

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ.

МАТЕРИАЛЫ
ПО ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ГЕОЛОГИИ.
Выпуск 27.

COMITÉ GÉOLOGIQUE.

MATÉRIAUX
POUR LA GÉOLOGIE GÉNÉRALE ET APPLIQUÉE.
Livraison 27.

сн 10-117
А. К. Болдырев.

ОПЫТЫ НАД ФИЛЬТРАЦИЕЙ
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ IN SITU В СВЯЗИ С ПРОЕКТОМ
ВОДОХРАНИЛИЩА НА Р. ЧУ В ТУРКЕСТАНЕ.

С ДОБАВЛЕНИЕМ СТАТЬИ

А. Ф. Вайполина.

НАБЛЮДЕНИЯ НАД ФИЛЬТРАЦИЕЙ
В МАЛОПРОНИЦАЕМЫХ КОРЕННЫХ ПОРОДАХ.

А. Boldirev.

Quelques expériences sur la filtration dans les roches in situ en relation
avec le projet d'un réservoir d'eau sur le fleuve Tchou au Turkestan.

Avec un article de

A. Vaïpolin

OBSERVATIONS SUR LA FILTRATION DANS
LES ROCHES MÈRES PEU PERMÉABLES.

ИЗДАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КОМИТЕТА.
ЛЕНИНГРАД.
1926.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ.

МАТЕРИАЛЫ
ПО ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ГЕОЛОГИИ.
Выпуск 27.

COMITÉ GÉOLOGIQUE.

MATÉRIAUX
POUR LA GÉOLOGIE GÉNÉRALE ET APPLIQUÉE.
Livraison 27.

А. Н. Болдырев.

**ОПЫТЫ НАД ФИЛЬТРАЦИЕЙ
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ IN SITU В СВЯЗИ С ПРОЕКТОМ
ВОДОХРАНИЛИЩА НА Р. ЧУ В ТУРКЕСТАНЕ.**

С ДОБАВЛЕНИЕМ СТАТЬИ

А. Ф. Вайполина.

НАБЛЮДЕНИЯ НАД ФИЛЬТРАЦИЕЙ
В МАЛОПРОНИЦАЕМЫХ КОРЕННЫХ ПОРОДАХ.

A. Boldirev.

**Quelques expériences sur la filtration dans les roches in situ en relation
avec le projet d'un réservoir d'eau sur le fleuve Tchou au Turkestan.**

Avec un article de

A. Vaïpolin

OBSERVATIONS SUR LA FILTRATION DANS
LES ROCHES MÈRES PEU PERMÉABLES.

ИЗДАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КОМИТЕТА.
ЛЕНИНГРАД.
1926.

2
ГОС. ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР
435 / 7 / 61

Н
2970
227

Напечатано по распоряжению Геологического Комитета.
(Постановление Присутствия Геологического Комитета 10 мая 1916 г.).

Опыты над фильтрацией в горных породах *in situ* в связи с проектом водохранилища на реке Чу в Туркестане.

А. К. Болдырев.

(Quelques expériences sur la filtration dans les roches *in situ*, en relation avec le projet d'un réservoir d'eau sur le fleuve Tchou, au Turkestan. Par A. Boldirev).

I. Цели опытов и цели статьи.

Летом 1914 года я работал, как гидрогеолог партии горного инженера В. П. Половникова, на средства Отдела Земельных Улучшений в Пишпекском и Пржевальском уездах Семиреченской области.

Здесь, кроме общего геологического и гидрологического обследования известного участка и наряду с некоторыми другими задачами, мне было предложено исследовать в одном месте долины реки Чу горные породы с точки зрения их водопропускной способности.

Начальником партии изысканий по орошению долины реки Чу, инженером В. А. Васильевым, был намечен и частью запроектирован ряд различных гидротехнических сооружений по этой реке. В том числе между почтовыми станциями Орттокой и Кутемалды, в 7 верстах от первой и в 16 от второй, было предложено устройство плотины большого водохранилища с примерным объемом в 48.000.000 куб. саж. Такое водохранилище требует в избранном месте плотины, которая подняла бы уровень воды у своего подножия на 20 сажен выше нынешнего, именно с уровня горизонтали 97-й сажени до уровня горизонтали 117-ой сажени (см. план, фиг. 1).

Весьма важными вопросами для учета полезных водных запасов, для постройки и жизни плотины являлись три следующие:

1. Установление, хотя бы приблизительное, тех количеств воды, которые будут при существовании водохранилища просачиваться через окружающие горные породы.
2. Установление приблизительных скоростей этого просачивания.
3. Определение существующего подземного дебита реки Чу.

Решению этих вопросов были посвящены наши опыты.

Ближайшим и деятельнейшим моим помощником в этих работах был П. В. Кумпан. Часть опытов (в шурфе № 4) выполнена А. Ф. Вайполиным. Со стороны А. Ф. Вайполина, заведывавшего горно-разведочными работами на месте будущей плотины, и его помощника Б. Е. Червякова мы встретили вообще столь предупредительное содействие, что я считаю себя обязанным высказать им здесь свою сердечную благодарность.

Несмотря на некоторые неудачи в постановке опытов и организации дела и несмотря на немногочисленность наших опытов из-за недостатка времени, мне удалось из них получить цифры, имеющие существенное, на мой взгляд, практическое значение.

Оригинальность поставленных предо мною задач, а также уверенность в ценности всяких планомерных наблюдений побуждают меня опубликовать эту работу.

К этим побуждениям присоединяются еще два. Гидрогеология вообще не столь богата экспериментами в горных породах *in situ*. Это увеличивает значение наших немногочисленных опытов. Это во-первых. Во-вторых же, в ходе этих опытов мною выработан способ определения верхнего предела коэффициента проводимости k_1 в известной формуле Дарси, имеющей вид:

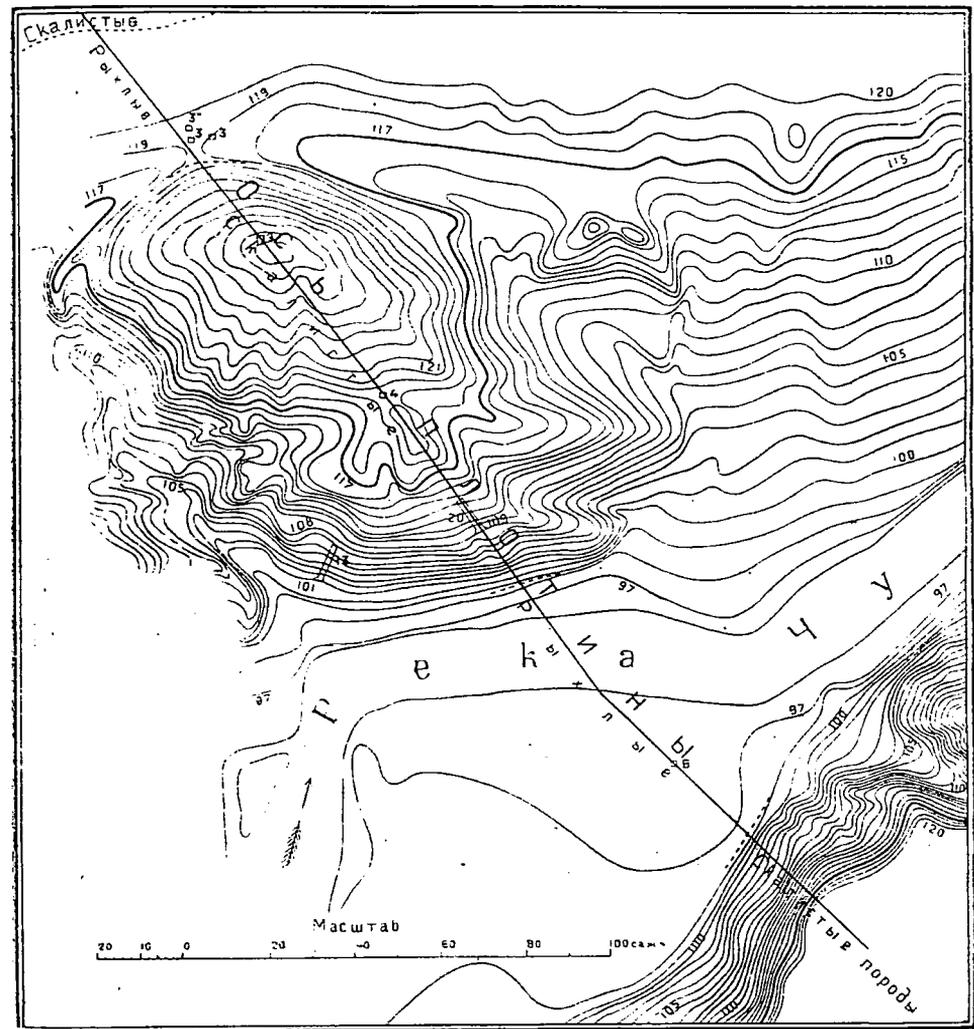
$$q = k_1 \frac{H}{L} \omega.$$

Опубликование этого способа я считаю также полезным.

В соответствии с изложенным статья эта составляется следующими частями: следующая за этой вводной I частью, II — содержит описание геологического строения местности. III — содержит ответы на вопрос строителей об ожидаемой утечке из водохранилища. IV — содержит ответы на вопрос строителей об ожидаемых действительных скоростях фильтрации из водохранилища. V — содержит ответ на вопрос строителей о величине подземного дебита реки Чу. VI — описывает наши попутные наблюдения над заиливанием горных пород. VII — выясняет общее значение примененных нами методов гидрогеологического исследования. Добавление, написанное А. Ф. Вайполиным, подробно описывает опыты в одной из наших горных пород: в плотных порфировых сиенитах. Выделение этого описания из статьи сделано потому, что наблюдения велись другим лицом и по несколько другому методу.

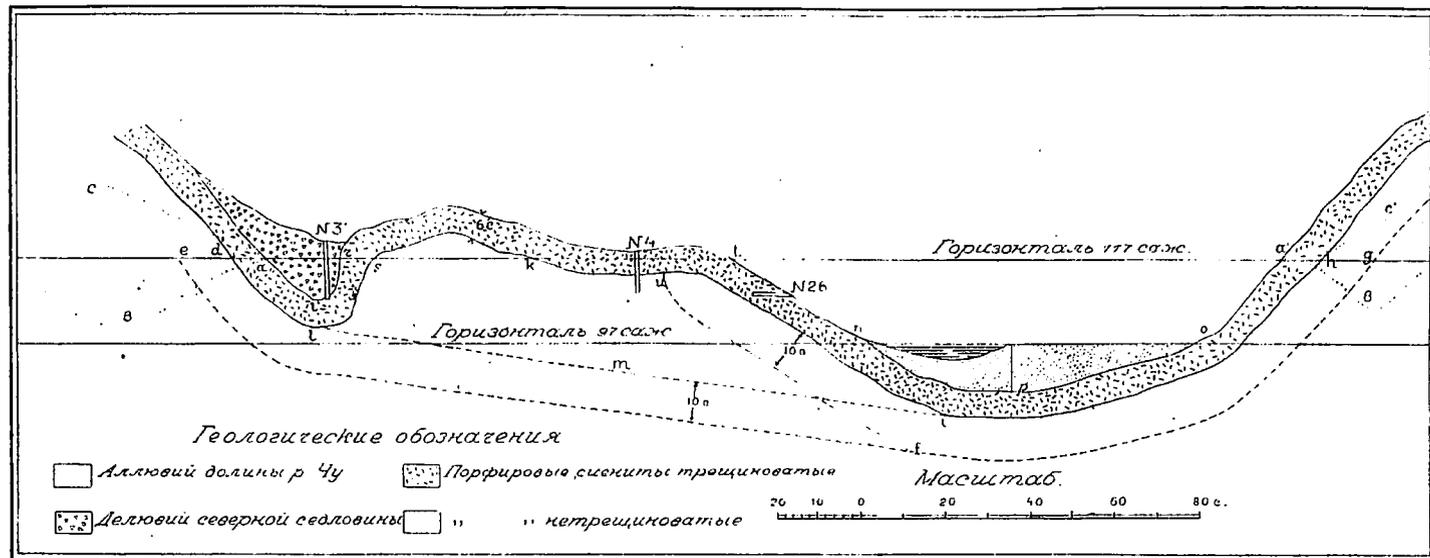
II. Геологическое строение местности.

Из прилагаемых плана (фиг. 1) и разреза по оси плотины (фиг. 2) видно, что водохранилище должно расположиться к юго-западу от плотины, что ось ее, упираясь обоими концами в скалы, имеет в своей середине также скалистый участок, отделенный от обеих боковых скал рыхлыми полосами.



Фиг. 1. План местности, где проектировалась плотина водохранилища на р. Чу близ оз. Иссык-куль в Семиречьи (Туркестан).

Все упомянутые скалистые участки имеют один и тот же петрографический характер: они сложены красным порфировым сиенитом (нордмаркитом), частью кварцевым, с огромными (до 10—15 см.) выделениями полевого шпата. Эта порода прорезана жилами темных порфировых и порфиритовых пород. Привожу цифры, характеризующие залегание этих жил, замеренные здесь и в ближайших к изображенному участку местах.



Фиг. 2. Вертикальный геологический разрез по оси предполагаемой плотины (фиг. 1).

ТАБЛИЦА I.

Место наблюдения	Порода, в которой проходит жила	Простираание	Падение	Мощность
Правый берег	Порфиновый сиенит	NE 30° NE 60°—80°	NW ∠ 63° NW ∠ 86°	} до 2 метр.
	Песчаник	NE 74° NE 43° NE 20°	Вертик. NW ∠ 65° Вертик.	
	В среднем для правого берега	NE 20°—80°		
Левый берег		NE 30°—75°	NW 60°	0,2—1,0 метр.

Северная рыхлая полоса представляет седловину, заполненную делювием, составленным остроугольными и обтертыми обломками вышеупомянутых пород, перемешанными с бурой глиной.

Южная рыхлая полоса, по которой протекает самая река, образована вблизи скал таким же делювием, а в середине — отложениями реки: галечниками, песками, илами и даже глинистыми прослоями.

Рассматривая эти породы с точки зрения их водопропускной способности, надо заметить следующее.

1. Жильные породы не имеют в этом отношении самостоятельного значения вследствие своего подчиненного развития.

2. Гораздо важнее в группе скалистых пород различить внешнюю трещиноватую массу (проницаемую en grand) и внутреннюю массу (непроницаемую) ¹⁾.

3. Отложения русла реки состоят из различных, в смысле водопроницаемости, пород; в большинстве эти породы сильно проницаемы и относятся к группе проницаемых en petit. Так как, однако, слои здесь сравнительно тонки и нередко выклиниваются, как это вообще характерно для отложений рек, — то изучать водопроницаемость каждого прослоя особо было бы слишком хлопотливо и ненужно.

Итак, с точки зрения водопроницаемости породы, которые войдут в состав тела и основания плотины, разделяются на следующие: 1) наружные трещиноватые скалистые породы; 2) внутренние нетрещиноватые скалистые породы; 3) делювий северной ложины-седловины; 4) аллювий современной долины реки Чу.

¹⁾ Я придерживаюсь здесь того деления пород на три группы, которое дал D'Andrimont (La science hydrologique, 1906, p. 12—13): 1) непроницаемые (напр., плотный гранит), 2) проницаемые en petit (напр., песок), 3) проницаемые en grand (напр., трещиноватый известняк).

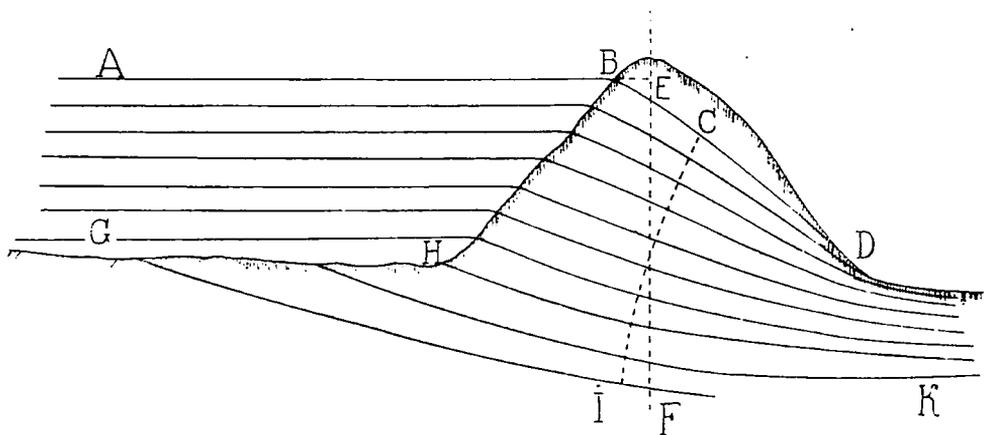
III. Максимальная утечка из водохранилища.

1. Схематизация задачи.

Первая наша практическая задача состояла в том, чтобы определить потерю воды из водохранилища вследствие просачивания через горные породы.

Переводя эту задачу на язык гидрогеологии, следует сказать, что сущность ее заключалась в определении дебита подземного потока, который пойдет сквозь плотину и под нею после сооружения водохранилища.

Такая задача для точного своего решения представляет значительные, даже может быть неодолимые трудности, потому что даже более или менее точное определение дебита существующего подземного потока есть работа весьма сложная, а здесь идет речь о потоке будущем.



Фиг. 3. Схема вертикального разреза поперек плотины.

Выполнение этой задачи оказалось возможным лишь потому, что для строигелей достаточно было знать собственно не средний дебит, а максимум дебита или, еще точнее, ту величину, выше которой дебит не может возрасти ни в каком случае, и которая при этом все же как можно меньше отступает от среднего дебита.

Заметив это, схематизируем теперь вопрос.

На фиг. 3 представлена схема разреза, поперечного по отношению к будущей плотине и продольного по отношению к руслу или к струям потока.

Здесь AB — поверхность воды, GH — дно водохранилища, BCD — будущая депрессионная кривая, представляющая верхнюю границу потока, уходящего из водохранилища. Принимаем, что GIFK есть нижняя граница потока, т. е. что струи, лежащие ниже GIFK, обладают настолько длинной траекторией в горных породах, а следовательно и настолько малой скоростью, что ими мы можем пренебрегать. EF — след осевой плоскости плотины. CI — след такого, нормального к струям, сечения, площадь которого приблизительно равна площади упомянутого осевого сечения: $CI = \text{пл. } EF$.

Чтобы определить дебит потока, надо знать: 1) величину ω какого-либо поперечного, т. е. нормального к струям, сечения этого потока; 2) коэффициент φ пористости породы, т. е. отношение площади пор в каком-либо се-

чении породы к полной площади сечения, и, наконец, 3) среднюю скорость v движения воды для этого сечения. Тогда искомый дебит выразится так:

$$Q = \omega \varphi v (1)$$

Для определения дебита я выбираю сечение CI (фиг. 3) и считаю, что не только общая площадь CI равна площади EF, но что и площади, занятые в обоих этих сечениях любой из четырех выше установленных горных пород — приблизительно одинаковы.

Формулу (1) можно упростить чрез замену произведения φv одной величиной c , которую называют ¹⁾ кажущейся средней скоростью движения воды чрез данное сечение. Тогда

$$c = \varphi v (2)$$

$$Q = \omega c (3)$$

Имея в виду, что аллювий предположено перегородить непроницаемой диафрагмой, заделанной в скалистые породы, видим, что утечка из водохранилища будет происходить через три последние породы, указанные в обозначениях фиг. 2.

Обозначая сечения будущего потока в этих трех породах соответственно чрез ω_1 , ω_2 и ω_3 , а средние кажущиеся скорости чрез c_1 , c_2 и c_3 , я получу такую формулу дебита этого потока, вместо формулы (3):

$$Q = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2 + \omega_3 c_3 (4)$$

Найдем же сначала ω_1 , ω_2 , ω_3 и затем c_1 , c_2 , c_3 .

2. Определение поперечных сечений ω_1 , ω_2 , ω_3 изучаемого грунтового потока в различных горных породах.

Подсчет величин ω_1 , ω_2 , ω_3 мы условились выше сделать по сечению EF.

Прежде самого подсчета необходимо выяснить вопрос о верхней, нижней и боковых границах изучаемого потока. При этом надо помнить главное условие нашего расчета: мы должны дать значение Q , выше которого дебит не перейдет никогда.

Верхняя граница потока или, точнее, ее высший предел устанавливается легко: это будет горизонт воды водохранилища, т. е. горизонталь 117-й сажени.

Боковые границы потока, уходящего из водохранилища, зависят от той формы, которую примет здесь в будущем депрессионная поверхность: пойдет ли она по линиям ab и $a'b'$ (фиг. 2) или же по ac и $a'c'$. Во втором

¹⁾ И. Г. Рихерт. Подземные воды и, в частности, подземные воды Швеции. Перев. с немецк. К. Вишоватого. Киев. 1914 г. Стр. 22.

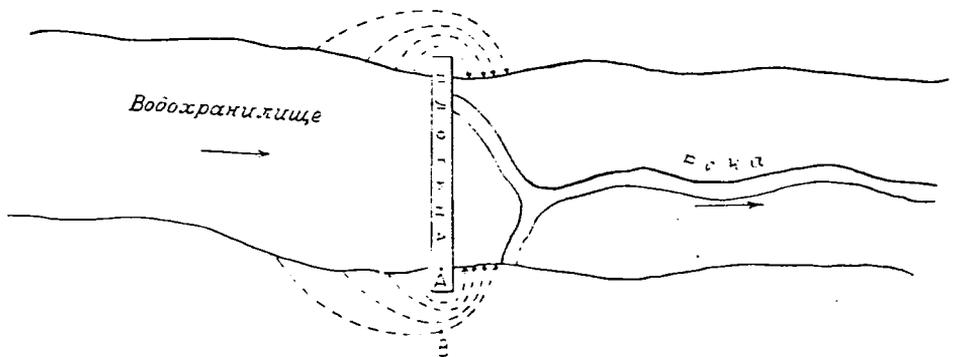
В примечании к статье К. Лембке (Движение грунтовых вод и теория водосборных сооружений, Журн. Мин. Пут. Сообщ. 1886. II, стр. 513) редакция предлагает для этого понятия термин „практическая скорость“.

Ch. S. Slichter [Подземные воды (The Motion of Underground Waters). Перев. А. Д. Стопневича. 1912. Стр. 25] называет эту величину „приток“ (flow) или „дебит“ (discharge). Этот термин можно было бы принять с прибавкой „единичный“, т. к. величина $c = \varphi v = \frac{Q}{\omega}$ есть дебит потока чрез единицу его нормального к струям сечения.

