

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Г. И. Тер-Степанян

К вопросу о фильтрационных испытаниях
глинистых грунтов

(Представлено А. Г. Назаровым 11 VI 1954)

О газовыделении при фильтрационных испытаниях. При определении коэффициента фильтрации грунтов могут быть применены две различные схемы испытания—при постоянном и переменном напорах. Первое всесоюзное совещание по лабораторному исследованию грунтов (Москва, 1940) рекомендовало применять для песков принцип постоянного напора, а для глин—принцип переменного напора (*).

Каждое из этих видов испытаний допускает производство опытов при восходящем и нисходящем потоке. Необходимость исследования фильтрации в обоих направлениях отмечалась многими исследователями (†); ими было обнаружено влияние направления движения воды на скорость просачивания.

Серьезным источником погрешностей в процессе лабораторных испытаний на фильтрацию является образование тонких малопроницаемых пленок на поверхности грунта и воздушных пузырьков в порах грунта (‡). Обе эти причины ведут к снижению коэффициента фильтрации грунта.

Н. М. Герсеванов показал, что газовыделение делается невозможным, если температура воды, поступающей в грунт, не ниже температуры грунта; если вода нагнетается в образец и если давление в воде при фильтрации повышается. Для этого необходимо, чтобы вода в образце двигалась сверху вниз (нисходящий поток) и чтобы гидравлический градиент был бы меньше единицы (§). Однако последнее требование в отношении глинистых грунтов практически неосуществимо, вследствие низких значений коэффициента фильтрации этих грунтов.

Таким образом, необходимым условием, которому должен удовлетворять фильтрационный прибор, предназначенный для испытания глин, остается возможность осуществления нисходящего потока воды.

В большинстве фильтрационных приборов, предназначенных для испытания песчаных грунтов, осуществляется нисходящий поток; имен-

но для песчаных грунтов это обстоятельство имеет несравненно меньшее значение, так как испытания проводятся при небольших градиентах. Это объясняется сравнительно крупными размерами пор, вследствие чего удовлетворение критерию Рейнольдса требует применения малых скоростей движения воды. Последнее ведет к уменьшению величины градиентов, и так как разность напоров при испытании песков незначительна, то и процесс выделения газов, даже и при восходящем потоке, будет идти весьма слабо. Кроме того, благодаря большому просвету пор, выделившиеся пузырьки газа могут частично удаляться.

Иначе обстоит дело с глинистыми грунтами. Как известно, критическая скорость фильтрации обратно пропорциональна диаметру зерен грунта (⁶). Поэтому вследствие малости пор в глинистых грунтах могут быть осуществлены большие скорости движения воды; вследствие низкой водопроницаемости эти высокие градиенты и должны быть осуществлены. Отсюда следует, что при восходящем потоке процесс выделения газов в опытах с глинистыми грунтами будет энергичным. Для предотвращения этого необходимо, чтобы при фильтрационных испытаниях глин вода двигалась в нисходящем потоке.

Между тем, во всех предложенных до настоящего времени фильтрационных приборах с переменным напором, предназначенных для испытания глинистых грунтов, применяется только восходящий поток, как более удобный для практического осуществления.¹

Схема испытаний при переменном напоре, при восходящем и нисходящем потоках. Предлагается схема испытаний глинистых грунтов на фильтрацию при переменном напоре, позволяющая осуществлять движение воды в образце при восходящем и нисходящем потоках и не требующая уплотнения поршня. Для опытов применим комфильметр или вообще любой фильтрационный прибор,

К комфильметру присоединяется микроманометр-пьезометр с двумя стеклянными трубками и отсчетным устройством. Одна трубка микроманометра присоединяется к патрубку в цилиндре комфильметра, т. е. к полости, расположенной над образцом грунта. Вторая трубка микроманометра присоединяется к патрубку в днище комфильметра, т. е. к полости, расположенной под образцом грунта.

