, чашка, секундомер, термометр.

### Подготовка пробы и проведение опыта

1. Опустить трубку в батарейный стакан высотой 15–20 см, в которой налита вода. Наполнить трубку песком небольшими порциями, уплотняя его постукиванием по стенкам трамбовкой и одновременно увлажняя, для чего в стакан приливать воду в количестве, не превышающем высоту слоя песка.

2. После заполнения трубки песком на высоту 10 см (это будет длина фильтрующего слоя  $l$ ) и полного его насыщения водой снизу по капиллярам в стакан налить ещё воды в таком количестве, чтобы уровень ее был на 1–2 см выше уровня песка в трубке.

3. Насыпать поверх увлажнённого песка слой гравия толщиной 1–2 см для предохранения поверхности от размыва. Если исследуемый образец породы мелкозернистый и частицы его легко проходят через марлю (сетку), то следует на марлю предварительно

насыпать слой крупнозернистого песка толщиной в 1 см и затем уже загружать слой (10 см) исследуемый породы.

4. Закрепить трубку на штативе, приподнять её над стаканом или чашкой, налить сверху воды до уровня 1–2 см выше нулевого деления и засечь секундомером время прохождения уровня воды в трубке от нуля до деления 3, от 0 до 5 и 0 до 7 см (величины понижения  $S$ ).

5. Для получения среднего значения коэффициента фильтрации опыт повторить с трёхкратным контролем на каждом понижении.

6. Данные, полученные в процессе опыта, занести в журнал (табл. 11).

**Табл. 11. Определение коэффициента фильтрации породы трубкой Г.Н. Каменского (проба № \_\_)**

Название породы	Первоначальный напор $h$ , см	Величина понижения уровня $S$ , см	Время понижения уровня $t$ , с	$S/h$	$f(S/h)$	Длина пути фильтрации $l$ , см	Коэффициент фильтрации $K = \frac{l}{t} f\left(\frac{S}{h}\right)$	Температура $T$ , °C	Коэффициент фильтрации при 10 °C: $K_{10} = \frac{K \cdot \text{ТП}_{10}}{\text{ТП}_{\text{факт}}}$

7. Замерить температуру профильтровавшейся воды.

8. Вычислить коэффициент фильтрации для каждого понижения по формуле:

$$K = \frac{l}{t} f\left(\frac{S}{h}\right), \quad (23)$$

где  $K$  – коэффициент фильтрации см/с (для того, чтобы пересчитать средние значения коэффициента фильтрации размерности см/с, в м/сут, надо умножить полученные значения на 864);  $l$  – длина пути фильтрации, см;  $t$  – время понижения уровня воды в трубке от 0 до делений 3, 5, 7 с;  $S$  – понижение уровня воды в трубке за время  $t$ , с;  $h$  – первоначальный напор, см.

Величина  $f(S/h)$  определяется по табл. 12.

Табл. 12. Значение  $f(S/h)$

$S/h$	$f(S/h)$	$S/h$	$f(S/h)$	$S/h$	$f(S/h)$	$S/h$	$f(S/h)$
0,01	0,010	0,26	0,301	0,51	0,713	0,76	1,427
0,02	0,020	0,27	0,315	0,52	0,734	0,77	1,470
0,03	0,030	0,28	0,329	0,53	0,755	0,78	1,514
0,04	0,040	0,29	0,343	0,54	0,777	0,79	1,561
0,05	0,051	0,30	0,357	0,55	0,799	0,80	1,609
0,06	0,062	0,31	0,371	0,56	0,827	0,81	1,661
0,07	0,073	0,32	0,385	0,57	0,844	0,82	1,715
0,08	0,083	0,33	0,400	0,58	0,868	0,83	1,771
0,09	0,094	0,34	0,416	0,59	0,892	0,84	1,833
0,10	0,105	0,35	0,431	0,60	0,916	0,85	1,897
0,11	0,117	0,36	0,446	0,61	0,941	0,86	1,966
0,12	0,128	0,37	0,462	0,62	0,967	0,87	2,040
0,13	0,139	0,38	0,478	0,63	0,994	0,88	2,120
0,14	0,151	0,39	0,494	0,64	1,022	0,89	2,207
0,15	0,163	0,40	0,510	0,65	1,050	0,90	2,303
0,16	0,174	0,41	0,527	0,66	1,079	0,91	2,408
0,17	0,186	0,42	0,545	0,67	1,109	0,92	2,526
0,18	0,198	0,43	0,562	0,68	1,140	0,93	2,659
0,19	0,210	0,44	0,580	0,69	1,172	0,94	2,813
0,20	0,223	0,45	0,598	0,70	1,204	0,95	2,996
0,21	0,236	0,46	0,616	0,71	1,238	0,96	3,219
0,22	0,248	0,47	0,635	0,72	1,273	0,97	3,507
0,23	0,261	0,48	0,654	0,73	1,309	0,98	3,912
0,24	0,274	0,49	0,673	0,74	1,347	0,99	4,605
0,25	0,288	0,50	0,693	0,75	1,386		

Можно получить значения коэффициента фильтрации по номограмме Н.Н. Биндемана (рис. 8), для этого приложить линейку к шкале  $S/h$  и к шкале времени понижения уровня. Продолжение этой линии до пересечения со шкалой коэффициента фильтрации укажет величину последнего.