случае вода из водохранилища не может уходить за вертикальные поверхности, проведенные через a и a' . В первом же эти поверхности, ограничивающие с боков изучаемый поток, должно провести через точки b и b' , в которых начинается вновь повышение депрессионной поверхности, т. е. в которых уже происходит притекание воды как из водохранилища, так и с противоположных сторон.

Очевидно, для моих расчетов я должен брать этот последний случай, как увеличивающий поперечное сечение.

Где расположатся эти точки b и b_1 , а следовательно и как пройдут боковые границы потока, предвидеть невозможно. Но это затруднение не является сколько-нибудь важным по следующей причине. Боковые границы потока проходят в нетрещиноватых скалистых породах, весьма мало пропускающих воду, как это показали ниже описываемые опыты.



Фиг. 4. План, показывающий схематически ход струй, просачивающихся в бортах долины при существовании плотины и водохранилища.

Принимаю во внимание, что боковые струи идут в недрах бортов долины примерно так, как показано пунктиром на фиг. 4, представляющей схематически разрез по какой-либо горизонтали между 97-й и 117-й сажнями.

Принимаю также во внимание, что по закону Дарси¹⁾ количество воды, идущее через квадратную единицу поперечного сечения грунтового потока, пропорционально отношению потерянному напора к пройденному пути:

$$\frac{q}{\omega} = k_1 \frac{H}{L}.$$

И замечаю, что с удалением от концов плотины в недра гор быстро увеличивается путь струй, потерянный же напор остается почти постоянным, так как разница горизонтов воды в начале и в конце всех таких струй, т. е. разница горизонтов воды выше и ниже плотины, равна 20 сажням.

Из всего этого следует, что дебит равнопоперечных струй быстро падает с удалением в недра боковых гор долины.

Итак, малая проницаемость плотных скалистых пород и быстрое падение дебита боковых струй с удалением в бока долины дают право предвидеть, что

¹⁾ Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. 1856. Стр. 590 и след.

для подсчета утечки из водохранилища можно будет ограничиться установлением лишь порядка цифры утечки чрез бока долины и лишь приблизительным ее вычислением. И тем обойтись без точного знания боковых границ потока.

Относительно нижней границы потока следует сказать совершенно то же, что сказано о боковых границах, так как и здесь—те же самые весьма мало проницаемые породы и то же самое быстрое убывание дебита равнопоперечных струй при переходе от струй более близких к поверхности к струям глубже лежащим.

Обращаясь к разрезу, по которому я буду производить подсчет площадей (фиг. 2), замечу, что границы между различными породами в общем проведены на нем, как это делается обычно на геологических разрезах, по разведочным данным, доставленным нашей геологической съемкой поверхности и шурфами, скважинами и штольнями, выполненными под руководством А. Ф. Вайполина.

Но граница между трещиноватыми и нетрещиноватыми скалистыми породами проведена на основании опытов над фильтрацией, как это будет мною изложено (III. 5).

Теперь перехожу к подсчету площадей ω_1 , ω_2 и ω_3 формулы (4).

Сказанное о боковой и нижней границах будущего грунтового потока дает мне основание ограничить первоначально подсчет смоченной площади нетрещиноватых скалистых пород такими участками (фиг. 2): *slmiks* и *defghimld*. Первый представляет сечение средней горки, лежащее выше линии, соединяющей нижние точки проницаемых *en grand* пород. Второй представляет полосу нетрещиноватых пород на 10 сажен вглубь. Мне надо заботиться о том, чтобы я не ввел в подсчеты слишком малую площадь сечения. Поэтому против введения и того и другого участка возражений нет, ограничение же лишь 10-саженной глубиной, как я упоминал, взято мною для получения первоначальной цифры утечки чрез эти породы с целью убедиться, насколько ничтожна будет эта потеря по сравнению с потерями чрез другие породы. Если эта потеря окажется не ничтожной, то придется заняться более тщательным ее определением.

После всех этих замечаний подсчет площадей даю в следующей таблице.

ТАБЛИЦА II.

Смоченные площади различных горных пород в вертикальном сечении чрез ось плотины.

Название породы.	Контур смоченной площади.	Величина площади саж ² .	
		Полная.	После заложения диафрагмы.
Аллювий современной долины.	<i>por</i>	$\omega_0 = 528$	
Делювий северной седловины.	<i>arl'</i>	$\omega_1 = 108$	
Трещиноватые скалистые породы.	<i>adlsra</i>	$\omega_2 = \begin{cases} 350 \\ 1.000 \end{cases}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{на } 2\frac{1}{2} \text{ саж.} = 584 \\ \text{„ } 5 \text{ „} = 167 \\ \text{„ } 6 \text{ „} = 0 \end{array} \right.$
	<i>tkiha' opnf</i>		
Нетрещиноватые скалистые породы.	<i>slmiks</i>	$\omega_3 = 6.000$	
	<i>defghimld</i>		

3. Соображения, на которых основано определение верхнего предела кажущихся скоростей c_1 , c_2 , c_3 будущего грунтового потока.

Определить точно опытом среднюю кажущуюся скорость будущего грунтового потока—затруднительно или невозможно.

Но возможно найти опытом такую цифру, выше которой искомая кажущаяся скорость подняться не может. Выясню, как надо поставить такой опыт.

Для кажущейся скорости c в песчаных породах имеется несколько установленных опытом формул. Приведу наиболее известные из них.

1. Формула Darcy (1856) ¹⁾:

$$c = \frac{q}{s} = k \frac{h+e}{e}.$$

Здесь k — постоянный для данной породы коэффициент.

h — высота столба воды над песчаным слоем (в вертикальном фильтре).

e — толщина песчаного слоя.

2. Формула Allen Hazen (1892) ²⁾:

$$c = \varphi v = \varphi c d^2 \frac{h}{l} (0,70 + 0,03 t).$$

φ — коэффициент пористости породы, т.-е. среднее отношение площади пор в каком-либо сечении к площади всего сечения;

c — (в правой части)— постоянная для всех песчаных пород;

d — „действующая величина“ (effective size) зерен песка, т.-е. определенным образом вычисленный средний диаметр его зерен;

h — потеря напора при прохождении через фильтр;

l — мощность песчаного слоя;

t — температура по Цельсию.

3. Формула Ch. S. Slichter (1899) ³⁾

$$c = \frac{q}{s} = 11,3 \frac{p d^2}{h K} [1 + 0,0187 (t - 32)] \text{ куб. ф. в минуту.}$$

p — потерянный напор в футах водяного столба;

d — „действующая величина“ зерен песка;

h — длина фильтрующего столба в футах;

K — постоянная для данного фильтра величина, зависящая от пористости песка.

t — температура по Фаренгейту.

¹⁾ Darcy, l. c., p. 590.

²⁾ A. Debauxe et Ed. Imbeaux. Assainissement des villes. Distributions d'eau. 1905. T. I, p. 553.

³⁾ Ch. S. Slichter, l. c., стр. 18.

Из всех этих формул легко усмотреть, что опытом установлен такой вид формулы:

$$c = k_1 \frac{h}{J}, \dots \dots \dots (5)$$

где k_1 — коэффициент постоянный для данной породы, возрастающий при возрастании температуры;

$\frac{h}{J}$ — напорный градиент или потеря напора на единице пути.

К этому надо прибавить, что многочисленные лабораторные опыты (Seelheim, Wollny и Welitschkowsky, King и Newell) ¹⁾ подтвердили эту формулу лишь приблизительно.

King ²⁾ сделал сводку более чем 1.300 опытам, из которых более половины сделаны им самим, и которые позволяют проверить закон Darcy — Poiseuille, выраженный формулой (5). Оказалось, что отклонения от этого закона бывают весьма значительны.

Для прохождения воды чрез горные породы maximum отклонений достигал 86%, а для прохождения воздуха — даже 128%.

Отдавая себе отчет в степени точности формулы (5), я буду пользоваться ею с осторожностью, считая что качественно она безусловно справедлива, а количественно — лишь приблизительно справедлива.

Другими словами, из формулы (5) следует несомненно лишь то, что с увеличением напорного градиента при прочих равных условиях кажущаяся скорость увеличивается, и что приблизительно по этой формуле можно вычислить величину c .

Из этого следует, что, если я определяю в горной породе *in situ* при температуре выше средней годовой кажущуюся скорость фильтрации k_1 при напорном градиенте равном 1, а кроме того буду знать высший предел напорного градиента J для струй будущего потока в этой породе, то кажущаяся скорость потока в этой породе не перейдет за величину $c = k_1 J$. Так определенную величину c мы можем прямо подставлять в формулу (4), которую повторяю:

$$Q = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2 + \omega_3 c_3 \dots \dots (4)$$

Первое условие — температурное — было нами выполнено, так как мы производили наши опыты в конце августа, когда температура выше средней годовой ³⁾.

¹⁾ Debaux et Imbeaux, l. c., p.p. 371 — 374.

²⁾ F. H. King. Principles and conditions of the movements of ground water. XIXth annual report of the U. S. Geol. Surv. 1897 — 98. С этой работой, к сожалению, мне не пришлось ознакомиться подробнее.

³⁾ Чтобы дать понятие о степени влияния температуры, упомяну, что, если скорость при $t = 10^\circ$ принять за 1, то при $t = 38^\circ$ скорость равна 1,90 (По Slichter, l. c., стр. 19).

Разберем теперь, какие напорные градиенты будут существовать для различных частей будущего потока, а затем изложим способ, которым мы определяли кажущуюся скорость k_1 при напорном градиенте, равном 1.

Напорный градиент равен полному теряемому частицей воды напору, деленному на путь этой частицы. Максимальный напор, который могут терять частицы уходящей из водохранилища воды, равен 20 саженям. Потому что высший уровень водохранилища расположится на 117-й горизонтали, а низший выход воды в атмосферу будет приблизительно на уровне современной реки, т.-е. на 97-й горизонтали (фиг. 1).

Минимальный путь частицы воды определяется сразу тем соображением, что выходить из плотины эти частицы не могут выше 117-й горизонтали. Поэтому путь воды по какой угодно струе будет во всяком случае больше, чем расстояние между 117 горизонталями по направлению проекции той же струи.

Теперь нетрудно будет найти высший предел для напорного градиента каждого отдельного участка избранного поперечного сечения потока (фиг. 2).

На делювии северной седловины расстояние между ветвями 117-й горизонтали (фиг. 1) больше 40 сажен, поэтому напорный градиент всех струй в этой породе будет меньше $\frac{20}{40}$, т.-е. меньше 0,5.

То же рассуждение приложимо для северной части нетрещиноватых скалистых пород от северного конца сечения почти до шурфа № 4 (фиг. 1 и 2): кратчайшее расстояние между ветвями 117-й горизонтали здесь будет не меньше 40 сажен.

Но для части горки от шурфа № 4 по направлению к штольне № 26 это расстояние будет меньше 40 саж. Кроме этого для всех струй южной части сечения, т.-е. для струй, огибающих диафрагму, низший предел их длины мы не можем установить по расстоянию ветвей 117-й горизонтали. Если обратимся к фиг. 4, то для любой точки B сечения потока чрез ось плотины можем утверждать, что путь проходящей чрез нее частицы воды будет во всяком случае больше $2AB$. Поэтому для полукольца $hiufgh$ (фиг. 2) мы можем утверждать, что для любой его точки, удаленной от поверхности, считая по нормали, напр. на 10 саж., низший предел длины проходящей чрез нее струи равен 20 саж. Так определяемые низшие пределы достигнут 40 сажен только при удалении точки сечения от поверхности на 20 сажен.

По этим причинам я разбиваю площадь изучаемого сечения (фиг. 2) в нетрещиноватых скалистых породах на 2 части: одна — упомянутое полукольцо $hiufgh$ с площадью 2.000 саж.² и другая — все остальное $uksldefu$ с площадью 4.000 саж.². В первой низший предел длины струй меньше 40 саж.

В среднем этот низший предел здесь будет равен $\frac{2 \times 6 + 2 \times 16}{2} = 22$.

А потому высший предел напорного градиента для этой полосы будет равен $\frac{20 \text{ саж.}}{22 \text{ саж.}} = 0,9$. Или для простоты и запаса мы примем его равным 1.

В площади второй — $uksldefu$ — будет, собственно говоря, небольшой участок близ шурфа № 4, где низший предел длины струй, как сказано выше,

будет несколько меньше 40 саж. Но зато огромное большинство струй этой площади имеет низший предел значительно более 40 саж., доходящий даже до 70 саж., что ясно из того, что горизонталь 117-я между шурфами № 4 и № 3 сильно раздувается. Поэтому для площади uksldefu я принимаю низший предел длины струй равным 40 саж., а высший предел напорного градиента получаю равным $\frac{20}{40} = 0,5$.

Наконец, в трещиноватых скалистых породах возьмем также два участка: tkiha'opnt и adlsra.

Для первого применимы те же рассуждения, что и для полукольца hiufgh нетрещиноватых, с той разницей, что низший предел длины струй зависит здесь от глубины заложения диафрагмы. Поэтому получим:

Глубина заложения диафрагмы.	Низший предел длины струй:			Высший предел напорного градиента (среднее для сечения).
	от	до	средн.	
2 1/2 саж.	5	12	8 1/2	$\frac{20}{8,5} = 2,4$
5	10	12	11	$\frac{20}{11} = 1,8$

При заложении диафрагмы на 6 сажен эти породы в этом участке будут перегорожены полностью.

Для второго же участка трещиноватых скалистых пород adlsra применимы те же рассуждения, что для делювия северной седловины: расстояние между 117-ми горизонталями (фиг. 1) здесь будет более 40 саж., следовательно высший предел напорного градиента будет $\frac{20}{40} = 0,5$.

Сопоставляю все найденные высшие пределы напорных градиентов в следующей таблице.

ТАБЛИЦА III.

Высший предел напорных градиентов для различных участков вертикального сечения чрез ось плотины.

Горная порода.	Контур участка по фиг. 2.	Глубина заделки диафрагмы.	Площадь поперечного сечения саж. ² по табл. II.	Высший предел напорного градиента.
Делювий северной седловины.	arl'		108	0,5
Трещиноватые скалистые породы.	adlsra	{ 2 1/2 саж. 5 " " 6 " "	350	0,5
	tkiha'opnt		167	2,4
			0	1,8
Нетрещиноватые скалистые породы.	uksldefu		4.000	0,5
	hiufgh		2.000	1,0

Покончив с высшим пределом напорных градиентов, перехожу к описанию способа определения верхнего предела кажущихся скоростей при напорном градиенте, равном 1. Здесь я дам лишь общее описание своего способа, выделив приемы практического выполнения и полученные результаты в следующую главу.

Если мы выьем в данной породе шурф, не доходящий до уровня грунтовых вод, если мы сделаем непроницаемыми его стенки на небольшую от дна высоту (0,05 — 0,10 саж.), если мы будем вливать в него воду и поддерживать ее уровень на небольшой высоте над дном (меньше 0,05 — 0,10 саж.), — то частное от деления количества всей уходящей из шурфа воды на площадь дна и даст нам искомый верхний предел кажущейся скорости для данной породы при напорном градиенте равном единице.

Сделаю еще замечания. Для применимости метода важно, чтобы измерение количества уходящей воды было произведено тогда, когда просочившаяся в породу вода не дошла до уровня грунтовой воды. Иначе образуется подпор, который может уменьшить напорный градиент.

Очень важно иметь в виду при этом методе заиливание пор породы, сильно уменьшающее количество уходящей из шурфа воды. Подробнее об этом будет сказано в части VI этой работы.

Капиллярные силы сухой породы будут увеличивать измеряемую нами по этому методу кажущуюся скорость; для стоящих пред нами практических задач такое увеличение не вредно, как упоминалось выше.

Из тех же соображений мы имели возможность не бетонировать стенок шурфа: измеряемая кажущаяся скорость от этого также увеличивалась.

4. Приемы определения верхнего предела кажущихся скоростей при напорном градиенте, равном 1.

Определение было произведено нами в пяти местах (фиг. 1 и 2): шурф № 3, шурф № 3', шурф № 4, штольня № 26 и штольня № 13.

Первые четыре пункта лежат приблизительно на оси плотины, последний — на южном склоне средней скалистой горки.

Работа распределялась так. Техническая часть, — т.-е. проходка шурфов и штолен, доставка к ним воды насосом или вьючным способом на лошадях и быках, — была организована буровой партией. Самые же опыты с фильтрацией были выполнены мною и студ. Петроградского Университета П. В. Кумпаном, исключая опыты в шурфе № 4, где их исполнил А. Ф. Вайполин (см. Добавление).

Практические приемы, примененные мною и П. В. Кумпаном, полностью содержатся в следующей выработанной нами инструкции.

ИНСТРУКЦИЯ

для определения верхнего предела кажущихся скоростей фильтрации воды при напорном градиенте, равном 1, в горных породах *in situ*.

I. Подготовительные работы.

1. Выбить в испытуемой породе шурф произвольного сечения. И основательно вычистить дно его от пыли навала.

2. Дно шурфа не должно доходить до грунтовых вод по крайней мере на 0,5 саж., а лучше — еще значительнее.

3. Организовать непрерывную доставку воды к шурфу в возможно большем количестве, например в количестве 0,01 куб. саж. в 15 минут (наши опыты).

4. Поместить на поверхности земли близ шурфа 2 или 3 сосуда известной, и лучше одной и той же, емкости (напр. в 0,01 куб. саж.).

5. Наладить возможно более быстрый спуск воды из этих мерных сосудов в шурф или посредством сифона, или простым вливанием чрез воронку по трубе. Труба, как в случае сифона, так и в случае вливания чрез воронку, должна быть проведена почти к дну шурфа и устроена так, чтобы струя воды не поднимала мути нисколько.

6. Установить прочно в шурфе по отвесу рейку с делениями в сотых сажени.

7. Устроить в шурфе удобное место для наблюдателя так, чтобы последнему были отчетливо видны деления рейки.

8. В случае вливания воды сифоном необходимо на нижнем конце трубы (в шурфе) иметь кран.

II. Измерение продолжительности вливания.

9. Пускают полным ходом доставку воды к шурфу и наливание в шурф.

10. При этом предварительном влиании наблюдатель устанавливает, может ли он при имеющихся в его распоряжении способах доставки воды непрерывно держать ее уровень в шурфе на 0,03 — 0,05 саж. выше дна.

11. Если может, — надо приступать к измерениям. Если нет, — надо уменьшить фильтрующую площадь дна, забетонировав часть его или углубивши зумпф с меньшим поперечным сечением, чем у самого шурфа.

12. Это предварительное вливание должно продолжаться возможно меньше времени и должно быть возможно менее бурным, чтобы избежать заиливания дна или даже обвалов стенок.

13. Приступая к измерениям, наблюдатель располагается с часами и записной книжкой против рейки в шурфе, а его помощник — вверху близ упомянутых мерных сосудов (пункт 4).

14. Регулирование вливания производится наблюдателем или посредством крана на конце вливательной трубы, или посредством знака помощнику к вливанию или к прекращению такового.

15. Избрав определенное деление рейки, на котором будет поддерживаться уровень воды во время опыта, например 3 сотых сажени, считая от дна,—наблюдатель поднимает воду несколько выше этого деления (на одну-две сотки), опоражнивает вливательные трубы и выжидает, пока вода не опустится до избранного деления. В этот момент он начинает вливание из полного, не начатого мерного сосуда, замечая момент по часам с точностью до $\frac{1}{2}$ минуты. Упомянутое поднятие уровня на одну-две сотки необходимо для того, чтобы дать время помощнику подготовиться к непрерывному вливанию, например, чтобы наполнить наново водой из промеряемого сосуда сифонную трубу ¹⁾.

16. После начала наблюдатель должен непрерывно поддерживать уровень на избранном делении рейки, регулируя вливание. Это постоянство уровня необходимо для того, чтобы, определив продолжительность вливания одного мерного сосуда, можно было проверить полученную цифру повторением той же операции со вторым и третьим сосудом.

17. Если случится по тем или другим причинам, что уровень станет понижаться и упадет на небольшую величину (полсотки или четверть сотки), и если при этом время пониженного уровня будет невелико ($\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{4}$ всего времени истечения промеряемого сосуда), то надо возможно скорее для приблизительного выправления результатов поднять уровень на такую же величину и продержать его повышенным такое же приблизительно время, какое он был пониженным. При большом или продолжительном понижении уровня опыт лучше начать сначала.

При обнажении дна — опыт безусловно испорчен.

18. Когда вода из первого мерного сосуда будет вся вылита в трубу, помощник извещает об этом наблюдателя и не льет воды из нового сосуда.

19. После этого наблюдатель, следя за постоянством уровня, спускает из труб постепенно всю воду и замечает по часам момент окончания этого спуска.

20. Зная моменты начала и конца выливания первого сосуда, получают продолжительность выливания.

21. Для проверки спускают совершенно так же второй и третий сосуд. Продолжительность истечения всех их не должна отличаться более чем на 5% — 10% (в наших опытах отклонения были 4% — 7%). Резкие скачки указывают на неправильности в опыте (заиливание, неравные сосуды, просачивание пролитой наверху воды помимо труб, образование чем-либо подпора инфильтруемой воде и проч.).

¹⁾ Если желательно получить величину для k_1 , стоящую как можно ближе к действительному значению этой величины при напорном градиенте, равном 1, то надо держать уровень как можно ближе к дну, например на 0,005 или 0,010 сажени. Такой запас все же необходим, чтобы избежать случайных обнажений дна при опыте, которые портят все наблюдение.

22. Записи в книжке ведутся, например, по такой форме:

Дата.	№ вливаемого сосуда.	Начало и конец вливания.	Продолжительность вливания.	Высота уровня над дном шурфа.	Примечания.
22/IX	1	Н. 2 ^h 31' К. 2 ^h 48'	} 17'	0,03 саж.	Уровень колебался на 0,005 с.

III. Измерение фильтрующей площади дна.

23. Это измерение сводится к измерению площади наибольшего горизонтального поперечного сечения шурфа или зумпфа между дном и уровнем воды. Его лучше делать перед опытом. Оно может быть произведено рулеткой, складным метром, короткой рейкой и не представляет никаких трудностей.

IV. Вычисление.

24. Обозначим:

объем мерного сосуда — A куб. саж.
продолжительность его выливания — M минут,
площадь фильтрующую дна — Q кв. саж.