Для осуществления восходящего потока в образце уровень воды во второй трубке должен быть выше уровня воды в первой трубке микроманометра. В процессе опыта вода будет опускаться во второй

¹ Исключением является прибор П. П. Аргунова (¹), в котором нисходящий поток достигается применением вакуума; однако этот прибор не может считаться совершенным, так как в нем осуществляется принцип постоянного напора, что противоречит требованиям, предъявляемым к приборам, предназначенным для фильтрационных испытаний глинистых грунтов (²). Кроме того, в вакуумных приборах вода при очень высоких градиентах движется из области атмосферного давления в область низких давлений, что ведет к газовыделению, и фильтрация сопровождается пульсацией (³).

трубке, просачиваться через образец снизу вверх, накапливаться в полости поршня комфилметра и одновременно подниматься в первой трубке микроманометра (фиг. 1).

Для осуществления нисходящего потока необходимо, чтобы уровень воды во второй трубке был ниже уровня воды в первой трубке микроманометра. В процессе опыта вода будет расходоваться из полости поршня комфилметра и одновременно опускаться в первой трубке микроманометра, просачиваться через образец сверху вниз и подниматься во второй трубке микроманометра (фиг. 2).

Таким образом, для изменения направления воды достаточно изменить уровень воды во второй трубке микроманометра.

Заметим, что изменение уровня воды в первой трубке микроманометра значительно меньше, чем изменение его во второй трубке, так как первая трубка сообщается с полостью поршня комфилметра с большой свободной поверхностью воды; поэтому небольшие изменения этого уровня соответствуют значительным расходам воды, которые вызывают существенные изменения воды во второй трубке.

Предлагаемый метод испытания позволяет точно применять к глинам принципиальную схему Н. М. Герсеванова, полностью устраняющую газовыделение из фильтрующейся воды. Для осуществления этого необходимо, чтобы уровень воды в обеих трубках микроманометра был выше, чем образец грунта, и чтобы в первой трубке он стоял несколько выше, чем во второй, а разность уровней была бы меньше, чем высота образца.

Расчетная формула. На фиг. 1 и 2 показаны схемы испытаний при восходящем и нисходящем потоках воды, соответственно. Расчетные формулы в обоих случаях выводятся одним и тем же путем.

Примем за начальный уровень положение зеркала воды в комфилметре в начальный момент времени t_1 . Во второй трубке пьезометра начальное состояние определяется напором H_1 . В момент времени t_2 уровень воды в комфилметре и первой трубке пьезометра изменяется и делается равным h_2 , а во второй трубке пьезометра — H_2 . Обозначим площадь поперечного сечения трубок пьезометра f_1 и f_2 , соответственно. F — площадь сечения образца грунта и F' — площадь свободной поверхности внутренней полости комфилметра. Пусть в некоторый промежуточный момент времени напоры в первой и второй трубках пьезометра составляют h и H , соответственно; за следующий малый промежуток времени dt напор во второй трубке пьезометра изменяется на dH . Элементарный расход dQ воды во второй трубке пьезометра составит:

$$dQ = f_2 dH. \quad (1)$$

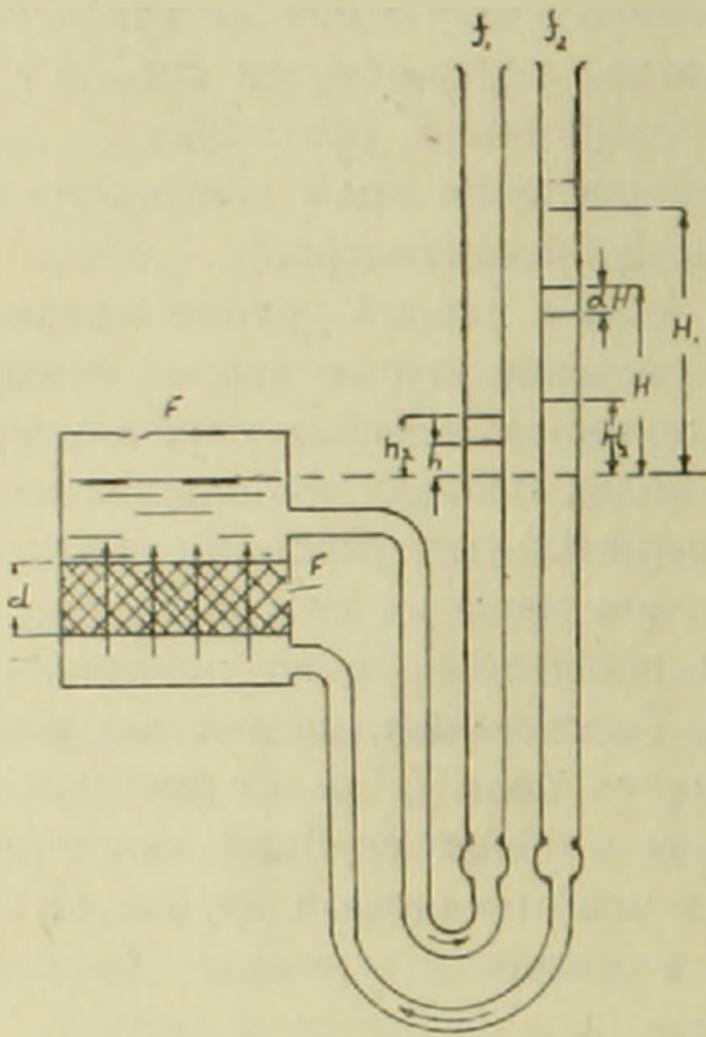
Расход воды, просочившейся через образец за то же время dt , составит