9. Привести результаты опыта к необходимой температуре, например 10 °С. Для этого полученный коэффициент фильтрации умножить на температурную поправку, соответствующую 10 °С и разделить на поправку температуры, при которой проведено определение коэффициента фильтрации:

$$K_{10} = \frac{K_{\text{факт}} \cdot \text{ТП}_{10}}{\text{ТП}_{\text{факт}}}. \quad (24)$$

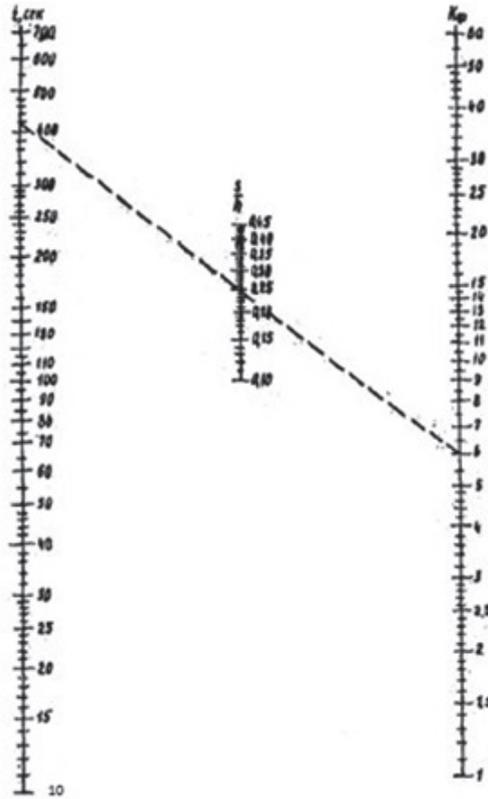


Рис. 8. Номограмма Н.Н. Биндемана для определения коэффициента фильтрации породы прибором Г.Н. Каменского

Температурные поправки можно взять из табл. 13 или вычислить по формуле Пуазейля:

$$ТП = 1 + 0,0337T + 0,000221T^2. \quad (25)$$

Табл. 13. Температурные поправки (ТП) по Пуазейлю

T °C	ТП										
10,0	1,36	12,5	1,46	15,0	1,56	17,5	1,66	20,0	1,76	22,5	1,86
10,5	1,38	13,0	1,48	15,5	1,58	18,0	1,68	20,5	1,78	23,0	1,86
11,0	1,40	13,5	1,50	16,0	1,60	18,5	1,70	21,0	1,80	24,0	1,92
11,5	1,42	14,0	1,52	16,5	1,62	19,0	1,72	21,5	1,82	25,0	1,96
12,0	1,44	14,5	1,55	17,0	1,64	19,5	1,74	22,0	1,84	26,0	2,00

10. Если исследуемый образец – крупнозернистый песок, то следует величину первоначального напора  $h$  уменьшить. Для этого нижний конец трубки с песком погрузить в стакан, заполненный до краев водой, который поставить в чашку. Величина первоначального напора  $h$  в этом случае будет измеряться от 0 до уровня воды в стакане (рис. 7-б).

11. Вычислить средний коэффициент фильтрации и скорость фильтрации в м/сут для каждого понижения.

12. После проведенных определений  $K_{\phi}$  и скорости фильтрации строится график зависимости скорости фильтрации от градиента напора и производится отбраковка данных, отличающихся больше, чем на 10 % от среднего значения скорости. Удовлетворяющие этому требованию значения коэффициенты фильтрации усредняются, и дается определение грунта по его коллекторским свойствам: проницаемые (водоносные), или коллекторы (более 0,1 м/сут), полупроницаемые, или относительные водоупоры (от 0,001 до 0,1 м/сут) и непроницаемые, или водоупоры (менее 0,001 м/сут).

### **Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента фильтрации породы трубкой СПЕЦГЕО**

Трубка СПЕЦГЕО предназначена для определения коэффициента фильтрации песчаных пород с нарушенной и ненарушенной структурой при переменных напорных градиентах от 0 до 1.

Прибор состоит из фильтрационной трубки, корпуса с крышкой и специального винтового телескопического приспособления, позволяющего насыщать породу и регулировать напор воды [2].