25. Тогда искомым верхний предел кажущейся скорости фильтрации в испытуемой породе при напорном градиенте, равном 1, выразится формулой:

$$k_1 = \frac{A}{M \cdot Q} \text{ куб. саж. чрез одну кв. саж. в одну минуту.}$$

27. Величина k_1 выражается для различных пород, с которыми мы экспериментировали, круглыми цифрами

от 0,00002 до 0,01400 саж. в минуту.

V. Дополнительные указания.

28. Заиливание дна совершенно искажает опыт и делает его результаты совершенно негодными для поставленной в этой инструкции цели. Поэтому заиливания следует избегать весьма тщательно, сокращая по возможности предварительное вливание, не применяя мутной воды, и в особенности не давая струе размывать дно или стенки шурфа и тем мутить фильтруемую воду.

29. Для большей уверенности опыт можно повторить при вычищенном заново или даже несколько углубленном шурфе.

5. Результаты опытов и подсчет утечки.

По этой инструкции нами были произведены наблюдения в 4 пунктах из перечисленных выше пяти. В пятом пункте, в шурфе № 4, наблюдения велись А. Ф. Вайполиным несколько иначе.

Результаты всех этих наблюдений сведены в следующей таблице.

ТАБЛИЦА IV.

Данные опытов по определению верхних пределов кажущихся скоростей фильтрации при напорном градиенте, равном 1, в горных породах in situ.

Выработка.	Горная порода.	Приблизительная глубина шурфа или длина штольни.	Приблизительная отметка уровня воды при опыте.	Средняя высота столба воды над дном шурфа.	Фильтрующая площадь дна шурфа Ω .	Вся уходящая из шурфа в одну минуту вода $\frac{A}{M}$	Верхний предел кажущейся скорости фильтрации при напорном градиенте, равном 1, $k_1 = \frac{A}{M \cdot \Omega}$ ¹⁾
Шурф № 3.	Делювий: обломки в глинисто-обломочном материале.	5,7 с.	113,5с.	0,05 с.	0,08 с ²	$\frac{0,009 \text{ с}^3}{30,5'}$	$0,00367 \frac{\text{с}^3}{\text{с}^2 \times \text{мин.}}$
Шурф № 3'.	Трещиноватые порфиновые снениты.	13,2 „	105,8	0,04	0,16	$\frac{0,009}{47}$	0,00120
Штольня № 13.	„	9,0 „	101,0	0,01	0,08	$\frac{0,009}{8,5}$	0,01324
Штольня № 26.	„	8,5 „	108,5	0,07	0,31	$\frac{0,009}{12}$	0,00242
Шурф № 4.	Плотные порфиновые снениты.	7,8 „	112,7	—	—	—	0,00003

¹⁾ Для сравнения укажу, что по Slichter (l. c., стр. 22) для песка с пористостью = 32% и при температуре 10° С. k_1 имеет такие значения:

Действующая величина зерен (средний диаметр) мм. 0,01 0,45 5,00

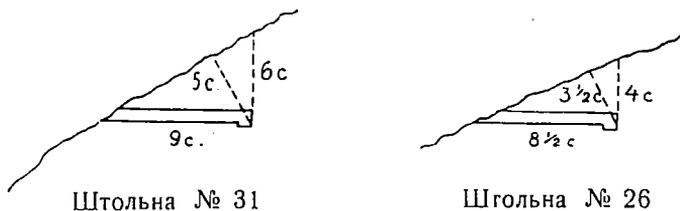
k_1 $\left. \begin{array}{l} \phi^3/\phi^2 \times \text{мин.} \\ \text{с}^3/\text{с}^2 \times \text{мин.} \end{array} \right\} \begin{array}{lll} 0,000036 & 0,07300 & 9,012 \text{ фут. в } 1' \\ 0,000005 & 0,01043 & 1,288 \text{ саж. в } 1' \end{array}$

Из этой таблицы видно, что определение k_1 было нами произведено во всех трех горных породах.

При этом в первой и последней породах, как более или менее однородных в смысле проницаемости, мы сделали по одному определению.

В породе же второй, весьма неоднородной вследствие разнообразных трещин,—нами сделаны 3 определения. Три найденные величины k_1 резко отличаются друг от друга, отношение их равно приблизительно: 1:2:11.

Если сделать разрез по штольням (фиг. 5), то выяснится, что в штольне № 13 пункт определения величины k_1 отстоял от поверхности по нормали на 5 сажен, а в штольне № 26 — на $3\frac{1}{2}$ сажени.



Фиг. 5. Вертикальные разрезы по штольням, где производились опыты фильтрации.

В шурфе же № 3' соответствующий пункт находился от поверхности коренной породы не более как на $\frac{1}{2}$ — 1 саж. (см. фиг. 2).

Сопоставляя для порфировых сненитов расстояние от поверхности скал с величиной k_1 , получаю такую табличку:

№ выработки:	Расстояние зумпфа от поверхности.	Верхний предел кажущейся скорости при напорном градиенте = 1.
№ 3'	1 саж.	$0,00120 \text{ c}^3 / \text{c}^2 \times 1'$
№ 26	$3\frac{1}{2}$	0,00242
№ 13	5	0,01324
№ 4	$7\frac{1}{2}$	0,00003

Из нее видно, что для исследованных первых трех пунктов, чем дальше в глубь горки от поверхности, тем больше фильтрующая способность этой породы.

Однако, уже шурф № 4, заложенный собственно в тех же самых (петрографически). породах, лишь ушедший в них глубже, показывает резкое падение величины k_1 .

Основываясь на этих данных, я принял выше (III. 2), что граница между трещиноватыми, проницаемыми en grand коренными породами и плотными, мало-проницаемыми проходит в среднем на расстоянии 6 сажен от поверхности.

Увеличение k_1 с углублением для первых трех пунктов можно себе объяснить или случайностями неоднородной трещиноватости, или же заиливанием верхних слоев породы посредством атмосферных вод. Очень значительное влияние заиливания на фильтрацию было нами изучено в шурфе № 3 (часть VI этой статьи).

Понятно, что при необходимости знать точные цифры кажущихся скоростей k_1 было бы необходимо произвести опыты еще в нескольких пунктах для каждой из трех пород. Чем больше было бы сделано таких наблюдений, тем ближе был бы средний результат их к действительному среднему значению искомой величины.

В качестве первого приближения я считаю все же возможным основаться на полученных немногочисленных цифрах и по таблицам III и IV вычислить приблизительно верхний предел утечки из будущего водохранилища.

ТАБЛИЦА V.

Верхний предел ожидаемой утечки из водохранилища.

$$Q = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2 + \omega_3 c_3 \quad \text{или} \\ Q = \Sigma \omega c = \Sigma \omega k_1 J$$

Горная порода.	Глубина заделки диафрагмы.	Площадь поперечного сечения породы. По табл. II = ω саж. ² .	Верхний предел напорного градиента. По табл. III = J .	Верхний предел кажущ. скорости при напорном градиенте = 1. По табл. IV $k_1 \frac{c^3}{c^2 \times 1'}$	Верхний предел утечки:		
					саж. ³ мин.	саж. ³ сек.	В процентах дебита реки Чу (4 с ³ /1%)
					$Q = \omega k_1 J$		
Делювий северной седловины.		108	0,5	0,00367	0,198	0,0033	0,08 %
Трещиноватые скалистые породы ¹⁾ .	2 1/2 с. (5 с.) (6 с.)	350	0,5	0,00120	0,210	0,0035	0,09 %
		584 (167) (0)	2,4 (1,8)	— 0,01324	18,558 (3,980)	0,3093 (0,0664)	7,73 % (1,66 %)
Нетрещиноватые скалистые породы.	}	4,000	0,5	} 0,00003	0,060	0,001	0,03 %
		2,000	1,0		0,060	0,001	0,03 %
Сумма.	2 1/2 с. (5 с.) (6 с.)					0,3181 (0,0752) (0,0088)	7,96 (1,88) (0,22)

¹⁾ Трещиноватые породы суть породы, пронизаемые en grand. Скорость движения воды в них подчиняется закону $\frac{v^2}{2g} = k' i$, откуда $v = k'' \sqrt{i}$ (ср. напр. Краснопольский, л. с., стр. 160 — 161), а следовательно $Q = \omega k_1 \sqrt{J}$.

Я не вводил этой поправки. Она уменьшила бы утечку, а между тем принадлежность этих пород к пронизаемым en grand лишь весьма вероятно, но не доказана.

Теперь я могу упомянуть о следующем. Если посмотреть в табл. V на утечку через нетрещиноватые порфиоровые сиениты, то легко увидеть, что она ничтожна по отношению ко всей утечке, по крайней мере для первых двух глубин заделки диафрагмы. Для 6-саженной же заделки вообще вся величина утечки становится настолько мала, что, пожалуй, теряет практическое значение.

Припомню, что выше (III. 2), при вычислении площади поперечного сечения плотных скалистых пород, я решил, для первоначального подсчета, взять ширину полосы defghimld (фиг. 2) в 10 сажен. Утечку по струям, идущим глубже, я решил временно не принимать во внимание. При этом я условился, что, если утечка через эту породу будет ничтожна, — оставить подсчет без изменений; если же утечка будет более или менее значительна по сравнению с общей суммой утечки, — то подсчет исправить.

Теперь ясно, что подсчет исправления в этом отношении не требует.

6. Практические выводы.

Таблица V, полученная на основании данных опыта и их обработки, дает возможность ответить на ряд практических вопросов.

Прежде чем перейти к некоторым из этих вопросов-ответов, я подчеркну еще раз, что на таблицу V следует смотреть лишь как на первое приближение к фактам, в виду того, что опыты наши над фильтрацией были немногочисленны.

Мы могли истратить на эти опыты всего лишь 1 месяц вследствие наличности у нас других задач, взявших у нас остальную часть лета.

В этих работах по фильтрации мы занимались не только опытами по определению утечки; результаты которых сведены в таблице V, но и другими опытами: определением действительной скорости фильтрации (часть IV), определением подземного дебита р. Чу (часть V), наблюдениями над заиливанием пород (часть VI).

Однако, несмотря на немногочисленность наших опытов по определению утечки и несмотря на происходящую отсюда ясно сознаваемую мною сравнительно малую точность цифр таблицы V — мы все же увидим сейчас, что практические выводы, какие дает эта таблица, настолько важны, что строители должны с ними считаться.

Как в наших опытах, так и в нижеследующих выводах я предполагал окончательно решенным, что при постройке плотины долина современного русла реки, т.-е. участок ta' (фиг. 2), и лежащий в ней аллювий перегороджены непроницаемой диафрагмой, заделанной краем своим в скалистые породы.

Теперь излагаю выводы.

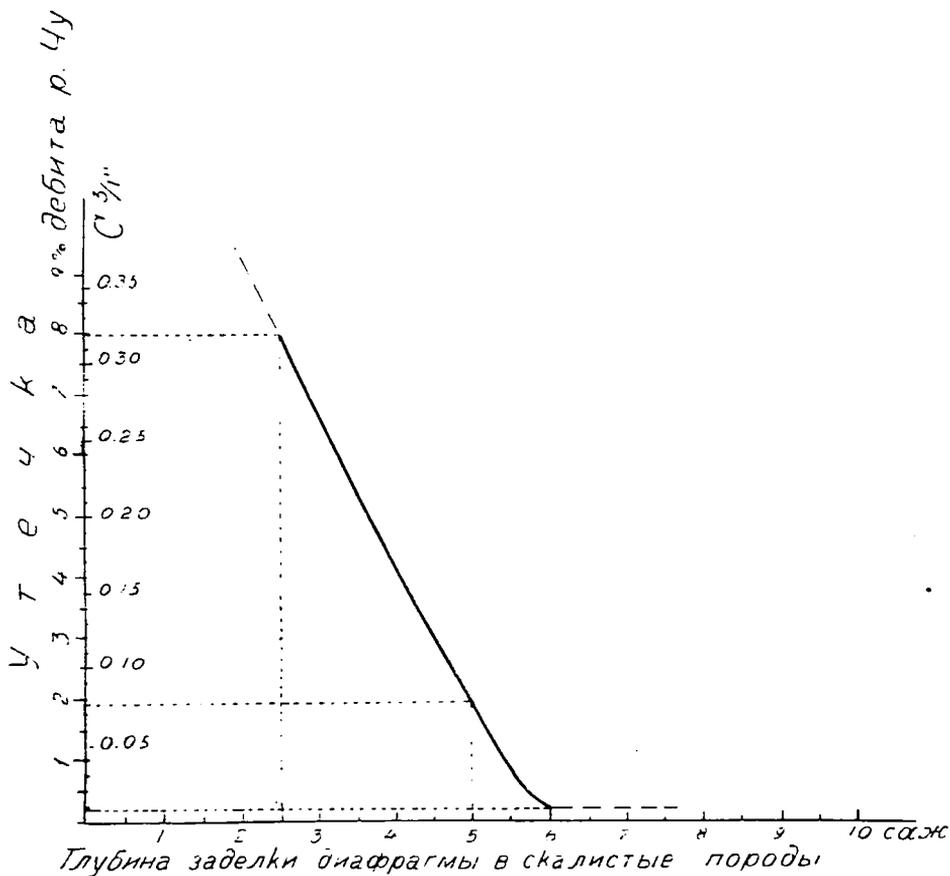
1. Утечка из водохранилища при отсутствии непроницаемой диафрагмы в северной седловине будет выражаться следующими цифрами:

Глубина заделки в скалу диафрагмы, перегораживающей русло.	У т е ч к а	
	саж. ³ /1" в 0/0 дебита р. Чу =	4 саж. ³ /1"
2½ саж.	0,3181	8,0%
5 "	0,0752	1,9%
6 "	0,0088	0,2%

Выражая тот же результат графически, получу фиг. 6.

По этим цифрам максимальной утечки строители могут решить, должна ли приниматься ими во внимание эта утечка при расчетах деталей сооружений или будущей жизни водохранилища. Если должна, то из таблицы или графика они могут взять приблизительную цифру утечки для своих расчетов.

2. Глубина заделки непроницаемой диафрагмы в скалу определяется помимо иных соображений еще и тем, что с этой глубиной тесно связана величина утечки. Связь эта выражена графиком фиг. 6. Так как величина утечки не может быть безразлична для строителей, то глубину заделки диафрагмы они должны сообразовать с результатами обсуждаемых здесь опытов по фильтрации.



Фиг. 6. Вероятная зависимость будущей утечки из водохранилища от глубины заделки непроницаемой диафрагмы.

3. Утечка чрез плотные скалистые породы горки, находящейся среди долины, составляет ничтожную долю общей утечки. Эти породы можно считать практически непроницаемыми.

Такой вывод из таблицы V позволяет мне заключить, что первоначально существовавшие опасения о будущей огромной утечке сквозь эту сильно трещиноватую с поверхности горку — являются напрасными.

Поэтому возникавший у строителей вопрос о бетонировании всей обращенной к водохранилищу поверхности этой горки—теперь отпадает ¹⁾.

4. Максимальная утечка через северную седловину составляет по таблице V $0,08 + 0,09 = 0,17\%$ дебита р. Чу. Эта величина так невелика, что предположенное строителями устройство в этой седловине особой непроницаемой диафрагмы, перегораживающей лежащий здесь делювий, представляется излишним, если причиной этого устройства считать опасение большого просачивания в этом участке.

Если оставить неприкосновенным в качестве тела плотины лежащий здесь делювий, то на уровне зеркала водохранилища, т.-е. на 117-й горизонтали, плотина будет иметь не менее 40 сажен в поперечнике, на 116-й— более 70 сажен, на 115-й— более 90 сажен (фиг. 1), и тело ее будет состоять из глинисто-щебневого материала, уложенного медленным природным процессом.

Если с точки зрения утечки непроницаемая диафрагма в северной части плотины является ненужной, то этот вопрос следует, однако, в данном частном случае обсудить еще с точки зрения сейсмостойкости сооружения.

Хотя это и не связано тесно с предметом настоящей статьи, но я позволю себе здесь краткое отступление.

Сопряжение столь разнородных механически тел, как диафрагма и окружающие ее рыхлые массы,—относится к сейсмически неустойчивым. Это соображение говорит не только за ненужность диафрагмы, но даже за прямой вред ее.

Но есть другое важное обстоятельство. При отсутствии диафрагмы вода будет удерживаться здесь рыхлыми массами, пропитанными ею и лежащими на наклонном скалистом основании. При землетрясениях в этих условиях легко происходят оползни.

Если оползень произошел бы, то в случае присутствия диафрагмы, заданной прочно в скалу, шансы прорыва вод будут все же меньше, чем в случае ее отсутствия.

Поэтому требование наибольшей сейсмостойкости сооружения заставляет в данном случае все же высказываться за устройство этой добавочной диафрагмы.

IV. Действительные скорости фильтрации.

1. Предварительные замечания.

Практическая цель определения этих скоростей заключалась в доказательстве того, что уходящий сквозь плотину грунтовой поток не будет достаточно быстрым, чтобы промыть плотину в каком-либо месте.

Зная, что рыхлые породы тела плотины (в северной седловине) имеют горизонтальное протяжение не менее 40 сажен, и что остальная часть плотины

¹⁾ Для полной уверенности следовало бы поставить еще несколько определений в плотных скалистых породах, в особенности для того, чтобы убедиться в отсутствии здесь крупных сквозных трещин.

сложена скалистыми, хотя и сильно трещиноватыми, породами, — можно было с уверенностью сказать а priori, что опасения внутреннего размывания плотины не имеют оснований.

Вместе с этим и определение действительных скоростей фильтрации приобрело лишь почти чисто академический интерес.

В этом главная причина неполноты наших опытов в этом направлении.

Первоначально я предполагал поставить опыты с флюоресцентом. Но ни приборы, ни самый флюоресцент мне не удалось получить своевременно.

Мы пытались заменить флюоресцент нефтью, которая имела у нас под руками ¹⁾; но эта попытка кончилась неудачей. Нефть не была уловлена там и тогда, где и когда ее можно было ждать. Повидимому, горные породы обладают способностью ее задерживать.

После этого нам оставалось определять действительные скорости просачивания непосредственно водою, без индикаторов.

Мы ограничились постановкой опытов лишь в одной породе — делювии северной седловины.

2. Действительные скорости фильтрации в делювии северной седловины.

Фиг. 7 представляет вертикальный разрез через шурфы 3", 3 и 3'.

Шурфы № 3 и № 3" остановлены в делювии. Шурф № 3' доведен до верхнего слоя порфиристого сиенита и в нем остановлен. В шурфах № 3 и № 3' определялись верхние пределы коэффициентов проницаемости, т.-е. кажущихся скоростей фильтрации при напорном градиенте равном 1 (см. часть III). Вливание воды при этом в шурф № 3 было начато 20-го августа и не прерывалось 17 суток. За это время было влито 842 бака, вместимостью 0,009 саж.³ каждый, т.-е. всего было влито 7,578 с³.

Предполагалось вначале, что при наших опытах по определению коэффициента проводимости нам удастся уловить момент появления воды в шурфе № 3' и отсюда получить данные для суждения о действительных скоростях фильтрации в исследуемой породе. Однако, тщательное обследование стенок шурфа № 3' примерно на 20-й день от начала вливания показало, что вода из шурфа № 3 сюда все еще не прошла.

Можно было сделать несколько объяснений такому отсутствию воды.

Во-первых, действительная скорость движения могла оказаться слишком малой, чтобы за 20 дней вода дошла до шурфа № 3'.

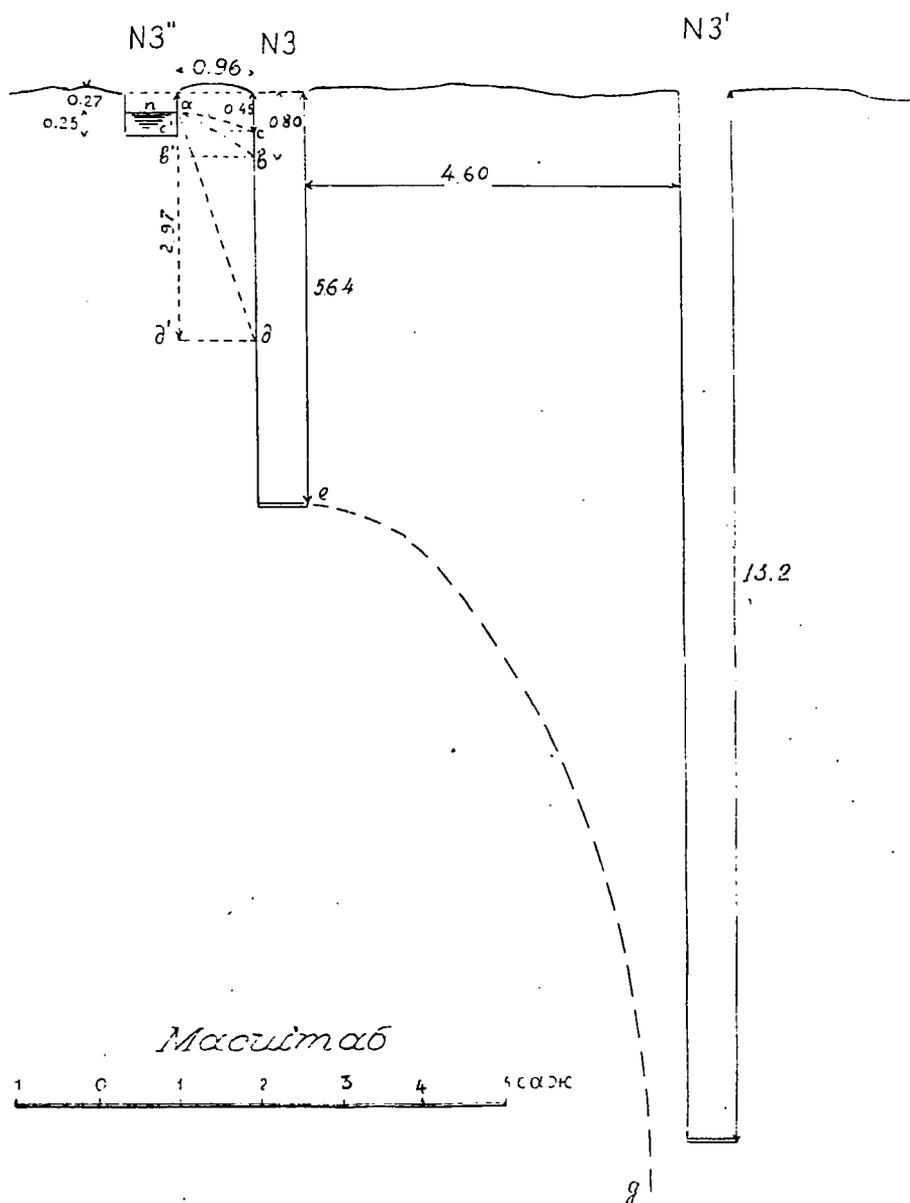
Во-вторых, ток воды мог миновать шурф № 3', ограничившись кривой *eg* (фиг. 7).