$$dQ = kiFdt. \quad (2)$$

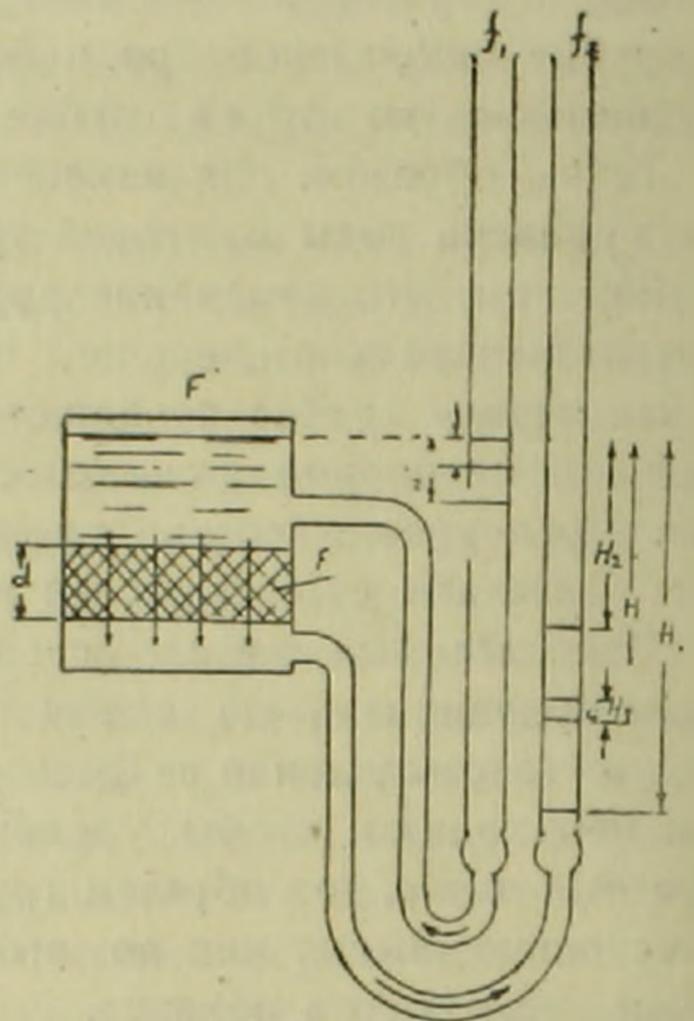
где k —коэффициент фильтрации грунта и i —гидравлический градиент; последний равен

$$i = \frac{H-h}{d}, \quad (3)$$

где d —высота образца грунта.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Так как общее изменение количества воды во второй трубке пьезометра от начала испытания должно равняться общему изменению количества воды во внутренней полости комфильметра и в первой трубке пьезометра, то пишем:

$$(H_1 - H) f_2 = h (F' + f_1),$$

откуда

$$h = \frac{H_1 - H}{F' + f_1} f_2. \quad (4)$$

Приравнявая (1) и (2) и применяя (3) и (4), получаем

$$k dt = - \frac{f_2 d}{F} \cdot \frac{dH}{H(1+A) - H_1 A},$$

где $A = \frac{f_2}{F' + f_1}$; знак минус показывает различное направление расхода. Интегрируя это выражение, получаем

$$k \int_{i_1}^{i_2} dt = - \frac{f_2 d}{F} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H(1+A) - H_1 A}$$

$$k = - \frac{f_2 d}{F(1+A)t} \ln \left(\frac{H_2(1+A)}{H_1} - A \right), \quad (5)$$

где $t = t_2 - t_1$.