Фильтрационная трубка (рис. 9-в) состоит из основного металлического цилиндра 5 с заостренными краями площадью внутреннего сечения, равной 25 см<sup>2</sup>, дна прибора 6, которое надевается на нижнюю часть цилиндра, и латунной сетки 7, вставляемой в дно. На верхней части цилиндра устанавливается муфта 2 с латунной сеткой 3 и со стеклянным баллоном 1 (сосудом Мариотта), на одной стороне которого нанесена шкала. Стеклянный сосуд объемом 150–180 см<sup>3</sup> имеет суженное горлышко, через которое автоматически подается вода в прибор во время фильтрации.

Телескопическое приспособление состоит из подставки 11, винта 8 и планки 4. На планке 4 нанесены деления напорного градиента от 0 до 1 с ценой деления 0,02.

Имеется ещё одна модель трубки СПЕЦГЕО, выпускаемая нашей промышленностью под маркой КФЗ. Эта модель отличается только тем, что в ней телескопическое приспособление состоит из двух стаканов: наружного 6, имеющего внутреннюю резьбу, и внутреннего 7, имеющего в основании наружную резьбу и нанесённую на корпус шкалу напорного градиента от 0 до 1 (рис. 9-а, б).

*Необходимое оборудование:* трубка СПЕЦГЕО, секундомер, стеклянная батарейная банка, трамбовка, термометр, ложка или совок.

### Подготовка пробы и проведение анализа

1. Из корпуса прибора извлечь фильтрационную трубку 5 (рис. 9). Снять с фильтрационной трубки муфту 2 с латунной сеткой 3 и мерным стеклянным сосудом 1.

2. При испытании песчаных пород нарушенной структуры коэффициент фильтрации следует определять дважды: при рыхлом их сложении и при самом плотном. Наполнение металлического цилиндра в первом случае произвести простым насыпанием породы до необходимой высоты. Во втором случае выполнение породы провести слоями в 1–2 см, с легкой трамбовкой.

3. При опытах с тонкозернистыми песками на дно трубки засыпать буферный слой песка высотой в 2–3 мм из фракции диаметром 0,5–0,25 мм.

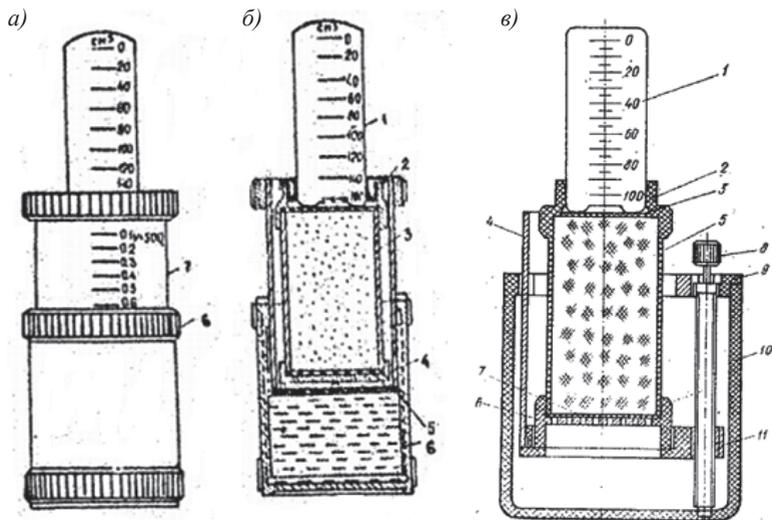


Рис. 9. Прибор СПЕЦГЕО (а, б) и КФЗ (в)

4. Если определяется коэффициент фильтрации породы с нарушенной структурой (отобранной в полевых условиях), то с цилиндра 5 снять дно 6 с латунной сеткой 7 и цилиндр в вертикальном положении вдавить непосредственно в породу, а затем отделить от неё при помощи ножа.

5. После заполнения цилиндра породой в корпус 10 налить воду и вращением винта 8 поднять поставку 11 до совмещения отметки на планке 4 напорного градиента 1 с верхним краем крышки 9.

6. На подставку 11 установить фильтрационную трубку с исследуемой породой. Вращением винта 8 медленно погрузить фильтрационную трубку с породой в воду до отметки напорного градиента  $J = 0,8$ . В таком положении оставить прибор до момента появления влаги в верхнем торце цилиндра, о чем судят по изменившемуся цвету породы.

7. Положить на породу латунную сетку 3, надеть на фильтрационную трубку муфту 2 и вращением винта 8 опустить трубку в крайнее нижнее положение.

8. Заполнить стеклянный сосуд 1 водой, зажать отверстия большим пальцем и быстро опрокинуть, вставив в муфту фильтрационной трубки так, чтобы горлышко сосуда соприкасалась с латунной сеткой.