В-третьих, влитой воды могло не хватить для насыщения капиллярной (абсолютной) влагоемкости породы, лежащей на пути воды.

¹⁾ Debauxe et Imbeaux (I. с. Т. II, p. 234) упоминают о применении керосина для этих целей.

К. Кейльгак (Подземные воды и источники. Перев. под ред. П. В. Отоцкого. 1914, стр. 471) среди других сильно пахнущих веществ упоминает также керосин (в оригинале — Petroleum, у переводчика — нефть).

Таким образом, вопрос о действительной скорости остался неопределенным. Чтобы его решить, пришлось поставить особый опыт.



Фиг. 7. Вертикальный разрез через шурфы, в которых производились опыты с фильтрацией.

В расстоянии 0,96 саж. от шурфа № 3 был сделан неглубокий шурф № 3" (фиг. 7). В него 6-го сентября, в 12 часов дня, была пушена вода, и это вливание продолжалось 7-го, 8-го, 9-го и 10-го сентября до 1 часу дня, т.-е. в течение 97 часов. Однако, в ночь с 8-го на 9-е и с 9-го на 10-е вливание приостанавливалось каждый раз приблизительно на 10 часов.

9-го сентября, около 12 часов дня, т.-е. через 72 часа от начала вливания, появились первые мокрые пятна на стенке шурфа № 3 в точке *b* (фиг. 7). После того пятна стали расползаться вверх и вниз от этой точки, вверх медленнее, вниз быстрее. И 12-го сентября, в 10 часов утра, т.-е. через 142 часа, границы мокрых пятен достигли точек *c* и *d*.

Таков произведенный нами опыт. При своих выводах из полученных данных я должен помнить поставленную себе цель: мне надо определить максимальную действительную скорость движения воды сквозь исследуемую породу при существовании водохранилища, точнее — предел, выше которого действительная скорость подняться никак не может.

На основании нашего опыта можно вычислить средние скорости, с которыми двигалась вода для трех направлений: *ac*, *ab*, *ad*. Эти скорости будут соответственно:

Направление.	Действительная скорость.
<i>ac</i>	$\frac{1,0}{142} = 0,007$ саж. / час.
<i>ab</i>	$\frac{1,1}{72} = 0,015$ саж. / час.
<i>ad</i>	$\frac{2,9}{142} = 0,020$ саж. / час.

Чтобы сделать на основании этих цифр правильные заключения и чтобы быть уверенным, что все существенное не ускользает при этом от моего внимания, я должен суметь вывести, хотя бы грубо, по одной из этих цифр две остальные или хотя бы указать направление и приблизительную величину их уклонения от первой.

Во-первых, надо заметить, что для одного и того же нормального к струям („поперечного“) сечения потока скорости течения пропорциональны напорным градиентам ¹⁾:

$$v_2 : v_1 = \frac{h_2}{l_2} : \frac{h_1}{l_1} \dots \dots \dots (6)$$

Во-вторых, если от одного поперечного сечения я вдоль какой-нибудь струи перейду к другому, то скорости во взятых точках этой струи будут обратно-пропорциональны площадям сечений или квадратам радиусов этих сечений, которые в первом приближении можно принимать за шаровые поверхности с центром в точке *n* (фиг. 7):

$$v_3 : v_2 = r_2^2 : r_3^2 \dots \dots \dots (7)$$

В-третьих, так как скорость убывает с удалением воды от шурфа, то ясно, что своими тремя цифрами мы определили собственно средние скорости на путях *ac*, *ab* и *ad*.

¹⁾ См. III. 3.

Средняя скорость, напр., на участке ac , выразится, как легко сообразить, такой формулой:

$$V_{cp.} = \frac{\int_{r_a}^{r_c} v_r dr}{r_c - r_a}.$$

Выкладка:

$$\begin{aligned} \frac{\int_{r_a}^{r_c} v_r dr}{r_c - r_a} &= \frac{1}{r_c - r_a} \int_{r_a}^{r_c} v_a \frac{r_a^2}{r^2} dr = \frac{v_a r_a^2}{r_c - r_a} \int_{r_a}^{r_c} \frac{dr}{r^2} = \frac{v_a r_a^2}{r_c - r_a} \left| \frac{1}{r} \right|_{r_a}^{r_c} = \\ &= \frac{v_a r_a^2}{r_c - r_a} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_c} \right) = \frac{v_a r_a^2}{r_c - r_a} \frac{r_c - r_a}{r_a r_c} = \frac{v_a r_a}{r_c}. \end{aligned}$$

Итак, для ac

$$V_{cp.} = \frac{v_a r_a}{r_c} \dots \dots \dots (8)$$

Пользуясь этими тремя замечаниями, я могу теперь определить зависимость между двумя какими угодно средними скоростями, наблюдаемыми посредством описанного выше опыта.

Обозначу среднее расстояние от точки n до смоченной поверхности шурфа № 3" через r_o , скорости у этой поверхности для направлений nc , nb , nd соответственно чрез $V_{o,nc}$, $V_{o,nb}$, $V_{o,nd}$ и затем средние скорости для тех же направлений чрез V_{nc} , V_{nb} , V_{nd} .

Тогда на основании последнего равенства (8) получу:

$$V_{nc} = \frac{r_o}{r_c} V_{o,nc}, \text{ и отсюда}$$

$$V_{o,nc} = \frac{r_c}{r_o} V_{nc} \dots \dots \dots (9)$$

Далее, для поверхности шурфа № 3", как нормальной к струям, имею по формуле (6) ¹⁾:

$$\frac{V_{o,nc}}{V_{o,nb}} = \frac{\frac{ac'}{ac}}{\frac{ab'}{ab}},$$

откуда

$$V_{o,nb} = \frac{ab'}{ac'} V_{o,nc} \dots \dots \dots (10)$$

¹⁾ Здесь мы допускаем некоторую неточность, так как линии ac , ab , ad не прямые, а несколько выпуклые кверху.

Из (9) и (10) получаю:

$$V_{o, nb}^* = \frac{\frac{ab'}{ab}}{\frac{ac'}{ac}} \cdot \frac{r_c}{r_o} V_{nc}^*$$

Далее, переходя по струе nb от скорости у поверхности шурфа № 3" к наблюдаемой мною средней скорости V_{nb}^* для этой струи, могу написать по формуле (8):

$$V_{nb}^* = \frac{r_o}{r_b} V_{o, nb}^*$$

откуда

$$V_{nb}^* = \frac{r_c}{r_b} \cdot \frac{ab'}{ac'} \cdot \frac{ab}{ac} V_{nc}^* \dots \dots \dots (11)$$

Так же точно найду:

$$V_{nd}^* = \frac{r_c}{r_d} \cdot \frac{ad'}{ad} \cdot \frac{ad}{ac'} \cdot \frac{ad}{ac} V_{nc}^* \dots \dots \dots (12)$$

Подставляя числовые величины, полученные из опыта (фиг. 7), получу:

$$V_{nb}^* = \frac{1,3}{1,4} \cdot \frac{0,53}{1,1} \cdot \frac{1,0}{0,18} \cdot 0,007 = 0,017 \text{ саж. / час.}$$

$$V_{nd}^* = \frac{1,3}{3,1} \cdot \frac{2,70}{2,90} \cdot \frac{1,0}{0,18} \cdot 0,007 = 0,015 \text{ саж. / час.}$$

Сопоставляю наблюдаемые и вычисленные цифры средних скоростей:

	наблюдаемые	вычисленные
V_{nc}^*	0,007 саж. / час.	—
V_{nb}^*	0,015	0,017
V_{nd}^*	0,020	0,015

Цифры V_{nb}^* сходятся для первого приближения достаточно хорошо.

Наблюдаемая же величина 0,020 для V_{nd}^* оказывается слишком высокой. Причина этого становится сразу понятной, если принять во внимание, что вода достигла точки d в момент наблюдения не прямым просачиванием по nd , а просачиванием (стеканием) по bd . Это подтверждалось при опыте тем, что, выбирая кайлой близ точки d мокрую породу примерно на 0,1 — 0,05 саж., — мы находили далее сухую породу.

Из этого вывода видно, что значение полученных нами из опыта цифр понято мною в существенных чертах правильно.

Чтобы это еще более подтвердить, уясним себе тот точно установленный факт, что первоначально вода в шурфе № 3 появилась в точке b , положение которой было точно определено и указано теперь на фиг. 7. Для этого вычисляю время, необходимое для прохождения воды из шурфа № 3'' в шурф № 3 по какому-либо направлению и затем ищу при каком $\angle \alpha$ наклона взятого направления к горизонту найденная величина t будет иметь minimum . Полученный вычислением угол сверяю с углом abb' , найденным из опыта.

Согласно формуле (11), для средней скорости движения воды по любому направлению из шурфа, окруженного однородной породой, имею:

$$\frac{V_{nb} \cdot r_b}{\frac{ab'}{ab}} = \frac{V_{nc} \cdot r_c}{\frac{ac'}{ac}} = \text{const.},$$

или вообще:

$$v = K \cdot \frac{h}{r},$$

где K — постоянный для данной породы коэффициент,

h — напор, потерянный при движении по выбранной траектории, в данном случае от шурфа № 3'' до шурфа № 3,

l — длина этой траектории,

r — расстояние от конца этой траектории до центра поверхностей, нормальных к струям, в данном случае до точки n .

Имею далее:

$$l = vt, \quad t = \frac{l}{v}, \quad t = \frac{l^2 r}{Kh}.$$

Обозначаю горизонтальное расстояние между стенками шурфа чрез m , а расстояние na чрез r_0 . Тогда:

$$l = \frac{m}{cs\alpha}, \quad r = \frac{m + r_0}{cs\alpha}, \quad h = mtg\alpha.$$

Отсюда:

$$t = \frac{m^2(m + r_0)}{cs^3\alpha K m \frac{sn\alpha}{cs\alpha}} = \frac{m(m + r_0)}{K} \cdot \frac{1}{cs^2\alpha sn\alpha}.$$

При $\alpha = 0^\circ$ и при $\alpha = 90^\circ$ t обращается в ∞ , что можно было предвидеть, так как в первом случае напорный градиент равен нулю, а во втором — траектория бесконечно длинна. Значит, t должно иметь minimum между этими пределами $\angle \alpha$.

Определяю, при каком α этот minimum наступает.

$$\begin{aligned} \frac{dt}{d\alpha} &= -K_1 \frac{cs^3\alpha - 2sn^2\alpha cs\alpha}{sn^2\alpha cs^4\alpha} = -K_1 \frac{cs^2\alpha - 2sn^2\alpha}{sn^2\alpha cs^3\alpha} = \\ &= -K_1 \frac{1 - 3sn^2\alpha}{sn^2\alpha cs^3\alpha} \end{aligned}$$

Приравнивая производную нулю, получаю:

$$1 - 3sn^2\alpha = 0$$

$$sn\alpha = \pm \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\alpha = \pm 35^\circ.5$$

Знак (—) имел бы реальное значение; если бы мы по другую сторону шурфа № 3^а выбили новый улавливающий шурф, подобный шурфу № 3. Теперь же мы не должны обращать внимания на этот минус.

Итак, $35^\circ.5$ есть тот угол, под которым вода пройдет в шурф № 3 в кратчайший срок.

Из чертежа же 7 находим:

$$\angle abb' = 31^\circ.5.$$

Цифры достаточно близки для моих целей. Отступление опытной цифры в сторону уменьшения легко объяснить капиллярными силами породы.

Действительно, движение воды идет здесь (в сухой породе) не только под влиянием силы тяжести, как я принимал в выводе, но и под влиянием капиллярного всасывания, сила которого остается, приблизительно, постоянной для всех углов α ¹⁾. Поэтому капиллярные силы увеличат скорость на некоторую одну и ту же для всех направлений величину. Влияние этого увеличения на время прохождения воды до шурфа № 3 будет тем ощутительнее, чем меньше величина главной скорости, создаваемой тяжестью. То-есть для меньших углов α сокращение времени будет заметнее. Нетрудно понять и доказать, что поэтому первой должна дойти до шурфа № 3 струя, наклоненная под углом несколько меньшим, чем $35^{1/2}^\circ$. Это и оправдывается опытом.

Из всего этого ясно, что характер явления, а вместе с тем и значение найденных нашим опытом трех средних скоростей:

$$v_{ac} = 0,007 \text{ саж./час}, v_{ab} = 0,015 \text{ саж.}, v_{ad} = 0,020 \text{ саж.}$$

поняты нами правильно.

¹⁾ А. А. Краснополяский (Грунтовые и артезианские колодцы. 1912. Стр. 49—50) приводит данные Клепзе о скоростях капиллярного всасывания вверх.

Делаю выдержки из этих цифр:

Материал	Песчаная почва	Кварцевый песок	Каолин
Диаметр зерен мм	2,5 — 4,0 < 0,30	0,30 — 0,74	
Скорость всасывания мм/сутки	10 320	920	86
” саж/час	0,0002 0,006	0,018	0,002

Наша порода подходит по капиллярным свойствам из перечисленных в табличке ближе всего, вероятно, к „песчаной почве“.

По данным этого опыта постараюсь теперь составить себе представление о тех действительных скоростях фильтрации, которые будут в этой же породе при существовании водохранилища.

По формуле Dupuit ¹⁾, тесно связанной с законом Дарси ²⁾, скорость движения воды в породе связана с напорным градиентом формулой

$$i = \mu v,$$

откуда

$$v = ki,$$

где k — коэффициент скорости фильтрации, постоянный для данной породы (и для данной температуры) ³⁾,

i — напорный градиент, равный в каждой точке дроби $\frac{dh}{dl}$, где dh напор, потерянный на пути dl .

Для будущего подземного потока через исследуемую породу из водохранилища средний напорный градиент, как это легко вывести из плана фиг. 1, равен приблизительно $\frac{20 \text{ саж.}}{200 \text{ саж.}} = 0,1$. Максимальная скорость и определяющий ее максимальный напорный градиент будет в конце потока, но и здесь он не достигнет величины, равной 1.

Поэтому, если я найду из цифр нашего опыта действительную скорость фильтрации в изучаемой породе для напорного градиента $= 1$, то это и можно принять за высший предел, который не может превзойти действительная скорость.

Прежде всего вычисляю действительные скорости на смоченной поверхности шурфа № 3", так как в нашем опыте только здесь происходит движение при избытке воды; в других же сечениях, вследствие последовательного увеличения их, воды не хватает для развития полной скорости.

По формуле (9) имею:

$$v_{o,nc} = \frac{r_c}{r_o} v_{nc}; \quad v_{o,nb} = \frac{r_b}{r_o} v_{nb}; \quad v_{o,nd} = \frac{r_d}{r_o} v_{nd}.$$

Подставляя числовые величины, получаю:

$$v_{o,nc} = \frac{1,3}{0,3} 0,007 = 0,030 \text{ саж./час}$$

$$v_{o,nb} = \frac{1,4}{0,3} 0,015 = 0,070 \quad "$$

$$v_{o,nd} = \frac{3,1}{0,3} 0,020 = 0,207 \quad "$$

¹⁾ Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 1864, p. 231.

²⁾ См. выноски III. 2.

³⁾ Ch. S. Slichter. См. последнюю выноску в III. 3.

Напорные градиенты для соответственных направлений будут:

$$\text{для } nc \dots \frac{0,18}{1,0}, \quad \text{для } nb \dots \frac{0,53}{1,1}, \quad \text{для } nd \dots \frac{2,70}{2,9}.$$

Поэтому скорость на поверхности шурфа № 3^{II} при напорном градиенте, равном единице, вычисленная из трех предыдущих цифр, получает следующие три значения:

$$\begin{array}{l|l} \text{из наблюдения для } nc & v = 0,030 \frac{1,0}{0,18} = 0,167 \text{ саж./час} \\ \text{„ „ „ } nb & v = 0,070 \frac{1,1}{0,53} = 0,145 \text{ „} \\ \text{„ „ „ } nd & v = 0,207 \frac{2,9}{2,70} = 0,222 \text{ „} \end{array}$$

Вспомним согласно высказанным выше замечаниям, что для направления *nd* по условиям опыта была наблюдаема скорость несколько бóльшая действительной средней скорости движения воды в породе. Поэтому последнее значение для *v* надо отбросить. Из двух же первых возьмем наибольшее, так как нам надо определить предел, выше которого действительная скорость не поднимется.

Итак, мы можем считать, что при существовании водохранилища действительная скорость движения воды в верхних слоях делювия северной седловины при отсутствии непроницаемой диафрагмы будет не более 0,167 саж. в час, или не более 0,003 саж. в минуту (точнее 0,0028 саж./мин).

Из этого ясно, что ни о каком внутреннем размывании породы, т.-е. ни о каком выносе более мелких частиц ее из ее толщи, не может быть и речи.

Для сравнения приведу выдержки из таблицы Ch. S. Slichter ¹⁾, содержащей скорости для различных пород (песчаных) при пористости их равной 32% и при температуре 10° С.

Р о д п е с к а	Действующая величина ²⁾ зерен породы mm	Абсолютная скорость при напорном градиенте 1:1	
		Дюймы в минуту	Сажени в минуту
Ил	0,01	0,0014	0,000016
Мелкий песок .	0,10	0,1361	0,001620
„	0,12	0,1961	0,0023
„	0,14	0,2668	0,0032
Крупный песок	1,00	13,61	0,1620
Гравий	5,00	340,3	4,05

¹⁾ Л. с., стр. 22.

²⁾ См. выше, стр. 10.

Необходимо заметить, что наблюдения над скоростью фильтрации велись нами в верхних слоях делювия между отметками 118,7 и 116,2. Уровень же водохранилища будет, как упоминалось, на отметке 117. Поэтому для этой породы почти вся масса, чрез которую будет идти фильтрация, лежит ниже того слоя, в котором скорость нами определялась.

Чтобы судить, хотя приблизительно, о возможной действительной скорости в этой нижележащей толще, я воспользуюсь следующим.

В шурфе № 3" одновременно с действительной скоростью нами определен, хотя и не особенно тщательно, „коэффициент проводимости“ или „кажущаяся скорость фильтрации при напорном градиенте, равном 1“, т.-е. количество воды, просачивающееся чрез 1 кв. саж. породы в 1 минуту при напорном градиенте, равном 1.

Оказалось:

$$K_1' = 0,000504 \text{ саж}^3/\text{саж}^2 \times 1'.$$

Для нижележащих слоев (для отметки 113,5 саж.) величина коэффициента проводимости оказалась равной

$$K_1'' = 0,00367 \text{ саж}^3/\text{саж}^2 \times 1' \text{ }^1).$$

Из этого ясно, что максимум действительной скорости движения воды во втором случае будет равен

$$0,0028 \frac{3670}{504} = 0,0204 \text{ саж./мин.} = 0,00034 \text{ саж./сек.}$$

Эту величину можно считать уже не уклоняющейся значительно от искомой величины абсолютной скорости, и на основании ее можно утверждать вообще для делювия северной седловины, что действительная скорость просачивания чрез него будет с точки зрения строительной совершенно ничтожна и внутреннего размывания породы вызвать не может.

3. Несколько соображений о действительных скоростях фильтрации в двух остальных породах.

Как было сказано выше, в порфировых сиенит-гранитах мы не ставили опытов по определению действительных скоростей фильтрации.

Однако некоторые косвенные заключения можно высказать по этому поводу, обосновав их на данных вышеописанных опытов по определению кажущихся скоростей фильтрации в этих породах. Эти заключения дадут нам, по крайней мере, понятие о том, какого порядка будут цифры действительных скоростей воды в породах, о коих идет речь.

Схема этих соображений такова.

При определении кажущихся скоростей фильтрации я определил и дал выше в таблице IV количество воды, уходящее в каждой породе чрез одну квадратную сажень в одну минуту при напорном градиенте, равном 1.

¹⁾ См. выше табл. IV.

Если я теперь эту величину разделю на минимальную пористость данной породы φ , т.-е. на среднюю площадь пор на квадратной единице сечения породы, — то получу величину v_1 , несколько ббльшую действительной скорости в данной породе при напорном градиенте, равном 1. Минимальную пористость наших пород мы не определяли, и я могу взять ее лишь по литературным данным, в чем и заключается источник нестрогости этих соображений.

Если мы, наконец, эту величину v_1 умножим на максимум того напорного градиента, какой может быть в данной породе при существовании водохранилища, то и получим искомую максимальную действительную скорость v .

Привожу вычисления.

А) Для нетрещиноватых порфировых гранито-сиенитов

$$k_1 = 0,00003 \text{ с}^3/\text{с}^2 \times 1' 1).$$

По И. В. Мушкетову²⁾ минимальная пористость для плотных массивно кристаллических пород $\varphi = 0,0005$.

Поэтому

$$v_1 = \frac{0,00003}{0,0005} = 0,06 \text{ саж./мин.}$$

В этой породе напорный градиент, как об этом упоминалось выше (III. 3), будет наибольший в местах, ближайших к заделанному краю диафрагмы. Если взглянуть на фиг. 4 и если принять во внимание, что борта долины и дно сложены сначала в среднем шестисаженной толщей трещиноватых, а затем нетрещиноватыми порфировыми гранито-сиенитами, — то станет ясным, что напорный градиент в последних породах не может подняться и здесь выше $\frac{20}{12} = \frac{5}{3} = 1,67$. Здесь 20 саж. — максимальная глубина водохранилища, т.-е. весь теряемый напор для струи, идущей под диафрагмой; 12 саж. — минимальный путь, проходимый струями, огибающими диафрагму и захватывающими нетрещиноватые породы.

Отсюда

$$v = 1,67 v_1 = 0,10 \text{ саж./мин.} = 0,0017 \text{ саж./сек.}$$

В) Для трещиноватых порфировых гранито-сиенитов.

$$k_1 = 0,01324 \frac{\text{с}^3}{\text{с}^2 \times 1' 3).$$

Наименьшая пористость: 0,013⁴⁾.

Поэтому

$$v_1 = \frac{0,01324}{0,013} = 1 \text{ саж./мин.}$$

1) Табл. IV.