Выражение (5) является точной расчетной формулой для вычисления коэффициента фильтрации при изменении положения обоих уровней воды.

Для практического применения его можно упростить.

Величина $A = \frac{f_2}{F' + f_1}$ весьма мала: обычно площадь сечения тру-

бок пьезометра f_1 и f_2 составляет $0.7 - 1 \text{ см}^2$, а свободная площадь сечения полости комфильметра F' — не менее 30 см^2 ; отсюда A составляет от 0,02 до 0,03. Поэтому можно пренебречь величиной A по сравнению с единицей.

Величина $\frac{H_2}{H_1}$ при колебаниях напоров между 10 и 20 см и интервалах падения напора не более 2 см составляет от 0,8 до 0,9.

Отсюда следует, что аргумент логарифмической функции отличается от H_2/H_1 значительно меньше, чем $(1+A)$ отличается от единицы; действительно, разделив этот аргумент на H_2/H_1 , получим:

$$1 + A - \frac{A}{H_2/H_1}$$

или, подставляя крайние значения,

$$1 + 0.03 - \frac{0.03}{0.8} = 0.992.$$

Натуральный логарифм этой величины составляет -0.008 , т. е. отличается от логарифма единицы значительно меньше, чем A отличается от нуля.

Влияние погрешности, вносимой пренебрежением величиной A , т. е. принятием, что площадь $F' + f_1$ бесконечно больше, чем f_2 , может быть ослаблено, если отсчитывать напор не от начального уровня воды в первой трубке пьезометра, а от среднего уровня ее за данный интервал времени.

Вводя указанные упрощения, получаем знакомый вид формулы:

$$k = \frac{f_2 d}{Ft} \ln \frac{H_1}{H_2}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения коэффициента фильтрации грунта при изменении обоих уровней воды может применяться та же формула, которая дается для коэффициента фильтрации при изменении только одного уровня.

Вводя поправки на температуру и на изменение пористости грунта во время испытания, автором составлена обобщенная формула коэффициента фильтрации грунтов при переменном напоре, которая имеет следующий вид:

$$k = 2,3 \frac{f}{F} d \frac{1 + \varepsilon}{1 + \varepsilon_0} \frac{u}{t} \lg \frac{H_1}{H_2} \text{ см/сек,} \quad (7)$$

где f —площадь сечения трубки пьезометра в см^2 ; F —площадь поперечного сечения образца грунта в см^2 , d —высота слоя грунта в см ; ε —коэффициент пористости грунта при испытании на фильтрацию;

ε_0 —начальный коэффициент пористости грунта; $u = \frac{\eta_{1T}}{\eta_0}$ — температур-

ная поправка на изменение вязкости воды, равная отношению коэффициента вязкости η_T воды при данной температуре T к коэффициенту вязкости η_0 воды при температуре 10° ; t —интервал времени, в течение которого напор воды по показаниям пьезометра изменяется от H_1 до H_2 , в сек.

Значения температурной поправки u для разных температур T даются в таблице.

Приведенная выше формула (7) коэффициента фильтрации является общей, так как она позволяет вычислять различные коэффициенты фильтрации, а именно:

1) *приведенный коэффициент фильтрации k_0* , т. е. скорость просачивания воды через образец грунта при высоте слоя над ним, равной приведенной высоте слоя грунта, при условно принятой температуре 10° ; этот коэффициент получается, если в формуле принять $\varepsilon = 0$;

2) *полный коэффициент фильтрации грунта k* , т. е. скорость просачивания воды через образец грунта при высоте слоя воды над образцом, равной полной высоте слоя грунта, при той же условно принятой температуре 10° ; этот коэффициент может быть определен для случая, когда грунт был испытан без предварительного уплотнения, если набухание было предотвращено путем арретирования; тогда в формуле следует положить $\varepsilon = \varepsilon_0$;

3) *полный коэффициент фильтрации грунта k_1* , определенный для случая, когда грунт предварительно подвергся уплотнению в процессе компрессионного опыта; в этом случае следует принять $\varepsilon = \varepsilon_1$, где ε_1 —коэффициент пористости грунта после уплотнения.