В таком положении стеклянный сосуд автоматически поддерживает под породой постоянный уровень воды 1–2 мм. Как только этот уровень, вследствие просачивания воды через породу, понизится, в стеклянный сосуд прорвется пузырек воздуха, и соответствующее количество воды вытечет из него. Этим достигается постоянство напорного градиента.

9. Если в стеклянный сосуд прорываются крупные пузырьки воздуха, это свидетельствует о том, что горлышко сосуда отстоит на значительное расстояние от поверхности породы. В этом случае необходимо опустить сосуд ниже на 1–2 мм и добиться того, чтобы в него равномерно поднимались мелкие пузырьки воздуха.

10. По достижении указанных условий установить планку 4 на градиент  $J = 0,6$  и долить воды в корпус 10 до верхнего края.

11. Отметить по шкале уровень воды в стеклянном сосуде, пустить секундомер и по истечении определённого времени (50–100 с для среднезернистых песков и 200–500 с для глинистых песков) заметить второй уровень воды в стеклянном сосуде 1, что дает возможность определить расход воды  $Q$ , профильтровавшейся через породу за время  $t$ (с).

12. Для получения средней величины коэффициента фильтрации повторить замеры расхода воды при различных понижениях уровня воды в стеклянном сосуде за время  $t$ (с). Повторить опыт при данном градиенте 2–3 раза.

13. Замерить температуру профильтровавшейся воды и вычислить температурную поправку (можно взять по табл. 13).

14. Вычислить коэффициент фильтрации по формуле:

$$K = \frac{Q}{FJt}, \text{ см/с}, \quad (26)$$

где  $Q$  – количество профильтровавшейся воды за время  $t$  (с);  $F$  – площадь поперечного сечения металлического цилиндра (см<sup>2</sup>);  $J$  – напорный градиент.

15. Вычислить среднее значение коэффициента фильтрации, введя поправку на температуру воды (ТП), разделив на нее полученную величину  $K_{\text{ср}}$ , и перевести  $K_{\text{ср}}$  в размерность м/сут, умножив его для этой цели на 864.

16. Все данные, полученные в процессе опыта, занести в табл. 14.

**Табл. 14. Определение коэффициента фильтрации породы трубкой СПЕЦГЕО (проба № \_)**

Название породы	Градиент напора, $J$	Площадь поперечного сечения, $F$ , см <sup>2</sup>	Время фильтрации $t$ , с	Коэффициент фильтрации, см/с	Температура воды $T$ , °С	Температурная поправка ТП	Коэффициент фильтрации, м/сут $K = K \text{ см/с} \cdot 864$	Скорость фильтрации, $V$ , м/сут

После проведенных определений  $K_{\text{ф}}$  и скорости фильтрации строится график зависимости скорости фильтрации от градиента напора и производится отбраковка данных, отличающихся больше, чем на 10 % от среднего значения скорости. Удовлетворяющие этому требованию значения коэффициенты фильтрации усредняются и дается определение грунта по его коллекторским свойствам: проницаемые (водоносные), или коллекторы (более 0,1 м/сут), полупроницаемые, или относительные водоупоры (от 0,001 до 0,1 м/сут) и непроницаемые, или водоупоры (менее 0,001 м/сут).

Особое значение в гидрогеологии имеют водопроницаемые породы или коллекторы, которые обеспечивают наиболее интенсивную фильтрацию вод в недрах. В зависимости от величины коэффициента фильтрации различают коллекторы плохие (менее 1 м/сут), средние (от 1 до 10 м/сут) и хорошие (более 10 м/сут).

Водоупоры, напротив, препятствуют фильтрации и изолируют коллекторы друг от друга.

Полевые опытно-фильтрационные исследования предназначены для изучения водопроницаемости и водообильности пород в условиях естественного залегания. С их помощью можно определить коэффициент фильтрации, водопроницаемость пород, их уровень непереносимости и т.д. Основными видами полевых фильтрационных исследований являются опытные наливывы в шурфы и откачки или нагнетания в скважинах. Полевые исследования проводятся в комплексе с лабораторными работами, только так можно тщательно изучить свойства грунта, который будет являться подстилающей поверхностью и слагающий разрез площадки под строительство.

## Литература

1. Михайлов Л.Е., Бродская Н.А. Гидрогеология: учебник. – СПб.: РГГМУ, 2003. – 410 с.
2. Бродская Н.А. Методические указания по дисциплине «Гидрогеология». – СПб.: РГГМУ, 2009. – 52 с.
3. Экология. Сборник задач, упражнений и примеров: учеб. пособие для вузов / Н.А. Бродская, О.Г. Воробьев, А.Н. Маковский и др. – М.: Дрофа, 2006. – 508 с.