2) Физич. Геология. 1903, т. II, стр. 218. К. Кейльгак, л. с., приводит по этому поводу менее подробные данные (на стр. 112).

3) См. таблицу IV.

4) У И. В. Мушкетова (л. с.) приводятся для сиенитов величины от 0,0050 до 0,0138, а для типичных трещиноватых пород от 0,015 до 0,177 (известняки) и от 0,049 до 0,398 (песчаники).

Максимальный напорный градиент и в этой породе будет у заделанных краев диафрагмы и будет зависеть от глубины заделки, а именно:

Глубина заделки диафрагмы в породе	Напорный градиент J	Действительная скорость $v = v_1 J$	
		мин. / саж.	сек. / саж.
2 ¹ / ₂ саж.	20 : (2 × 2 ¹ / ₂) = 4	4	0,07
5	20 : (2 × 5) = 2	2	0,04
6	20 : (2 × 6) = 1,67	1,67	0,03

Сделаю еще аналогичный подсчет для делювия северной седловины, чтобы сверить этот способ подсчета со способом наблюдений действительной скорости, изложенным выше.

$$k_1 = 0,00367 \text{ саж}^3/\text{саж}^2 \times 1'$$

Наименьшая пористость рыхлых пород 0,26¹⁾.

$$v_1 = \frac{0,00367}{0,26} = 0,0141 \text{ саж. / мин.}$$

Выше нами было найдено значение для этой величины 0,0204 саж. / мин. Ошибка подсчета по сравнению с наблюдением составит

$$\frac{204 - 141}{204} 100\% = 31\%$$

Этим определяется примерная степень точности сделанных в этой главе подсчетов для плотных и для трещиноватых скалистых пород.

4. Практические выводы.

Принимая во внимание сказанное в конце предыдущей главы, можно считать, что степень точности полученных цифр для действительных скоростей фильтрации равна примерно 50% определяемой величины.

Известно, что знание величин с таковою точностью, а иногда даже с вероятною ошибкой в 100%, 200% определяемой величины часто бывает вполне достаточно для решения возникающих вопросов.

Здесь имеется именно такой случай.

Я сопоставляю полученные цифры действительных скоростей движения воды с теми скоростями²⁾, при которых начинается разрушение дна и стенок канала водою.

¹⁾ Краснопольский, л. с., стр. 20. Slichter, л. с., стр. 14.

²⁾ Справочн. книга „Hütte“ 1912 г. Ч. I, стр. 302.

В нашем случае.		По литературным данным.	
Горные породы	Найденные максимальные действительные скорости	Высшие пределы неразмывающих скоростей	Горные породы
Делювий северной седловины	0,003 саж./сек.	0,0376 саж./сек.	Илистый грунт
Трещиноватые скалистые породы	0,07 "	0,32 "	Гравистый грунт
Нетрещиноватые скалистые породы	0,0017 "	1,476 "	Твердые скалистые породы

Из этого сопоставления видно, что внутреннего размывания пород нет оснований опасаться, если бы даже ошибка в определении максимума действительных скоростей доходила до

$$\frac{0,32 - 0,07}{0,07} 100\% = \frac{25}{7} 100 = 357\%$$

найденной величины.

V. Существующий подземный дебит реки Чу.

1. Схематизация задачи.

Эта наша задача носила характер одной из самых обычных и в то же время самых важных практических задач гидрогеологии. Именно, вопрос был в определении дебита существующего подземного потока.

Изложу схему, которой я придерживался при решении этого вопроса.

Выше (III. 1) я приводил для дебита подземного потока простые, но весьма важные формулы:

$$Q = \omega \varphi v \dots \dots \dots (1)$$

$$c = \varphi v \dots \dots \dots (2)$$

$$Q = \omega c \dots \dots \dots (3)$$

Здесь, как и в первой задаче, при подсчете утечки, я пользовался формулой (3), а не (1).

Поток под руслом р. Чу идет в трех породах: аллювии, трещиноватых и плотных скалистых породах. Это видно из разреза фиг. 2. Поэтому формула (3) должна принять, подобно формуле (4) для утечки, вид:

$$Q = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2 + \omega_3 c_3.$$

Однако, после выясненной уже нами в части III ничтожной водопропускной способности плотных скалистых пород, ясно, что водой, идущей под руслом р. Чу чрез эту породу, можно при настоящих подсчетах пренебречь по сравнению с водой, идущей чрез первые две породы.

И подсчет дебита подземной реки следует вести по формуле

$$Q = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2 \dots (13)$$

Площади ω_1 и ω_2 аллювия и трещиноватых скалистых пород ниже уровня воды в реке легко найти по фиг. 2. Они равны соответственно 504 и 612 кв. саж.

Теперь вся задача сводится к определению средних кажущихся скоростей c_1 и c_2 для каждой породы для измеренного сечения потока.

Определение этих величин облегчается тем обстоятельством, что для строителей, как и в первой задаче, важнее было знать величину дебита максимального, а не возможно более близкую к средней.

2. Определение верхнего предела кажущихся скоростей подземной реки Чу.

Для трещиноватых скалистых пород мы не ставили особого опыта, и для определения верхнего предела c_2 я воспользуюсь наблюдаемым мною (III. 5, табл. IV) верхним пределом кажущейся скорости фильтрации при напорном градиенте, равном 1.

Эта последняя величина по таблице IV равна $k_1 = 0,01324 \text{ саж.}^3/\text{саж.}^2 \times 1'$. Принимаю во внимание, что для трещиноватых пород 1) дебиты, 2) действительные (абсолютные), а также и 3) кажущиеся скорости относятся, как корни квадратные из напорных градиентов (см. выноску к таблице V), и что напорный градиент (падение) реки Чу равен, по данным съемок партии инж. В. А. Васильева, от 0,0033 до 0,0041, круглым числом 0,004.

Тогда получу:

$$\frac{c_2}{k_1} = \frac{\sqrt{0,004}}{\sqrt{1}} = 0,063$$

Откуда

$$c_2 = 0,063 \times 0,01324 = 0,00084 \text{ саж.}^3/\text{саж.}^2 \times 1'$$

Для аллювия, с целью определить верхний предел c_1 , нам пришлось поставить особый опыт, так как никаких цифровых данных о гидрогеологических свойствах этой породы мы не имели.

Мы применили и здесь, как и во всех предшествующих наших опытах, способ искусственной инфильтрации.

Теория опытного определения верхнего предела кажущейся скорости c данного потока проста и мало отличается от теории определения кажущихся скоростей при напорном градиенте, равном 1 (см. III. 3).

Схема ее такова.

а) Выбивают шурф в той породе, в которой течет поток. Дно шурфа должно быть ниже поверхности потока.

б) Льют в него воду, поддерживая ее уровень на одной и той же высоте.

с) Измеряют количество $A:M$ воды, необходимое в единицу времени для этого поддержания, а также площадь Q сечения шурфа, чрез которую происходит просачивание.

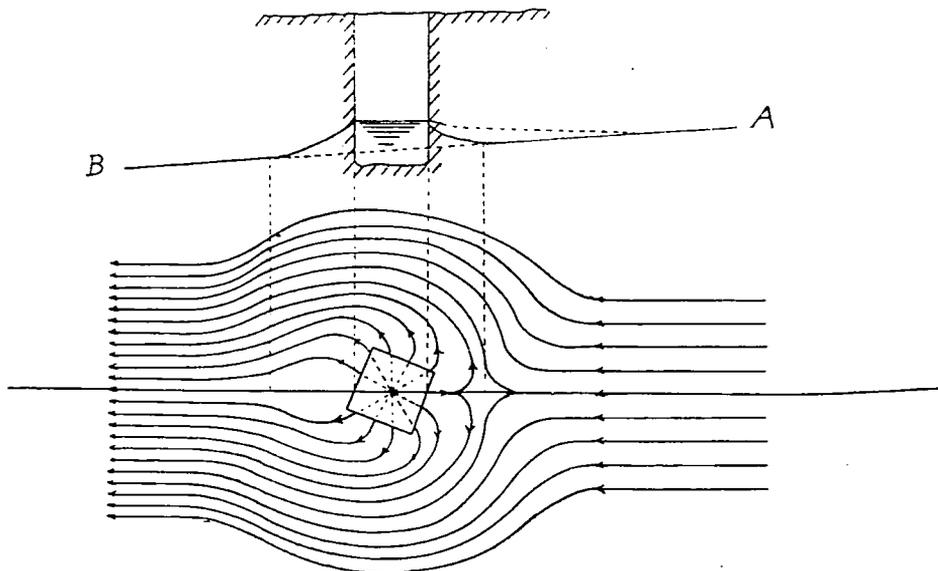
д) Если приняты меры к тому, чтобы напорный градиент пробного потока был не менее напорного градиента изучаемого потока, то величина

$$\frac{A}{M \cdot Q} = c$$

и даст нам требуемое значение c , выше которого не может подняться средняя кажущаяся скорость изучаемого потока.

Главное затруднение этого метода состоит в правильном установлении величины Q .

Как это легко понять, под Q надо разуметь площадь наименьшего нормального к струям сечения того потока, в виде которого наливаемая вода уходит из шурфа.



Фиг. 8. Схема инфильтрации через шурф, доведенный до подземного потока.

Для правильного определения Q в каждом опыте, во-первых, надо выяснить, через какие именно части мокрого сечения шурфа уходит вода, и во-вторых — надо выяснить поправку величины Q на неперпендикулярность мокрого сечения шурфа к струям пробного потока.

В описываемом сейчас случае шурф был углублен немного ниже уровня изучаемого грунтового потока, тогда как для определения k_1 (ч. III.) мы далеко не доводили своих шурфов до уровня грунтовых вод.

Чтобы судить о том, через какие части мокрого сечения происходит фильтрация воды из шурфа, мной вычерчена фиг. 8.

Верхняя часть ее — вертикальный разрез через шурф. Нижняя часть — план поверхности воды с указанием поверхностных струй совокупности обоих потоков: изучаемого и пробного ¹⁾.

¹⁾ Аналогичные планы струй для дающих (а не поглощающих) воду скважин или колодцев имеются у А. А. Краснопольского (л. с., стр. 116, а также 118) и у Slichter (л. с., стр. 100).

Из этой фигуры видно, что чрез все боковые стенки шурфа, лежащие выше естественного уровня грунтового потока, должно происходить просачивание. Однако, в виду того, что точного вида образующейся при опыте депрессионной поверхности мы не имеем, и в виду того, что она может справа от шурфа принять форму показанную пунктиром, при чем течение из шурфа в сторону *A* почти или совершенно прекратится, — я должен из соображений осторожности принять, что фильтрация из шурфа идет лишь чрез половину смоченных вертикальных стенок шурфа, лежащих выше естественной поверхности потока. Потому что, желая определить maximum c , я должен опасаться взять Ω более действительного и не должен бояться уменьшать Ω .

Что касается вопроса о том, происходит ли просачивание чрез часть стенок, лежащую ниже уровня естественного потока, а также и чрез дно, — то можно быть уверенным, что такое просачивание имеет место. Считают даже, что скорость этого просачивания по всей стенке колодца до самого его дна остается постоянной ¹⁾. Тем не менее вследствие неясности механизма фильтрации—здесь, например, в виду неясности того, каким напорным градиентом обладают струи, идущие чрез дно,—я считаю за наилучшее не включать вовсе этих участков смоченного сечения при подсчете величины Ω .

Поправка Ω на неперпендикулярность струй потока к стенкам шурфа должна заключаться в умножении подсчитанной величины Ω на косинус среднего угла наклона струи пробного потока близ стенки шурфа к горизонту. Этой поправки я вводить не буду по тем причинам, что точной величины среднего угла я не знаю, что угол этот, как видно из фиг. 8, и как показывает опыт, описанный в части IV ($\angle acc'$ фиг. 7), — мал, и еще потому, что усиленное сокращение Ω , только что произведенное по первому условию, поглотит с избытком то ничтожное увеличение, которое я допущу, не вводя обсуждаемой сейчас поправки.

Закончив эти общие соображения о методе, я опишу теперь произведенное нами на изложенных основаниях опытное определение верхнего предела c_1 в аллювии, а также запишу цифровые результаты этого опыта.

Опыт инфильтрации был произведен нами лишь в одном месте: в шурфе № 6 (фиг. 1). Для точного определения дебита подземной р. Чу, разумеется, следовало бы повторить наш опыт в других шурфах в разных местах долины и на разных глубинах от поверхности.

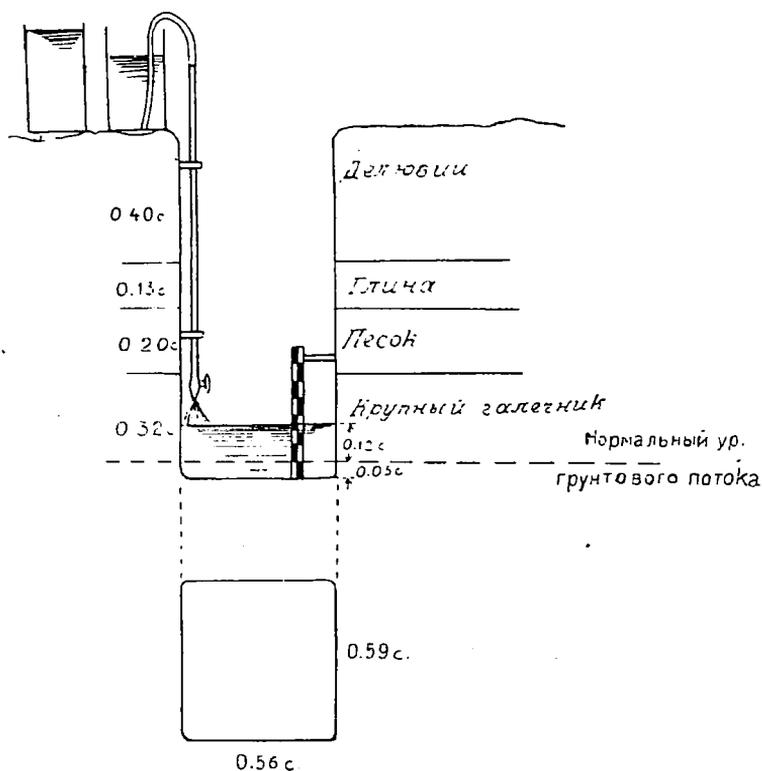
Поэтому наш опыт дает прежде всего лишь шаблон для наблюдений. И затем—величину первого приближения к истине.

Самый способ наблюдения почти во всем был тождествен с описанным в „Инструкции“ в части III. Отличий было два: во-первых, как упоминалось, шурф был углублен ниже уровня грунтовых вод, и во-вторых—высота наливаемой в шурф воды была значительнее, чем это указано в „Инструкции“. Конечно, и вычисления велись здесь иначе, чем это указано в „Инструкции“.

Размеры шурфа, геологический разрез чрез него и схема устройства для наблюдения инфильтрации показаны на фиг. 9.

¹⁾ Рихерт (I. с., стр. 52). Краснопольский (I. с., стр. 132).

Геологические обозначения этой фигуры показывают, что рыхлые отложения долины не однородны. И значение величины c должно быть различно для различных слоев. Наш опыт был произведен в слое наиболее водопроницающем из всех, пересеченных шурфом, — именно в крупном галечнике. Однако, нельзя быть уверенным, что глубже не имеется здесь слоя еще более проницаемого ¹⁾. Поэтому необходимо повторить, что величины, нами здесь полученные, являются лишь первым приближением, и что главное значение описываемого опыта в том, что он дает схему, по которой можно было бы производить целый ряд опытов в разных местах долины с целью возможно ближе подойти к искомой величине дебита изучаемого потока.



Фиг. 9. Опыт фильтрации в шурфе № 6 (фиг. 1).

Для уверенности в том, что положение уровня грунтовых вод за время опыта не изменилось, мы наблюдали до и после опыта этот уровень по рейкам в реке и в нескольких шурфах, на той же площадке, что и шурф № 6, по оси плотины. Изменений уровня не оказалось.

Дно шурфа и его стенки были освежены перед опытом.

¹⁾ Наблюдения А. Ф. Вайпина над исчезновением промывной воды при бурении разведочных скважин говорят скорее за то, что более глубокие отложения долины более проницаемы, чем исследованные нами.

Данные, полученные опытом, таковы.

Наблюдение	Количество пропущенной воды A саж. ³	Потребованное время M минут	Количество воды, уходящее в 1' $\frac{A}{M}$ саж. ³ /мин.
1-е	0,009	12	
2-е	0,009	11 $\frac{1}{2}$	
Среднее		11 $\frac{3}{4}$	0,000766

Фильтрующая площадь Ω по соображениям, развитым выше в этой главе, выразится так (фиг. 9):

$$\Omega = (0,56 + 0,59) 0,12 = 0,1380 \text{ саж.}^2 = 0,14 \text{ саж.}^2.$$

Отсюда

$$c_1 = \frac{A}{M \cdot \Omega} = \frac{0,000766}{0,14} = 0,00547 \text{ с}^3/\text{с}^2 \times 1' \text{ }^1)$$

3. Подсчет подземного дебита реки Чу.

Теперь я имею все четыре величины, входящие в формулу (13), которую повторяю:

$$Q = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2 \dots \dots \dots (13)$$

Подсчет дебита Q не представляет труда:

Горная порода	Площадь поперечного сечения ω саж. ²	Верхний предел кажущейся скорости фильтрации c саж. ³ /саж. ² ×1'	Верхний предел дебита ωc саж. ³ /мин.
Аллювий	504	0,0055	2,77
Трещиноватые скалистые породы .	612	0,0009	0,56
			3,33

Итак, дебит подземной реки равен 3,33 саж.³/мин. или 0,056 саж.³/сек. Если принять летний дебит надземной реки Чу у Ортокоя = 3 саж.³/сек., то получая, что подземный дебит составляет приблизительно 2% надземного.

¹⁾ А. Ф. Вайполин сообщил мне приближенные данные, представляющие, так сказать, побочный результат откачки из шурфа B (фиг. 1), откуда насосом бралась вода для промывки соседней скважины при ее бурении. Эти данные при вычислениях, подобных только что приведенным, дают: c_1 — от 0,01 до 0,03 саж.³/саж.² 1'. Т.-е. в 2 — в 5 $\frac{1}{2}$ раз больше, чем нашли мы (0,0055). По этому поводу сравните предыдущую выноску.

Замечу попутно, что пределы максимума действительной скорости движения воды в крупном галечнике аллювия установить легко, если иметь в виду, что пористость рыхлой зернистой породы колеблется в пределах от 26% до 47%¹⁾.

Так как $c = \varphi v$, то

$$v = \frac{c}{\varphi}$$

$$\text{min. } v = \frac{0,0055}{0,47} = 0,012 \frac{\text{саж.}}{\text{мин.}} = 17,28 \frac{\text{саж.}}{\text{сутки}}$$

$$\text{max. } v = \frac{0,0055}{0,26} = 0,021 \frac{\text{саж.}}{\text{мин.}} = 30,24 \frac{\text{саж.}}{\text{сутки}}$$

Для сравнения можно привести, напр., данные Альб. Гейм²⁾, полученные непосредственным измерением в широких хрящевых долинах:

Место наблюдения	Падение (напорный градиент)	Скорость метры/сутки	Отсюда скорость при нашем напорном градиенте (0.004)
Долина Эммы . . .	0,007	8	2,2 саж./сутки.
Долина Лиммат . .	0,0005	5	20 саж./сутки.

4. Необходимый водоотлив при заложении основания плотины.

Для устройства непроницаемой диафрагмы и всего тела плотины на скалистом основании строителям необходимо сделать выемку до скалы поперек русла, перерезав выемкой все рыхлые породы и частью трещиноватые скалистые.

Выполнение этих работ намечалось одним из двух способов, каждый из которых предполагает предварительное отведение реки в сторону от нынешнего ее русла.

Первый состоит в производстве выемки посредством черпания, с применением кессонных работ, как вспомогательных, второй — открытая углубка с помощью простого водоотлива.

Из этого ясно, какое важное значение приобретают для строителей сведения о дебите подземной части р. Чу. Количество этой подземной воды которую нельзя отвести, подобно надземной реке, в сторону, определяет собою необходимую для работ силу насосов и служит решающим обстоятельством при выборе того или иного из упомянутых двух способов работ.

Итак, мне предстоит здесь выяснить необходимую силу водоотливных машин для любого момента ведения выемки.

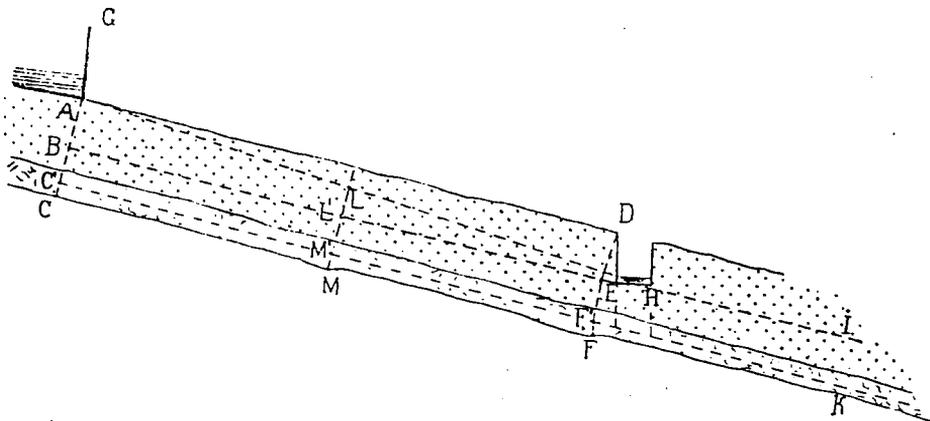
¹⁾ См. последнюю выноску в IV. 3.

²⁾ Кейльгак, I. с., стр. 464.

Так как предполагаемая выемка представляет род канавы, то решение поставленного вопроса имеет много общего с расчетом дебита канав¹⁾, хотя и не вполне с ним тождественно.

Разберемся в вопросе.

Фиг. 10 представляет схематический (не масштабный) разрез вдоль по реке. AD — дно отведенной реки. AG — временная плотина, отводящая реку. DH — начатая выемка по оси будущей плотины. Обозначения горных пород те же, что на фиг. 2, т. е., идя сверху вниз, — аллювий, трещиноватые скалистые породы и, ниже линии CF , — плотные скалистые породы. Последние, как упомянуто раньше, следует считать практически водонепроницаемыми. Обе же верхние при естественном состоянии реки служатместищем ее подземного потока.