Применение предлагаемой схемы испытаний позволит вести опыты без газовыделения при переменном напоре, при нисходящем и восходящем потоках воды. Изменение направления воды при фильтрационном опыте производится простым изменением уровня воды во второй трубке микроманометра.

Значения температурной поправки и

T'	u	T''	u	T'	u
1	1,324	11	0,9722	21	0,7502
2	1,279	12	0,9454	22	0,7325
3	1,238	13	0,9198	23	0,7156
4	1,199	14	0,8954	24	0,6991
5	1,161	15	0,8721	25	0,6834
6	1,124	16	0,8496	26	0,6681
7	1,092	17	0,8280	27	0,6524
8	1,060	18	0,8074	28	0,6393
9	1,029	19	0,7876	29	0,6255
10	1,000	20	0,7685	30	0,6123

Институт строительных
материалов и сооружений
Академии наук Армянской ССР

Գ. Ի. ՏԵՐ-ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ

Կապալին գրունտների ֆիլտրացիոն փորձերի շուրջը

Հեղինակն առաջարկում է կապալին գրունտների ֆիլտրացիոն փորձերի կիրառման մի նոր ձև, այն փորձերի վերաբերյալ, որոնք կատարվում են փոփոխական ճնշման տակ: Այդ ձևը թույլ է տալիս լիովին իրագործել Ն. Մ. Գերսելվանովի սկզբունքային սխեման և այդպիսով վերացնել զապերի գտումը ֆիլտրացիոն ջրից: Բացի դրանից, նա թույլ է տալիս նաև ջրի հոսանքին տալ ցանկացած ուղղություներ՝ ներքևից վերև, ինչպես սովորաբար իրագործվում է դորժիքներում կապալին գրունտների համար, և վերևից ներքև, որը անսակասորեն ավելի ճիշտ է, բայց մինչև այժմ հաջողվում էր ընդունել միայն ավագային գրունտների դեպքում: Առաջարկված մեթոդով փորձեր կատարելիս ոգտագործվում է կոմֆիլմետր, կամ մի ուրիշ ֆիլտրացիոն դորժիք: Կոմֆիլմետրին միացվում է միկրոմանոմետր: Կոմֆիլմետրի ազատ տարածությունը, որը գտնվում է փորձարկվող գրունտի նմուշի վերևում, միանում է միկրոմանոմետրի խողովակներից մեկի հետ: Միկրոմանոմետրի երկրորդ խողովակը միանում է կոմֆիլմետրի ներքևի ազատ տարածության հետ, որը գտնվում է փորձարկվող գրունտի նմուշի տակ:

Գրունտի նմուշի միջով ջրի վեր բարձրացող հոսանքն իրականացնելու համար անհրաժեշտ է, որ միկրոմանոմետրի երկրորդ խողովակի ջրի մակարդակը լինի ավելի բարձրը, քան առաջին խողովակում (նկ. 1): Այդ դեպքում փորձի ընթացքում ջուրը կհոսի երկրորդ խողովակով, թափանցելով նմուշի միջով ներքևից դեպի վերև, կհավաքվի կոմֆիլմետրի գլանի մեջ միաժամանակ բարձրանալով միկրոմանոմետրի առաջին խողովակով:

Դեպի ցած հոսանքի իրականացման համար անհրաժեշտ է, որ ջրի մակարդակը միկրոմանոմետրի երկրորդ խողովակում լինի ավելի ցածր, քան առաջին խողովակում (նկ. 2): Այդ դեպքում ջուրը կձախսվի գլանի ազատ տարածությունից և հոսելով գրունտի նմուշի միջով կկուտակվի միկրոմանոմետրի երկրորդ խողովակում: Այսպիսով ջրի հոսանքի ուղղությունը փոխելու համար բավական է փոխել միկրոմանոմետրի երկրորդ խողովակում գտնվող ջրի մակարդակը:

Հողվածում տրվում է նաև գրունտների ֆիլտրացիայի գործակցի (k) որոշման ընդհանուր ճշգրիտ բանաձևը, երբ ջրի երկու մակարդակներն էլ փոփոխական են:

$$k = - \frac{z d}{F(1+A)t} \ln \left(\frac{H_2(1+A)}{H_1} - A \right) \quad (1)$$

որտեղ d գրունտի շերտի բարձրությունն է, F — նրա մակերեսը, l — ժամանակը որի ընթացքում ջրի ճնշումը H_1 — ից իջնում է մինչև H_2 — ի. իսկ

$$A = \frac{f_2}{F' + f_1}$$

որտեղ f_1 և f_2 պլեզոմետրի առջին և երկրորդ խողովակների մակերեսներն են, իսկ F' — կոմֆլիմետրում գտնվող ջրի ազատ մակերեսն է:

A — ի մեծությունը սովորական դեպքերում տատանվում է 0,02 մինչև 0,03: Արհամարելով այդ մեծությունը մեկ միավորի նկատմամբ, բանաձև (1)-ից ստանում ենք

$$k = \frac{f_2 d}{F t} \ln \frac{H_1}{H_2}$$

որը հաշված է ջրի մակարդակներից միայն մեկի փոփոխական լինելու դեպքում:

Ջերմաստիճանի և ծակոտկենության գործակիցի վերաբերյալ ուղղումները մտցնելուց հետո ստացվում է ընդհանրացած բանաձև՝

$$k = 2,3 \frac{f}{F} d \frac{1+\varepsilon}{1+\varepsilon_0} \frac{u}{t} \lg \frac{H_1}{H_2} \quad \text{սմ/վրկ.} \quad (2)$$

որտեղ ε գրունտի ծակոտկենության գործակիցն է փորձի ընթացքում, ε_0 — սկզբնական ծակոտկենության գործակիցն է, իսկ u — չեղմաստիճանային ուղղումն է: Ջերմաստիճանների ուղղման u մեծությունները բերվում են կից աղյուսակում:

Ընդհանրացած բանաձև (2)-ը թույլ է տալիս գտնել հետևյալ գործակիցները՝

1. Ֆիլտրացիոն բերված գործակից՝ k_0 ընդունելով $\varepsilon = 0$ ՝ ջրի արագությունը գրունտի մեջ, երբ ջրի շերտի բարձրությունը հավասար է գրունտի շերտի բերված բարձրությանը:

2. Ֆիլտրացիոն լրիվ գործակից k — տաանց գրունտի նախօրոք խտացման, ընդունելով $\varepsilon = \varepsilon_0$ ՝ ջրի արագությունը, երբ ջրի շերտի բարձրությունը հավասար է գրունտի լրիվ բարձրությանը:

3. Ֆիլտրացիոն լրիվ գործակից k_1 — երբ գրունտը նախօրոք խտացված է, ընդունելով $\varepsilon = \varepsilon_1$ ՝ գրունտի շերտում ջրի արագությունը, երբ ջրի շերտի բարձրությունը հավասար է գրունտի շերտի բարձրությանը խտացումից հետո:

Այստեղ՝ ε_1 — ր գրունտի ծակոտկենության գործակիցն է խտացումից հետո:

ЛИТЕРАТУРА — Գ Ր Ա Վ Ս Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

- ¹ П. П. Аргунов, сб. тр. № 11, Основ. и фунда. вопр. мех. гр. М., 1948, стр. 63—73
- ² В. Г. Булычев, Теория газонасыщенных грунтов. М., 1948. ³ А. М. Васильев, Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов. М., 1953. ⁴ Всегингео, Материалы по лабораторному исследованию грунтов. М., 1952.
- ⁵ Н. М. Герсеванов, Соб. соч., т. II, М., 1948, стр. 327—355. ⁶ Н. Н. Павловский, Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. Петроград, 1922. ⁷ К. Terzaghi and R. B. Peck, Soil mechanics in engineering practice. NY, 1948.