Фиг. 10. Гидрогеологическая схема углубки котлована DH под плотину. AG — временная плотинка. (Разрез вдоль русла реки Чу).

Принимая во внимание данные плана и разреза (фиг. 1 и 2) и задаваясь определенной скоростью углубки выемки и ее величиной в данный момент, вычислим для этого момента количество воды, поступающее в канаву за единицу времени.

Чтобы сделать это вычисление, мы можем сделать следующие пояснения, рассуждения и не вредные для дела допущения.

Можем принять, что часть потока $BCEF$ не претерпевает никаких изменений от выкачивания воды из DH и не оказывает никакого действия на дебит канавы. На самом деле, конечно, вода поступает и чрез дно канавы; но для количественного учета явления сделанное допущение даст результаты, не отступающие далеко от действительности, так как слой $EFJK$ несомненно останется заполненным водою.

Насосы, поставленные в выемке, должны были до момента углубки, изображенного на чертеже, откачивать для установления равновесия постоянный приток, идущий чрез площадь AB , и сверх того должны были откачать всю воду, заключавшуюся в породах ADE . Надо заметить и здесь, что

¹⁾ Сравните, напр., у А. А. Краснопольского, I. с., стр. 72 и след.

в действительности мыслимо, что понижение депрессионной поверхности не распространится до точки A , т.-е. что район действия канавы будет меньше DA . Но для простоты расчета я прииму его равным DA ; это несколько увеличит мне необходимую силу насосов.

Принимаю далее, что углубка ведется равномерно по всей длине выемки, и что откачивание вод ADE не отстает от углубки, т.-е. что при понижении дна канавы на некоторую величину излишняя вода сразу выливается в канаву, и депрессионная кривая AE сразу достигает нового положения равновесия. В действительности равновесие будет достигаться не сразу, конечно. Зная из предыдущей главы 3, что максимальная скорость течения нашего потока 17 — 30 саж. в сутки, и имея в виду, что расстояние AD предположено примерно в 100 сажен, легко вычислю, что установление равновесия после всякой новой углубки будет происходить, примерно, не менее чем чрез 6 — 3 дней. Заметим это; но в формулу силы насосов это соображение ради простоты вводить не будем.

Следующее допущение состоит в том, что линию AE я буду принимать при подсчете воды ADE за прямую, а не за параболу, ради простоты. Это несколько увеличит силу насосов.

При подсчете воды ADE я не буду принимать во внимание депрессионной поверхности от реки к бортам долины, так как такое повышение, если оно и существует, — имеет ничтожную величину, как показали шурфы и скважины вокруг будущей плотины. Зато я буду принимать, что длина выемки не будет уменьшаться с глубиной, т.-е. что поперечное сечение водоносных пород имеет форму прямоугольника, а не сегмента, как показано на фиг. 2. Это я сделаю, во-первых, из-за простоты подсчета и во-вторых — из-за того, что выяснение точной фигуры этого сечения потребовало бы таких детальных разведок, каких не было произведено, и расходы на каковые едва ли оправдались бы. Это допущение прямоугольности сечения увеличит мне несколько необходимую силу насосов.

При подсчете постоянного притока чрез AB (фиг. 10) мне надо выяснить предварительно, под каким напорным градиентом это истечение будет происходить. Это надо для того, чтобы соответственно изменить при подсчете величины кажущейся скорости движения воды, полученные нами ранее (V. 3) для обеих пород.

Чтобы этот градиент найти, я должен принять во внимание, что строители предполагают временною плотиною AB поднять уровень воды на 1 сажень примерно. Означаю величину выполненной углубки, почти равную $DE=AB$, чрез n и считаю, что n_1 сажен пройдены в аллювии, а остальные n_2 сажен — в трещиновато-скальных породах, так что $n = n_1 + n_2$. Тогда средний напорный градиент потока будет

$$\frac{1+n}{AD} + 0,004,$$

где 0,004 есть среднее падение р. Чу (V. 2).

Этот градиент не будет существовать во всех сечениях потока ABE . В сечении AB градиент будет меньше, в сечении DE — больше. Найденный же

градиент $\frac{1+n}{AD} + 0,004$ будет иметь место для некоторого среднего сечения LM , приблизительный вертикальный размер которого найдется из следующих соображений.

Депрессионная кривая ALE , как известно, выпукла кверху. Если бы она была прямою, то

$$LL' = \frac{AB + 0}{2} = \frac{AB}{2} = \frac{n}{2}.$$

Вследствие же выпуклости величина LL' будет больше $\frac{n}{2}$, но непременно меньше n . Для своих подсчетов я приму ее $\frac{3}{4}n$.

Когда углубка затронет трещиновато-скальные породы, дойдя, например, до поверхности $C_1M_1F_1$ и пройдя в этих трещиноватых породах n_2 сажен, тогда высота сечения по LM потока AC_1F_1 будет:

$$\left(\frac{3}{4}n - n_2\right) + n_2.$$

Выражение в скобках дает часть высоты в аллювии, а n_2 — часть высоты в трещиноватых скалистых породах.

Подставляя $n = n_1 + n_2$, получаю часть высоты в аллювии

$$\frac{3}{4}n - n_2 = \frac{3n_1 - n_2}{4}.$$

Теперь введем обозначения.

Q саж³/мин. — полный приток в канаву;

n_1 саж. — величина выполненной углубки в аллювии;

n_2 саж. — то же в трещиноватой скале;

$l = 80$ саж. — длина выемки поперек русла;

$l_1 = 100$ саж. — средняя для участка AD ширина водоносных пород поперек русла;

$c_1 = 0,0055$ саж³/саж² \times 1' — верхний предел кажущейся скорости фильтрации для аллювия в настоящее время (V. 3);

$c_2 = 0,0009$ саж³/саж² \times 1' — то же для трещиноватой скалы;

$AD = 100$ саж. — средний для участка AD размер водоносных пород вдоль русла;

$\varphi = 40$ — коэффициент пористости водоносных пород (из приводившихся выше цифр 0,26—0,47 беру ближе к максимуму, для обеих пород одинаково);

m саж. — средняя величина углубки за день;

$\frac{1+n_1+n_2}{AD} + 0,004$ — средний напорный градиент потока ABE после

отведения реки и углубки;

0,004 — напорный градиент существующий, при котором определялись величины c_1 и c_2 .

Тогда получаю такую формулу:

$$Q_{с^3, 1'} = \frac{1+n_1+n_2+0,004 AD}{0,004 AD} \left(c_1 \frac{3n_1-n_2}{4} + c_2 n_2 \right) l + \varphi \frac{AD}{2} \frac{m}{24^h \times 60'} l_1 \cdot (14)$$

постоянный приток через AB
приток из объема ADE

По этой формуле найдется без труда приток в канаву, иначе говоря — необходимая сила водоотлива.

Сделаю цифровые подсчеты для различных заданий в изучаемом случае.

Из списка обозначений видно, что там не помечены числовые данные для двух величин: для величины выполненной углубки $n_1 + n_2 = n$ и для скорости углубки m . Поясняю: если мне известна общая величина углубки $n_1 + n_2$, то мне известны величины n_1 и n_2 и каждая в отдельности, потому что по данным скважины, заложенной близ реки, аллювий идет на 10 сажен ниже уровня реки.

Вычислю величину Q для таких значений:

$$n \text{ саж.} = 1; 5; 12; 15;$$

$$m \text{ саж. сутки} = 0; 0,1; 0,2.$$

Имею:

$$Q = \frac{1+n_1+n_2+0,4}{0,004 \times 100} \left(0,0055 \frac{3n_1-n_2}{4} + 0,0009 n_2 \right) 80 + 0,40 \frac{100}{2} 100 \frac{m}{24 \times 60'}$$

$$Q = \left(1,4 + n_1 + n_2 \right) \left(1,10 \frac{3n_1-n_2}{4} + 0,18n_2 \right) + 1,39m \dots \dots \dots (15)$$

Как упомянуто немного выше, мощность аллювия у реки равна 10 саж. У бортов долины эта мощность будет меньше (см. фиг. 2). Но для простоты расчета и для запаса я могу принять, что мощность эта сохраняется вдоль всей углубляемой канавы. Это увеличит мне несколько вычисляемую силу насосов. Итак, максимум $n_1 = 10$ саж.

Теперь по формуле (15) нахожу:

Для $m = 0$, т.-е. когда углубка приостановлена:

Достигнутая глубина канавы:			Необходимый водоотлив Q		$\frac{1}{10} Q$
$n = n_1 + n_2$	n_1	n_2			
1 саж.	1 саж.	0 саж.	1,98 с. ³ /1'	0,033 с. ³ /1''	0,20 с. ³ /1'
5	5	0	26,40	0,440	2,64
12	10	2	108,01	1,800	10,80
15	10	5	127,60	2,127	12,76

Для $m = 0,1$ саж. в сутки:

Достигнутая глубина выемки			Необходимый водоотлив		$\frac{1}{10} Q$
$n = n_1 + n_2$	n_1	n_2	Q		
1 саж.	1 саж.	0 саж.	2,12 с. ³ /1'	0,035 с. ³ /1"	0,22 с. ³ /1'
5	5	0	26,54	0,442	2,66
12	10	2	108,15	1,803	10,82
15	10	5	127,74	2,129	12,78

Для $m = 0,2$ саж. в сутки:

Достигнутая глубина выемки			Необходимый водоотлив		$\frac{1}{10} Q$
$n = n_1 + n_2$	n_1	n_2	Q		
1 саж.	1 саж.	0 саж.	2,26 с. ³ /1'	0,038 с. ³ /1"	0,23 с. ³ /1'
5	5	0	26,68	0,445	2,67
12	10	2	108,29	1,805	10,83
15	10	5	127,88	2,132	12,79

В каждой из этих трех таблиц последняя вертикальная графа прибавлена из тех соображений, что углубка выемки практически производилась бы не сразу по всей длине ее, а участками, своего рода колодцами или точнее—короткими канавами, например, по 5—10 саж. длиною каждая.

Сразу ясно, что в этом случае необходимый водоотлив будет меньше.

Если вспомнить, что вся длина l котлована (выемки) под искусственную плотину равна 80 сажням, и принять для примера, что углубка котлована будет вестись участками по 8 сажен длиною, — то будет ясно, что каждая из таких восьмисаженных канав-выемок перехватит не менее $\frac{1}{10}$ части всей той воды Q , которую надо было бы откачать при одновременной углубке по всей длине.

Таким образом, последняя графа $\frac{1}{10} Q$ определяет минимальную производительность водоотливных машин, которые надо иметь в каждой из восьмисаженных канав-выемок.

В действительности приток воды в эти выработки будет больше. Углубляемая с водоотливом выработка образует на депрессионной поверхности

грунтового потока воронку с некоторым радиусом R . Вследствие этого в выработку будет попадать вода с ширины потока не в восемь сажень, а с ширины, равной диаметру воронки, т.-е. $2R$ ¹⁾.

Обозначаю искомую мощность водоотлива в восьмисаженной выработке через q .

Тогда получаю:

$$\frac{q}{Q} = \frac{2R}{80}; q = \frac{2R}{80} Q.$$

Чтобы составить приблизительное суждение о величине радиуса R воронки, приведу формулу, выведенную для колодца ¹⁾:

$$R = \frac{\pi}{\alpha \lg n \frac{R}{r}} s.$$

Здесь α — напорный градиент потока до углубки колодца,
 s — понижение уровня, в нашем случае равное величине углубки n ,
 r — радиус колодца.

Интерполяционные вычисления по этой формуле дали А. А. Краснопольскому для значений $\alpha = 0,01$, $r = 1$ метр:

$$s = 1 - 1,5 - 2,0 \text{ метра.}$$

$$R = 72 - 100 - 126 \text{ метров.}$$

$$\text{Мы же имеем } \alpha = \frac{1 \text{ саж.} \cdot 0,004 AD}{AD}$$

(см. фиг. 10), так как на протяжении AD теряется, во-первых, искусственный подпор плотинкой AG , и во-вторых — естественная разница высот точек A и D , равная падению p . Чу, $0,004$, умноженному на $AD = 100$ саж.

Получаю из этого:

$$\alpha = \frac{1,4}{100} = 0,014.$$

Затем r у нас значительно более 1 метра, что, как легко понять, увеличит R . Для простоты я не буду принимать во внимание этого увеличения.

При таких данных нетрудно сообразить, что уже при величине углубки $s = n = 1$ саж.,

$$\text{радиус воронки } R = 72 \frac{0,01}{0,014} = 51 \text{ саж. и } 2R = 102 \text{ саж.,}$$

т.-е. значительно превосходит ширину всего нашего потока.

Поэтому можно предполагать, что способ углубки котлована отдельными участками поочередно не уменьшит необходимую мощность насосов.

¹⁾ А. А. Краснопольский (л. с., стр. 127 — 129, по Черепашинскому). Аналогичные способы расчета есть и у Рихерта (л. с.).

К этим замечаниям надо прибавить, что после заложения водонепроницаемого ядра в первой восьмисаженной выемке проходившая здесь часть грунтового потока направится в оставшуюся свободной часть сечения по оси плотины, соответственно увеличив скорость течения в этом сечении. Ясно, что в каждой новой канаве-выемке водоотлив будет становиться все труднее.

5. Практические выводы.

1. Для углубки котлована под основание плотины открытой выработкой с обычным водоотливом необходимо иметь производительность последнего не менее 130 (округляя цифру 127,88) куб. саж. в минуту. При желании избежать такого водоотлива надо отказаться от этого способа углубки и применить черпанье.

2. Ведение подобной выемки не сразу по всей длине плотины, а отдельными участками,—едва ли сколько-нибудь уменьшит необходимую силу водоотлива.

3. Пункт 1 можно выразить еще так. Породы, подстилающие русло, настолько проницаемы, что почти две трети надземной реки может уйти в открытую выемку, ведущуюся с водоотливом, если эта выемка достигнет глубины 15 сажен.

4. Скорость углубки оказывает сравнительно небольшое влияние на приток воды в выемку.

5. Заложение водонепроницаемого ядра поперек подземного русла реки Чу обусловит выступление на поверхность подземных водных масс, равных по величине дебиту подземной реки Чу, т.-е. 0,056 саж.³/1". Отведение их должно войти в расчеты строителей.

VI. Наблюдения над заиливанием горных пород.

1. Общие замечания.

Под заиливанием я разумею здесь происходящее при фильтровании воды сквозь горную породу засорение ее пор и уменьшение чрез то ее водопропускной способности.

Факт засорения песчаных фильтров общеизвестен в гидрогеологии и особенно в практике водоснабжения ¹⁾. Он вызывает постепенное уменьшение производительности фильтра. Для поддержания этой производительности на одной и той же цифре устраивают особые приспособления для постепенного увеличения напора, под которым вода идет сквозь фильтр ²⁾. Это засорение не распространяется однако глубоко: при периодических чистках фильтров бывает достаточно снять 1—2 верхних сантиметра песка, и начальная производительность фильтра восстанавливается. По исследованиям Lawgense даже

¹⁾ Ср., напр., И. Г. Рихерт, I. с., стр. 105—106.

²⁾ Debauxe et Imbaux, I. с. T. I, p. 560.

бактерии не проникают в песчаный фильтр глубже чем на несколько сантиметров ¹⁾).

Эти факты объясняются двумя причинами ²⁾:

1. Горная порода действует, как сито, задерживая на своей поверхности частицы более крупные, чем ее поры.

2. Горная порода действует, как прибор с попеременно суживающимися и расширяющимися каналами, при чем в расширениях вследствие замедления течения происходит осаждение более тяжелых частиц муты.

Точные наблюдения над заливанием были нами произведены попутно при определении утечки (часть III) лишь для одной горной породы, именно для делювия северной седловины.

Хотя эти наблюдения имеют второстепенное значение для строителей Орттокойской плотины, я все же считаю нелишним краткое изложение здесь их результатов, как освещающих один из фактов экспериментальной гидрогеологии.

2. Опыт заиливания и его результаты.

При всех без исключения наших работах с инфильтрацией воды в шурфах мы наблюдали тот же факт засорения пор породы. Именно, в продолжение опыта кажущаяся скорость фильтрации, т.-е. количество воды, уходящее чрез 1 кв. саж. в минуту, постепенно уменьшается; после чистки дна шурфа посредством удаления нескольких сотых сажени породы и после одновременной небольшой чистки стенок шурфа — кажущаяся скорость поднимается до прежней величины.

Количественная сторона явления была нами изучена в шурфе № 3, в делювии. Именно, мы определили, как изменяется время инфильтрации одного и того же объема воды при постоянном ее уровне в шурфе в зависимости от количества пропущенной в шурф воды.

Мы впускали по трубе чрез кран в шурф воду, поддерживая ее уровень на одной и той же высоте, в продолжение 15 дней и ночей непрерывно. Подвозимая к шурфу вода наливалась сначала в мерные баки. Емкость каждого бака равнялась 0,009 саж.³. Продолжительность впитывания бака отмечалась точно по часам. Вначале такая отметка шла для всех баков подряд, а затем точная отметка производилась с перерывами.

Всего впущено нами было 842 бака. После 690-го бака была произведена чистка мокрого сечения шурфа. Последние записи продолжительности истечения одного бака были сделаны для 770-го бака.

В нашем опыте время инфильтрации одного и того же объема воды в общем постепенно увеличивалось. Однако, для небольшого объема, напр. для одного бака, содержащего 0,009 куб. саж., эта закономерность еще не сказывалась, вследствие различных случайных обстоятельств: большей или меньшей мутности подаваемой воды, случайных ударов вливаемой струи в стенку шурфа и смыва или небольшого обрушения этой стенки и т. под.

¹⁾ Debauve et Imbeaux, I. c., p. 565.

²⁾ А. А. Краснопольский, I. c., стр. 14 — 15.

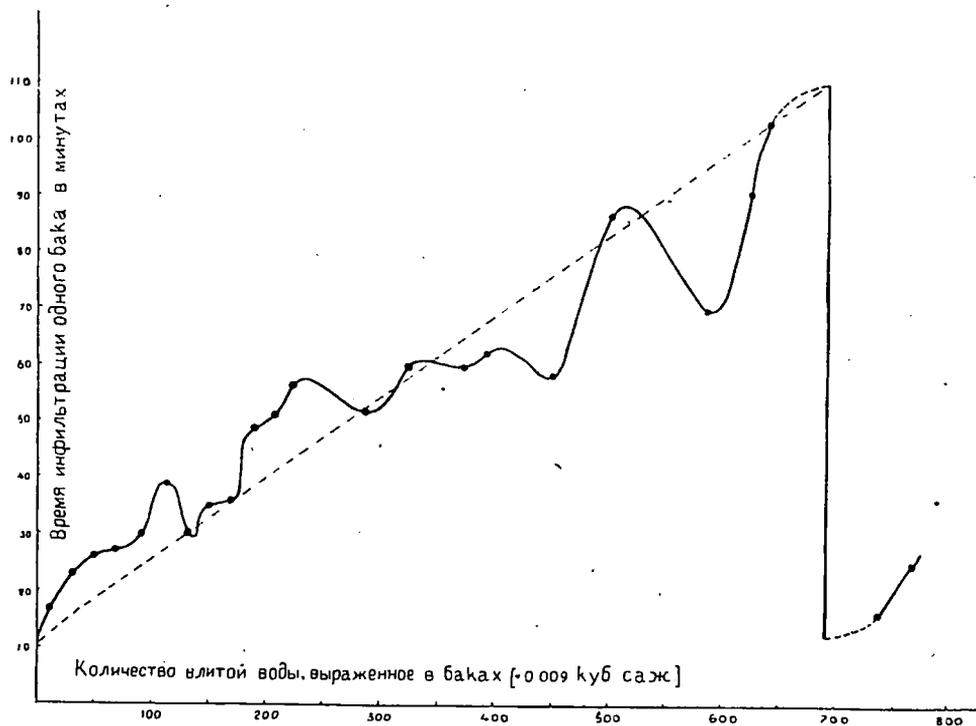
Для объемов же в 10 или 20 баков закономерность вполне очевидна, хотя все же имеет исключения.

Нижеследующая таблица содержит результаты наших наблюдений.

ТАБЛИЦА VI.

Группы влитых баков.	Продолжительность вли- вания в минутах.		Группы влитых баков.	Продолжительность вли- вания в минутах.	
	Для всей группы.	Средняя для одного бака.		Для всей группы.	Средняя для одного бака:
1-й—20-й	346	17	373	60	60
21—40	461	23	392—393	124	62
41—60	512	26	439	55	} 58
61—80	548	27	441—442	121	
81—100	601	30	447	58	} 87
101—120	772	39	501—502	175	
121—140	599	30	583—584	140	70
141—160	694	35	620—621	183	91
161—180	717	36	641	104	104
181—200	974	49	Чистка шурфа.		
201—220	1048	52			
221—235	850	57	736—739	65	16
284—285	103	52	763—770	202	25
326	60	60			

Фиг. 11, составленная по цифрам таблицы VI, представляет результаты нашего опыта над заиливанием, выраженные графически.



Фиг. 11. Замедление фильтрации вследствие заиливания стенок и дна шурфа.

Эти результаты можно выразить еще иначе, а именно: мы пропустили до чистки 690 баков по 0,009 куб. саж. каждый. Это количество воды прошло чрез дно шурфа № 3, имеющее площадь 0,08 кв. саж. (табл. IV). Поэтому чрез 1 кв. саж. породы пропущено было

$$\frac{690 \times 0,009}{0,08} = 78 \text{ куб. саж.}$$

После этого тот объем воды, какой уходил в начале опыта за 11 минут (фиг. 11), стал требовать для своего впитывания 111 минут, т.-е. водопропускная способность породы уменьшилась в 10 раз.

3. Практические выводы.

Как я упоминал выше, эти наблюдения для строителей имеют второстепенный интерес.

Они показывают, что с течением времени плотина должна заиливаться, и утечка из водохранилища будет становиться все меньше.

Замечу, что заиливание пород плотины будет происходить, конечно, гораздо медленнее, чем это мы наблюдали в шурфах. Потому что вода водохранилища близ плотины будет гораздо чище нынешней речной воды, которую мы вливали в наши шурфы.

VII. Общие замечания о примененном нами методе кажущихся скоростей.

1. Четыре основные формулы для определения дебита подземного потока.

В этой части я выясню ту роль, которую может играть, и то место, которое может занимать в гидрогеологии метод кажущихся скоростей, каковым выполнена главная часть нашей работы.

Одной из главнейших задач практической гидрогеологии является определение дебитов подземных потоков.

Приведу основные формулы, по которым определяется этот дебит Q

$$Q = \varphi \omega v \dots \dots \dots (16)$$

Здесь: φ — коэффициент пористости породы, в которой движется поток, т.-е. среднее отношение площади пор в поперечном к струям сечении породы к полной площади сечения;

ω — полная площадь поперечного сечения потока;

v — средняя действительная скорость движения воды в этом сечении.

Эта формула (16) абсолютно верна при неменяющейся температуре ¹⁾, она независима ни от каких не вполне точных положений.

¹⁾ При разных температурах при прочих равных условиях Q будет различно. Ср. последнюю выноску в III. 3.

Это замечание о температуре надо иметь в виду при всех четырех приводимых здесь формулах дебита.

Если мы положим

$$\varphi v = c,$$

называя величину c , согласно с Рихертом ¹⁾, кажущейся скоростью фильтрации, тогда уравнение (16) обратится в такое:

$$Q = \omega c \dots \dots \dots (17)$$

Эта формула является также независимой ни от каких допущений.

Теперь примем справедливой формулу Dupuit:

$$i = \mu v \text{ или } v = ki.$$

Эта формула справедлива лишь для пород, проницаемых en petit (напр., для песков). Для пород же, проницаемых en grand (напр., трещиноватые известняки), она должна быть заменена такой:

$$v = k' \sqrt{i}.$$

Здесь: v имеет то же значение, что и раньше;

k (и k') — постоянный для данной породы коэффициент скорости фильтрации ²⁾.

i — напорный градиент, т.-е. потеря напора на единицу пути потока.

Тогда вместо формулы (16) получаем:

$$Q = \varphi k \omega i \dots \dots \dots (18)$$

$$Q' = \varphi k' \omega \sqrt{i} \dots \dots \dots (18')$$

Наконец, полагая

$$\varphi k = k_1,$$

назовем k_1 „коэффициентом проводимости“ ³⁾.

Тогда получим:

$$Q = k_1 \omega i \dots \dots \dots (19)$$

$$Q' = k_1' \omega \sqrt{i} \dots \dots \dots (19')$$

Эти четыре формулы дебита (16, 17, 18, 19) можно назвать основными формулами. Из них выводятся или к ним сводятся все другие, могущие иметь весьма разнообразный вид.

При различных случаях практики бывает выгодно пользоваться той или иной из этих формул в зависимости от того, какие из входящих в них величин удобнее или точнее можно определить.

Но независимо от различных частных случаев можно дать сравнительную оценку степени точности всех этих формул.

¹⁾ См. первую выноску в III. 1.

²⁾ А. А. Краснополюский, I. с., стр. 44.

³⁾ Slichter (I. с., стр. 20) называет этот коэффициент именно так (transmission constant) или еще „максимальным единичным притоком“ (maximum flow — стр. 22 — 24). Последний термин менее удачен, так как напорный градиент i может быть больше 1, и потому чрез единицу площади может просачиваться количество воды, большее чем k_1 .

Для этого обращаю внимание на то, что первая пара формул не зависит от равенства $D \text{ Dupuit } i = \mu v$, а вторая пара справедлива лишь при справедливости этого равенства.

Поэтому мне предстоит выяснить здесь, что представляет собою равенство $D \text{ Dupuit}$. Это я и делаю в следующей главе 2.

2. Основной закон гидрогеологии.

Всякая теоретическая (дедуктивная) наука выводится из истин трех родов: из аксиом, постулатов и опытом установленных законов.

Теоретическая гидрогеология строит свои выводы при помощи истин и выводов смежных наук: геометрии, математики вообще, физики, гидравлики и других.

Но помимо этих, так сказать, чужих истин теоретическая гидрогеология положила себе в основу трудами французских инженеров-ученых *Дарсу* и *Dupuit* еще один особый закон несомненно опытного происхождения.

В 1856 году появилась цитированная выше ¹⁾ работа *Н. Дарсу*, в которой он между множеством другого материала описывает свои опыты над вертикальным просачиванием воды сквозь песчаные фильтры и приводит, как результат этих опытов, упоминавшуюся уже формулу, известную в науке под его именем:

$$q = k \frac{h + e}{e} s.$$

Если написать эту формулу в обозначениях наших четырех формул, то закон *Дарсу* получает вид:

$$Q = k_1 i \omega.$$

Другими словами, наша формула (19) и есть формула *Дарсу*.

В следующем 1857 году *J. Dupuit* представил в Парижскую Академию Наук работу, озаглавленную: „*Mémoire sur le mouvement de l'eau à travers les terrains perméables*“. Этот мемуар был включен автором потом (1864) в несколько измененном виде в качестве VIII главы во второе издание его книги, выше цитированное ²⁾.

В мемуаре *Dupuit* прежде всего выводит свою формулу, справедливую для движения воды в пористых породах по любому направлению:

$$i = \mu v,$$

а затем, пользуясь ею, создает, повидимому впервые, теорию движения подземных вод, составляющую весьма существенную часть современной теоретической гидрогеологии. Применением своей теории к решению некоторых практических вопросов автор также занимается в своем мемуаре.

Свою главную формулу *Dupuit* выводит двумя путями. Во-первых, из эмпирических формул *Ргопу* для движения воды:

$$\text{в каналах: } i = \frac{\gamma}{\omega} (\alpha u + \beta u^2)$$

¹⁾ См. выноску в III. 2.

²⁾ См. выноску в IV. 2.

и трубах:

$$\frac{1}{4} Di = \alpha u + \beta u^2.$$

Имея в виду, что при обычных движениях воды в породах скорость u весьма мала, Dupuit показывает, что членом с u^2 можно пренебречь, и получает:

$$i = \mu u.$$

Во-вторых, если вышеприведенную формулу Darcy $Q = k_1 i \omega$ разделим соответственно на $\frac{\varphi \omega}{\mu} = k_1 \omega$, обозначая $\frac{\varphi}{\mu} = k_1$, то получим:

$$\mu \frac{Q}{\varphi \omega} = i, \text{ или } i = \mu u.$$

Итак, из закона Darcy формула Dupuit вытекает, как неперенное следствие. Можно сказать, что формула Dupuit есть лишь иная формулировка закона Darcy.

Однако, значение мемуара Dupuit заключается не только в том, что он дал новую формулировку известного уже закона, но также и в том, что 1) он показал, что закон Darcy есть неперенное следствие формул Poiseuille, и что 2) он распространил (в форме скрытого постулата) закон Darcy на случай фильтрации жидкости чрез пористые породы по какому угодно направлению, а не только по вертикали вниз, как это было сделано Darcy.

Опыты Poiseuille и других над фильтрацией по капиллярным трубкам имеют на мой взгляд несравненно меньшую убедительность для гидрогеологии, хотя и они привели в общем к формулам того же вида, что и формулы Darcy и Dupuit.

Скрытый постулат Dupuit был раскрыт позднейшими экспериментаторами, проверившими справедливость закона Darcy для боковой фильтрации. Об этом я уже упоминал¹⁾. Припомню, что опыты дали отклонения от закона до 128% в отдельных случаях.

Таким образом закон Darcy-Dupuit есть опытный закон, верный лишь приблизительно.

3. Сравнительная оценка степени точности четырех основных формул для определения дебита подземного потока.

Сопоставляю приведенные выше четыре формулы:

А. Независящие от закона Darcy-Dupuit.

1. $Q = \varphi \omega v$
2. $Q = \omega c$, где $c = \varphi v$.

¹⁾ III. 3.

В. Зависящие от закона Darcy-Dupuit.

а. Для пород, проницаемых en petit: б. Для пород, проницаемых en grand:

$$3. \quad Q = k\varphi\omega i$$

$$3'. \quad Q = k\varphi\omega\sqrt{i}$$

$$4. \quad Q = k_1\omega i, \text{ где } k_1 = \varphi k.$$

$$4'. \quad Q = k_1\omega\sqrt{i}, \text{ где } k_1 = \varphi k.$$

Напишу эти формулы для большей наглядности дальнейших рассуждений в таком виде:

$$1. \quad \frac{Q}{\omega} = \varphi v$$

$$2. \quad \frac{Q}{\omega} = c$$

$$3. \quad \frac{Q}{\omega} = \varphi k i$$

$$3'. \quad \frac{Q}{\omega} = \varphi k \sqrt{i}$$

$$4. \quad \frac{Q}{\omega} = k_1 i$$

$$4'. \quad \frac{Q}{\omega} = k_1 \sqrt{i}.$$

Из этого видно, что, по какой бы из этих четырех формул я ни определял дебит, — я должен прежде всего найти (посредством горноразведочных работ) поперечное сечение ω потока.

Затем гидрогеологическими работами или опытами должны быть найдены величины:

$$1. \quad \varphi, v$$

или:

$$2. \quad c$$

или:

$$3. \quad \varphi, k, i$$

или, наконец:

$$4. \quad k_1, i.$$

Три из этих шести величин характеризуют гидрогеологические свойства породы, вмещающей данный поток, раз навсегда (при определенной температуре). При каком угодно потоке в той же породе эти величины сохраняют свое значение. Это суть

коэффициент пористости	φ
коэффициент скорости фильтрации	k
коэффициент проводимости	$k_1 (= k\varphi).$

Их можно назвать гидрогеологическими константами горной породы.

Остальные три величины:

действительная скорость	v
кажущаяся скорость	$c (= \varphi v)$
напорный градиент	i

для разных потоков в одной и той же породе имеют разное значение. Их можно назвать характеристиками потока, при чем надо помнить, что эти характеристики могут быть или постоянными во всех сечениях потока, или переменными. К этим же характеристикам можно отнести Q и ω .

После этих предварительных соображений перехожу к оценке различных формул.

Для применения последней пары формул, как видно из предыдущего, необходимо знать прежде всего, к какой категории относится данная порода, к проницаемым *en petit* или к проницаемым *en grand*. Так как это сведение нередко на практике отсутствует, и так как можно думать, что резкого распада пород на эти две группы не существует, — то это обстоятельство таит в себе первый источник меньшей точности формул 3, 4 сравнительно с формулами 1, 2.

Далее. Было указано, что закон *Darcy-Dupuit* является лишь приближенным законом. В этом второй источник погрешности последней пары формул по сравнению с первой парой.

Поэтому, если все величины φ , k , k_1 , v , c , i мы можем измерить одинаково точно, или если мы не знаем, какие из них мы можем измерить более точно и какие менее, — тогда определение дебита Q по одной из первых двух формул приведет нас ближе к истине.

При одинаковой или при неизвестной точности определения всех шести величин можно пойти даже дальше и заметить, что, чем меньше величин надо будет определять для вычисления Q , — тем за меньшую ошибку можно будет ручаться. С этой точки зрения наши четыре формулы по степени точности расположатся в таком порядке:

2, 1, 4, 3.

Таким образом ясно, что формула с кажущейся скоростью c является наиболее надежной, и что формулы с напорным градиентом i — наименее надежны.

Однако методы опытного определения каждой из шести величин разработаны в настоящее время далеко не одинаково.

Проще всего и точнее всего определяется напорный градиент i . Для этого нужны подходяще расположенные колодцы или скважины и нивелировка.

Определение действительной скорости v разработано довольно подробно (методы *A. Thiem, Ch. Slichter, Trillat*, введшего употребление флюоресцеина).

Методы для определения φ также излагаются в сочинениях по гидрогеологии, хотя это определение производится обычно чисто лабораторным путем, что совершенно неправильно для пород рыхлых.

Для определения k и k_1 также разработаны методы (*Darcy, A. Thiem, Slichter, Richert*), нередко, правда, слишком сложные и косвенные.

Методы же для определения кажущейся скорости c , насколько мне известно по литературе, не разрабатывались гидрогеологами.

Такое состояние техники гидрогеологии может во многих случаях менять указанный выше порядок наших четырех формул и делает понятным то обстоятельство, что исследователи пользуются для определения дебитов подземных потоков чаще всего формулой четвертой (формулой *Darcy*): $Q = k_1 \omega i$, определяя k_1 косвенно, посредством пробных откачек из ряда колодцев (*A. Thiem, J. G. Richert*).

Сказанным здесь выясняется, что метод определения дебита подземного потока посредством наблюдения его кажущихся скоростей есть а priori наиболее точный метод; но вследствие малой разработанности его ныне им вовсе или почти не пользуются.

Кроме этого значения, методы определения кажущихся скоростей получают интерес благодаря той связи, которая существует между кажущейся скоростью c и коэффициентом проводимости (коэффициентом Дарси) k_1 . Остановлюсь на этом вопросе, затронув его в более общей форме.

4. Связи между гидрогеологическими константами горной породы и характеристиками потока.

Здесь я поясню, что представляют собою величины c , k , k_1 , рассматривая их с различных точек зрения.

Обращаюсь для этого к четырем основным формулам, сопоставленным в начале предыдущей главы.

О кажущейся скорости c . Из формулы $c = \varphi v$ следует, что c есть та скорость, какую должен бы иметь поток при сохранении своей производительности, если бы пористость породы, в которой он течет, равнялась 1.

При $\varphi = 1$ имеем:

$$c = 1. v = v.$$

Из формулы же

$$\frac{Q}{\omega} = c$$

видим, что c есть то количество воды, которое проходит чрез квадратную единицу поперечного сечения потока.

О коэффициенте скорости фильтрации k . Из формулы $v = ki$ следует, что k есть та скорость, которую будет иметь в данной породе поток при напорном градиенте равном 1.

При $i = 1$ имеем:

$$v = k. 1 = k.$$

О коэффициенте проводимости (коэффициенте Дарси) k_1 . Из формулы

$$\frac{Q}{\omega} = k_1 i$$

следует, что k_1 есть то количество воды, которое проходит чрез единицу площади сечения в данной породе при напорном градиенте, равном 1.

При $i = 1$ имеем:

$$\frac{Q}{\omega} = k_1. 1 = k_1.$$

Из формул (2) и (4) следует:

$$\frac{Q}{\omega} = c = k_1 i.$$

И поэтому k_1 можно рассматривать как ту кажущуюся скорость, какую имел бы в данной породе поток при напорном градиенте равном 1.

При $i=1$ имеем:

$$c = k_1 \cdot 1 = k_1$$

Последнее соотношение является для меня сейчас особенно существенным. Оно показывает, что, если мы знаем методы определения кажущейся скорости, то, определяя эту величину при напорном градиенте, равном единице, мы определим этим самым коэффициент проводимости k_1 в формуле Дагсу.

В этом второе значение методов определения кажущихся скоростей.

5. Значение методов определения кажущихся скоростей.

Итак, мы видим, что умение определять кажущиеся скорости движения воды подземных потоков 1) дает нам в руки один из лучших способов определять дебиты этих потоков; 2) дает нам в руки один из способов определения коэффициента проводимости k_1 в формуле Дагсу.

Настоящая работа представляет примеры практического выполнения этими методами указанных определений. Часть V и отчасти III дает пример определения первой категории. Часть III — дает пример определения второй категории.

В этом, на мой взгляд, заключается общее значение моей работы.

Те методы определения кажущихся скоростей, какие мы выработали, далеки еще от совершенства. Они пригодны лишь для определения верхних пределов кажущихся скоростей. Мне представляется вероятным, что их легко было бы изменить в том направлении, чтобы полученные цифры давали низшие пределы кажущихся скоростей. Главным образом пришлось бы изменить лишь способы подсчета.

Несравненно труднее выработать такие методы, которые давали бы величину более или менее близкую к истинному значению кажущейся скорости. Для полной уверенности выработка таких методов требовала бы постановки ряда опытов, допускающих взаимную проверку, а также и проверку всякими другими средствами.

С первого взгляда представляется ясным, например, что, если мы углубим шурф или скважину в подземный поток до самого его ложа и станем вливать в него воду, поддерживая ее уровень на 0,01 или даже на 0,005 саж. выше нормального, и разделим затем количество уходящей воды на половину смоченной боковой поверхности колодца или скважины, то мы получим кажущуюся скорость фильтрации при напорном градиенте ничтожно большем, чем напорный градиент исследуемого потока. По крайней мере рассуждения, оправдывающие такое мнение, будут иметь не меньшую степень строгости, чем рассуждения А. Тима или Рихерта при их определениях коэффициента Дагсу k_1 посредством пробных откачек. Однако, утверждать точность такого способа получения величины c я не решился бы без ряда взаимно проверяющих опытов.

Пока же следует сказать, что выработанные и примененные нами методы обладают большими преимуществами во всех тех случаях, когда нам надо получить верхний предел подземного потока. Например: потеря через фильтрацию, водоотлив из горных выработок.

В случаях же, требующих установления низшего предела дебита подземного потока [например, при проектировании водоснабжения и в особенности при необходимости цифр, близких к истинному (среднему) значению дебита], выработанные нами способы менее применимы.

Для этих случаев методы определения кажущихся скоростей подземных потоков нуждаются в дальнейшей разработке.

Февраль, 1916 г.

Наблюдения над фильтрацией в малопроницаемых коренных породах.

А. Ф. Вайполина.

(Observations sur la filtration dans les roches-mères peu perméables. Par A. Vaïpolin)

1. Общие данные о шурфе, избранном для наблюдений.

Шурф № 4 заложен на южном (к реке) склоне левобережной горки, на пересечении оси плотины с лощинкой, проходящей по этому склону параллельно реке (см. план, фиг. 1). Шурф пройден в обнажении коренных пород, и назначение его было проследить состояние их (степень разрушенности, трещиноватости и пр.) на некоторую глубину, а также и сделать в нем опыт фильтрации через эти породы.

В указанной лощинке предположено устройство свободного водослива на случай переполнения водохранилища, поэтому шурфом № 4 и рядом других (№№ 5, 6, 7, 8 и 29) требовалось также определить, насколько прочным ложем для водослива будут эти коренные породы.

Породы, пройденные шурфом — красные сиенит-порфиры — выветрены и трещиноваты настолько, что углубка производилась больше при помощи кайлы, а также ломика и балды. Взрывные же работы в помощь поименованным применялись лишь на глубине 1 — 1,5 сажени до дна; здесь сиенит-порфиры были крепче, но все-таки мелко-трещиноваты.

Вся глубина шурфа 9,60 саж. и сечение его $0,66 \times 0,54$ саж. Устье шурфа находится между 119 и 120 горизонталями (119,45 с.), т. е. при уровне воды в р. Чу 95,75 с. (по оси плотины), устье будет на 23,70 с. выше горизонта воды в реке. Дно шурфа (при глубине его от поверхности 9,6 с.), будет находиться в теле горы на 14,10 с. над уровнем воды в реке.

2. Цель опыта.

Произведенные мною здесь наблюдения имели целью определить верхний предел коэффициента проводимости k_1 , для плотных порфировых сиенитов, т. е. требовалось определить такое количество воды, больше которого в этой породе не может просачиваться чрез 1 саж.² нормального к струям сечения при напорном градиенте равном 1. Таким образом, эта моя работа примыкала к работам, описанным выше А. К. Болдыревым в III. 4.

3. Постановка опыта.

Вода для опыта доставлялась к устью шурфа (на высоту — 24 саж.) при помощи небольшого ручного нагнетательного насоса, взятого на время от алмазно-бурильного станка. Насос был поставлен под горою у реки, и вода нагнеталась к шурфу по трубкам $d=1''$ и пеньковому рукаву, общая длина которых была около 50 саж. На такую высоту насос давал лишь 0,001 саж.³ в минуту. Насос требовал работы трех рабочих.

Наблюдение над фильтрацией в шурфе № 4 предполагалось вести по тому же методу, как и в шурфах №№ 3, 3', 6 и проч., т. е. постоянным приливанием держать воду в шурфе ¹⁾ на одном горизонте, сохраняя, таким образом, постоянным напор и фильтрующую поверхность дна и стенок шурфа. По количеству „прибавленной“ за известный промежуток времени воды можно вычислить количество воды, уходящей через единицу фильтрующей поверхности.

Как увидим ниже, предварительный опыт в этом шурфе показал, что величина эта — k_1 , несмотря на кажущуюся мелкую трещиноватость пород, на глубине от поверхности 9,40 — 9,60 саж., — невелика. Это дало возможность увеличить масштаб опыта: наполнить шурф водою на большую глубину над дном и таким образом увеличить фильтрующую поверхность стенок, а для большей точности измерения количеств убывающей воды производить через промежутки времени 12 — 24 часа.

4. Предварительные опыты.

В 10¹/₂ часов утра 15 августа в шурфе была влита вода, на глубину над дном 0,16 саж., — что соответствовало уровню ее над горизонтом в реке 14,26 саж., а от дневной поверхности — 9,44 саж.

Сечение шурфа на этой глубине $0,40 \times 0,60 = 0,24$ саж.². Измерения понижения уровня воды в шурфе производились с поверхности, при помощи поплавка (деревянная доска размер $0,15 \times 0,06 \times 0,01$ саж.), прикрепленного на мерной стальной ленте.

Через 6 часов, т. е. к 4¹/₂ ч. дня, уровень воды в шурфе понизился на 0,006 — 0,007 саж. (возьмем 0,0065).

На основании этих данных сделаем вычисления:

Объем ушедшей за это время воды будет $0,24 \times 0,0065 = 0,0156$ саж.³;

Фильтрующая поверхность стенок и дна шурфа (средняя за 6 часов)

$$\frac{(0,16 + 0,1535) \times 2 (0,40 + 0,60) + 0,24}{2} = 0,553 \text{ саж.}^2.$$

Это даст в 1 минуту через 1 саж.² $\frac{0,00156}{0,553 \cdot 6 \cdot 60} = 0,0000078 \text{ саж.}^3/1' \text{ с.}^2$ ²⁾

¹⁾ При небольшой фильтрующей поверхности.

²⁾ Здесь я не задаюсь вопросом о том, при каком напорном градиенте происходила фильтрация воды в данном случае, потому, что эти опыты и полученные из них цифры имеют лишь предварительный характер. Главный опыт описан ниже.

Следующее измерение понижения уровня воды в шурфе было сделано в 6¹/₂ часов утра 18 августа, т. - е. через 68 часов от начала опыта. Уровень воды опустился на 0,025 саж., т. - е. до 0,135 саж.

Вычисляем:

Объем ушедшей воды $0,24 \times 0,025 = 0,006$ саж.³.

$$\text{Фильтрующая поверхность} \frac{0,16 + 0,135}{2} \cdot 2 (0,40 + 0,60) + 0,24 = \\ = 0,535 \text{ саж.}^2.$$

$$\text{Таким образом в 1 минуту через 1 саж.}^2 \text{ получим } \frac{0,006}{0,535 \cdot 68 \cdot 60} = \\ = 0,0000027 \text{ с}^3 / 1' \text{ с}^2.$$

В 6¹/₂ часов утра 18 августа уровень воды в шурфе был поднят до 0,19 с. над дном.

Измерение в 6¹/₂ часов вечера, т. - е. через 12 часов, показало, что глубина воды 0,178 с., т. - е. убыло 0,012 с.

Вычисляем:

Объем ушедшей воды $0,24 \times 0,012 = 0,00288$ саж.³.

$$\text{Фильтрующая поверхность} \frac{0,19 + 0,178}{2} \times 2 (0,40 + 0,60) + 0,24 = \\ = 0,608 \text{ саж.}^2.$$

$$\text{Тогда в 1' через 1 саж.}^2 \frac{0,00288}{0,608 \cdot 12 \cdot 60} = 0,0000066 \text{ с}^3 / 1' \text{ саж.}^2.$$

Таким образом опыт показывает, что количество уходящей воды через единицу площади в единицу времени в начале опыта больше, а затем уменьшается. Но даже и в начале не превосходит стотысячной доли куб. саж. в одну минуту через 1 саж.² фильтрующей площади.

В среднем в первые 6 час. 0,0000078 с³ / 1'. с²,
 а в следующие 12 " 0,0000066.
 68 " 0,0000027.

Объяснить это, как мне кажется, можно лишь постепенным закупориванием трещинок в породе ¹⁾). Закупоривание происходит, во-первых, от разбухания смоченных водою глинистых частичек в трещинах ²⁾), а во-вторых — от отложения в них ила из воды, при условии, если скорость движения воды по трещинам достаточно мала для этого, — что, повидимому, имеет место.

Сама по себе вода, накачиваемая в шурфе, была чистой, прозрачной. Вливалась она туда по опущенной вертикально в центре шурфа трубке; но трубка не доходила до дна шурфа, поэтому вода, отчасти разбрызгиваясь при падении, увлекала частички породы со стенок шурфа. То же происходило и от волнения поверхности воды в шурфе падающей туда струей. Предполагать количество ила значительным все-таки трудно.

¹⁾ См. часть VI.

²⁾ В более ясных трещинках глинистый материал заметен.

5. Главный опыт. Общие данные.

Затем было приступлено к накачиванию воды для большого опыта.

После четырех дней накачивания¹⁾, к 5 часам вечера 28 августа, глубина воды в шурфе была 2,85 с. от дна, от дневной же поверхности (устья шурфа) 6,75 с., и около 17 саж. над уровнем воды в реке. Это будет на высоте 112,7 горизонтали. За начало наблюдений и примем 5 часов вечера 28/VIII.

Ежедневно в это время производилось измерение понижения уровня воды в шурфе. Сечение его тоже измерялось.

Понижение уровня за первые сутки выразилось цифрой 0,18 с., за вторые — 0,11 с., за третьи — 0,065 с., за четвертые — 0,042 с., на шестые упало даже до 0,022 с., продолжая уменьшаться и далее.

В общем за 3½ недели горизонт воды в шурфе понизился лишь на 0,83 — 0,85 с. Понижение это было в последние дни $\sim 0,01$ с. за сутки.

Количество испарившейся за это время воды, вероятно, очень мало, так как над водою в шурфе находился слой влажного воздуха в 7,00 с. толщиной, и температура в шурфе не поднималась сколько-нибудь значительно, поэтому испарение в расчет не принимается.

6. Величина фильтрующей поверхности.

По полученным наблюдениями данным вычислим сначала кажущуюся скорость фильтрации²⁾, а затем и верхний предел коэффициента проводимости k_1 , т. е. той же кажущейся скорости, но при напорном градиенте равном единице.

Объем уходящей за сутки воды мы получаем ежесуточными измерениями, зная высоту слоя и сечение шурфа.

Полупериметр горизонтального сечения шурфа на уровне верхней поверхности воды равен $0,65 + 0,55$ саж. (см. выше), а на уровне дна $= 0,60 + 0,40$ саж.

Поэтому, площадь стенок шурфа (фильтрующая поверхность), находящаяся под водою, в начале опыта будет

$$\frac{2 [(0,65 + 0,55) + (0,60 + 0,40)] \times 2,85}{2} = 6,20 \text{ саж.}^2.$$

Площадь дна не принята во внимание, так как оно „заилилось“ (завалено) во время вливания воды в шурф. Кроме того и часть стенок надо исключить из вычисленной выше цифры 6,20 саж.² по следующим соображениям.

Стенки шурфа закреплены не были, так как во время углубки его (даже при взрывных работах) стенки были достаточно прочными, но во время месячного стояния под водою стали обваливаться, и шурф после опыта оказался заваленным на некоторую глубину.

¹⁾ Работа велась лишь дном, насос небольшой, а высота нагнетания воды 24 саж.

²⁾ Т. е. так же, как и по предварительным опытам, лишь количество воды, уходящей в единицу времени через единицу фильтрующей площади. Для получения скорости движения воды нужно знать еще пористость данной породы.

Свежий завал, состоящий из более или менее крупных кусков породы, конечно, пропускает воду, но трудно сказать, в какой мере будут фильтровать стенки шурфа, находящиеся под завалом. Чтобы не получить при вычислениях слишком малую величину фильтрации, не будем брать в расчет всей фильтрующей поверхности шурфа, а возьмем лишь поверхность от первоначального уровня воды до завала, полученную обмером после опыта.

Величина эта получилась равной 3,50 саж.² против 6,20 саж.² всей фильтрующей поверхности шурфа.

7. Вычисления кажущихся скоростей фильтрации.

Ход вычислений таков: понижение уровня воды в шурфе в первые сутки было 0,18 саж. (см. табл. VII) . (1)

Сечение шурфа в начале опыта:

$$0,64 \times 0,55 = 0,36 \text{ саж.}^2 \text{ . . . (2 и 3) .}$$

То же в начале вторых суток:

$$0,67 \times 0,60 = 0,40 \text{ саж.}^2$$

Значит, объем ушедшей воды будет:

$$\frac{0,36 + 0,40}{2} \cdot 0,18 = 0,0684 \text{ саж.}^3 \text{ . (4)}$$

а площадь обнажившихся стенок шурфа:

$$\frac{2 (0,64 + 0,55 + 0,67 + 0,60)}{2} \cdot 0,18 = 0,44 \text{ саж.}^2 \text{ . . (5)}$$

Далее, нам нужно знать фильтрующую площадь за эти сутки.

Величину эту, равную площади стенок шурфа, находящихся под водой с начала наблюдения, ~ 6,20 саж.², мы решили взять для вычислений = 3,50 саж.². Но площадь эта не остается постоянной в течение суток, а уменьшается (так как вода в шурфе убывает); уменьшение идет, как показал и предварительный опыт, неравномерно: постепенно замедляясь, т. е. в первую половину суток убыль больше, а во вторую меньше. Но мы, для простоты подсчета, будем брать среднюю суточную величину.

В начале первых суток фильтрующую площадь мы берем 3,50 саж.², а к началу вторых она будет:

$$3,50 - 0,44 = 3,06 \text{ саж.}^2 \text{ (6 и 6')}$$

таким образом средняя будет

$$(3,50 + 3,06) : 2 = 3,28 \text{ саж.}^2 \text{ (7 и 7')}$$

Объем профильтровавшейся через площадь 3,28 саж.² за сутки воды мы измерили — 0,0684 саж.³; тогда через одну квадратную сажень в минуту мы получим:

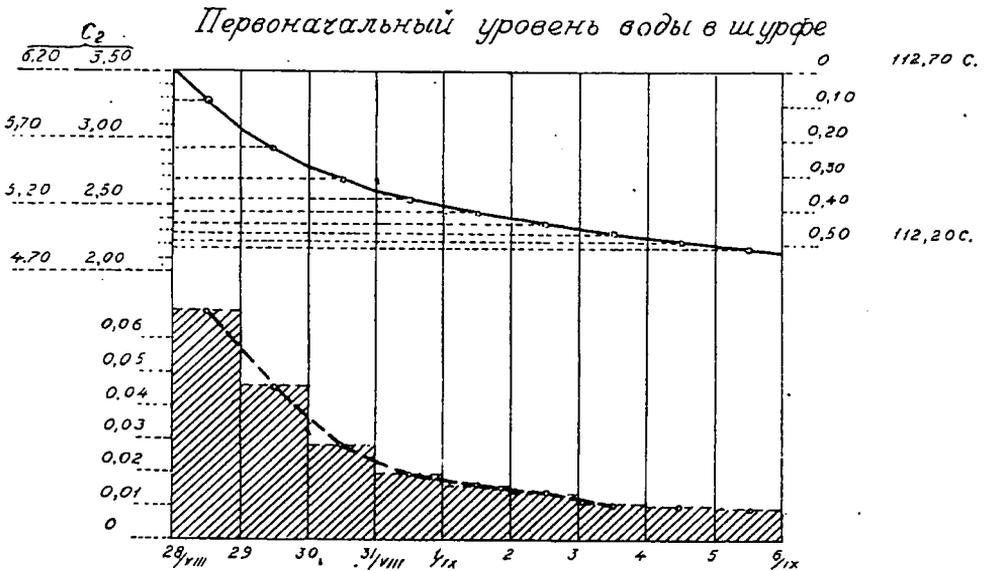
$$\frac{0,0684}{3,28 \cdot 24 \cdot 60} = 0,000145 \text{ с}^3 / 1' \text{ с}^2 \text{ (8 и 8')}$$

Приложенная таблица VII содержит в себе данные наблюдений и сделанные на основании их, вышеуказанным порядком, вычисления.

ТАБЛИЦА VII.

Данные о фильтрации в шурфе № 4, в снелит-порфирах, на глубине от поверхности обнажения 6,75 — 9,6 саж.

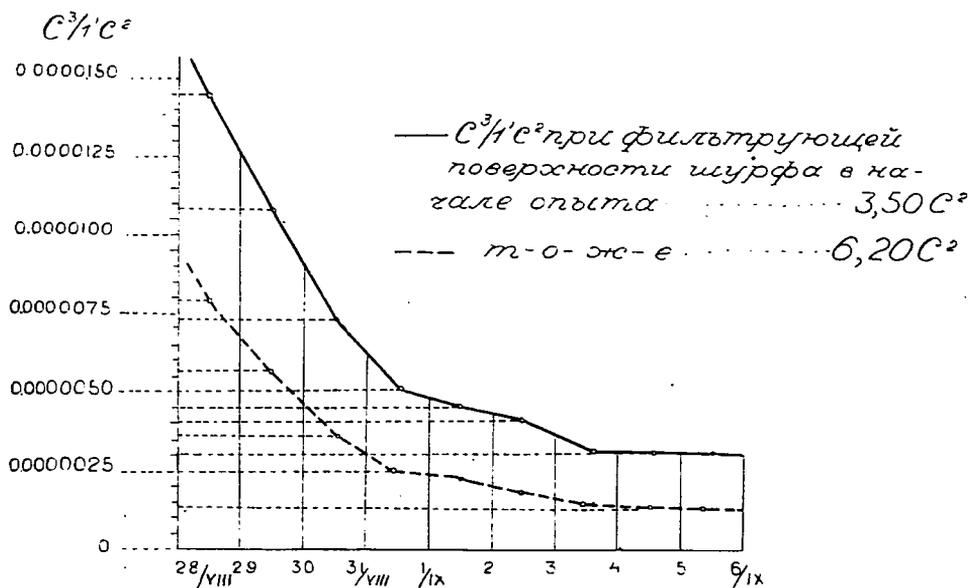
	Пониж. уровня воды за сутки	Сечение шурфа во время изме- рения	Площадь сече- ния саж. ²	Объем уходя- щей за сутки воды	Суточное умень- шение фильтр. поверх. шурфа	Принимаемая в расчет фильтрую- щая поверхность шурфа в саж. ²				с ³ /л' с ² при	
						I		II		I	II
						6	7	6'	7'	8	8'
28/VIII	0,18	0,64 × 0,55	0,36	0,0684	0,44	3,50	2,28	6,20	5,98	0,0000145	0,0000079
29	0,11	0,67 × 0,60	0,40	0,0456	0,28	3,06	2,92	5,76	5,62	0,0000108	0,00000564
30	0,065	0,68 × 0,63	0,43	0,0284	0,17	3,78	2,69	5,48	5,39	0,0000073	0,00000366
31	0,042	0,685 × 0,65	0,445	0,0189	0,11	2,61	2,55	5,31	5,255	0,00000514	0,0000025
1/IX	0,035	0,688 × 0,66	0,456	0,0161	0,095	2,50	2,45	5,20	5,15	0,00000456	0,0000023
2	0,030	0,69 × 0,672	0,463	0,0140	0,082	2,40	2,36	5,11	5,07	0,0000041	0,00000191
3	0,022	0,69 × 0,082	0,47	0,0104	0,060	2,32	2,29	5,03	5,00	0,00000316	0,00000144
4	0,021	0,69 × 0,689	0,476	0,0101	0,058	2,26	2,23	4,97	4,94	0,00000314	0,00000141
5	0,020	0,70 × 0,695	0,486	0,0097	0,055	2,20	2,175	4,91	4,88	0,00000312	0,00000137
6/IX		0,70 × 0,70	0,49			2,15		4,855			



— Уменьшение фильтрующ. поверхн. и понижение ур. воды.

----- Объем воды, убывающей за сутки.

Фиг. 12, диаграмма 1.



Фиг. 12, диаграмма II.

8. Графическое изображение результатов.

Те же данные я выразил графически на диаграммах фигуры 12.

Здесь на обеих диаграммах по оси абсцисс отложены сутки, а по оси ординат различные величины, содержащиеся в таблице VII.

А именно:

Диаграмма I. Ординаты верхней кривой, отложенные от верхней горизонтальной линии вниз, показывают:

- 1) Понижение уровня воды за каждые сутки.
- 2) Уменьшение фильтрующей поверхности стенок шурфа.

Ординаты нижней кривой, отложенные обычным способом от оси X, показывают объем всей уходящей из шурфа воды за сутки.

Диаграмма II показывает изменение в течение опыта кажущейся скорости фильтрации, т. е. количества уходящей в 1 минуту воды через квадратную сажень стенок шурфа, при фильтрующей поверхности в начале опыта в $3,5 \text{ саж.}^2$ — верхняя кривая и $6,2 \text{ саж.}^2$ — нижняя кривая¹⁾.

Как видно, все эти кривые в первые 3—4 суток падают круто; затем крутизна их уменьшается, и после 7—8 дней они становятся совсем пологими. Так, например, кажущаяся скорость фильтрации $0,0000145 \text{ саж.}^3/1' \text{ саж.}^2$ в первый день — падает на 7 день до $0,0000031 \text{ саж.}^3/1' \text{ саж.}^2$.

9. Значение кривых фигуры 12.

Все эти кривые, и в особенности кривые диаграммы второй, выражают собою закон заиливания горной породы, и в этом смысле они аналогичны кривой фиг. 11, приведенной выше А. К. Болдыревым.

¹⁾ См. фиг. 12, диаграммы I и II.

10. Сравнение результатов предварительных опытов и опыта главного.

Если мы сравним результаты опытов предварительного с последующим, причем для подсчета в последующем опыте возьмем всю находящуюся под водою поверхность шурфа (что весьма вероятно для первых дней), то увидим, что полученные величины близки друг к другу:

$$0,0000066 \text{ с}^3 / 1' \text{ с}^2$$

предварительного опыта за первые сутки против

$$0,0000079 \text{ последующего.}$$

Цифра предварительного опыта меньше, чем последующего; это и понятно: первый сделан на глубине 9,40 — 9,60 с. от поверхности, поэтому и породы тут должны быть плотнее, чем на глубине 6,75 — 9,60 с. при последующем опыте.

11. Вычисление верхнего предела коэффициента проводимости k_1 .

Наибольшее количество воды, уходящее в 1 минуту через 1 квадр. саж. из шурфа, есть верхний предел кажущейся скорости фильтрации при условиях нашего опыта. Эта величина по предыдущим данным 0,0000145 саж. Совершенно понятно, что эта величина зависит не только от гидрогеологических свойств исследуемой породы, но и от напорного градиента пробного потока.

Для практических целей нам важно знать не эту случайную величину, а ту кажущуюся скорость, какая была бы, если бы фильтрация происходила при напорном градиенте равном 1; другими словами, нам важно знать коэффициент проводимости k_1 данной породы.

Вычислить его среднюю величину из наших данных затруднительно. Вычислить же его верхний предел — легко.

Кажущаяся скорость будет тем больше, чем больше напорный градиент i . Поэтому имеем:

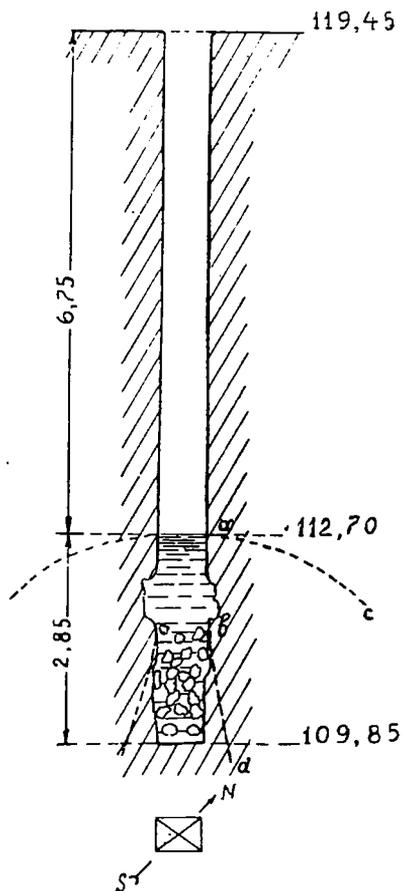
$$\frac{c}{k_1} = \frac{i}{1}$$

$$k_1 = \frac{c}{i} \text{)}^1$$

Чтобы найти верхний предел k_1 , надо взять верхний предел c и разделить на наименьшее возможное значение среднего напорного градиента, существовавшего при опыте.

Из фиг. 13 ясно, что наименьший напорный градиент для верхних струй, уходящих из шурфа, равен 0, а для нижних = 1. На самом деле и тот и другой будут больше этих величин (для струи bd — вследствие существования напора $a b$).

1) Сравните VII. 4.



Фиг. 13.

Поэтому приблизительно можно считать, что средний напорный градиент, при котором происходила фильтрация, в нашем шурфе не будет меньше

$$\frac{0 + 1}{2} = 0,5.$$

Поэтому верхний предел $k_1 = \frac{0,0000145}{0,5} = 0,0000290 \text{ с}^3/\text{с}^2 \text{ 1}' \simeq \simeq 0,00003 \text{ с}^3/\text{с}^2 \text{ 1}'$.

Выше этой величины k_1 в изучаемой породе подняться не может. Эта цифра и фигурирует в таблице IV А. К. Болдырева и в последующих его подсчетах.

Quelques expériences sur la filtration dans les roches in situ, en relation avec le projet d'un réservoir d'eau sur le fleuve Tchou, au Turkestan.

Par A. Boldirev.

Avec supplément:

Observations sur la filtration dans les roches-mères peu perméables.

Par A. Vaïpoline.

R É S U M É.

1. Les expériences décrites ci-dessus ont été accomplies en 1914, en relation avec le projet de construction d'un barrage pour un réservoir d'eau sur la rivière Tchou, devant servir à l'irrigation artificielle de la vallée de cette rivière.

2. Sur les fig. 1 et 2, on voit l'axe du barrage projeté, le relief de la contrée et sa coupe géologique.

3. Le chap. III résoud la question de la future perte en eau du réservoir par les flancs et le fond de la vallée, en dehors des limites du diaphragme imperméable. Pour cela, dans la formule $Q = \omega \varphi v^1) = \omega c$, 1) on a calculé la surface de la section transversale ω du courant souterrain dans les différentes roches, 2) on a déterminé par expérience le maximum de c , vitesse dite apparente de l'eau dans ces roches. L'expérience se faisait comme suit: on creusait dans la roche un puits n'atteignant pas le niveau hydrostatique et l'on y amenait avec précaution un courant d'eau continu, de façon à maintenir le niveau constant. On mesurait exactement la quantité d'eau A nécessaire à cela, la surface du fond du puits Ω et le temps employé M . On obtenait alors: $\max. c = \frac{A}{\Omega M}$. Le tabl. IV (p. 18)

donne, à la dernière colonne, la valeur de $\max. c = k_1$ pour les différentes roches, exprimée en sagène par 1'. La fig. 6 (p. 22) donne les limites maximales de la perte en eau (sur l'axe des ordonnées), suivant la profondeur à laquelle le diaphragme imperméable se trouve dans le fond rocheux.

4. Le chap. IV traite de la détermination de la vitesse réelle de filtration dans le deluvium du col nord (fig. 1). Dans ce but, on a exécuté l'expérience

1) Q = débit d'eau, ω = section transversale du courant souterrain, φ = coefficient de porosité (surface occupée par les pores sur la section transversale du courant, divisée par la surface totale de la section), v = vitesse réelle de l'eau.

suivante (fig. 7, p. 25). On versait de l'eau dans le puits № 3" et l'on observait le moment de son apparition sur les parois du puits № 3 (distant de 2 m.) Dans le puits № 3', l'eau ne s'est pas montrée. La vitesse réelle de filtration s'est trouvée égale à 15 cm. par heure pour *ac*, à 32 cm. pour *ab* et à 42 cm. pour *ad*.

5. Dans le chapitre V, on a déterminé le débit souterrain de la rivière Tchou. Dans ses grandes lignes, l'expérience s'est faite suivant le même schéma que celle du chap. 3 (voir fig. 8 et 9 à la page 38 et 40), sauf que le fond du puits descendait au-dessous du niveau hydrostatique. Le débit souterrain a été trouvé égal à 32, 34 m³ par 1', ce qui a servi de base pour le calcul du volume d'eau qui devra être pompé lors du creusement du fossé pour le barrage (fig. 10, p. 43 et tables, p. 46 et 47).

6. Le chapitre VI donne les résultats des observations faites au cours des expériences ci-dessus sur l'engorgement des pores des roches.

7. Le chapitre VII est intitulé „Observations générales sur la méthode des vitesses apparentes appliquée par nous“.

8. Un chapitre supplémentaire, écrit par A. Vaïpolin, expose les résultats d'expériences semblables faites au même endroit sur la filtration dans les roches massives peu perméables.

H

2970

N 27 1926