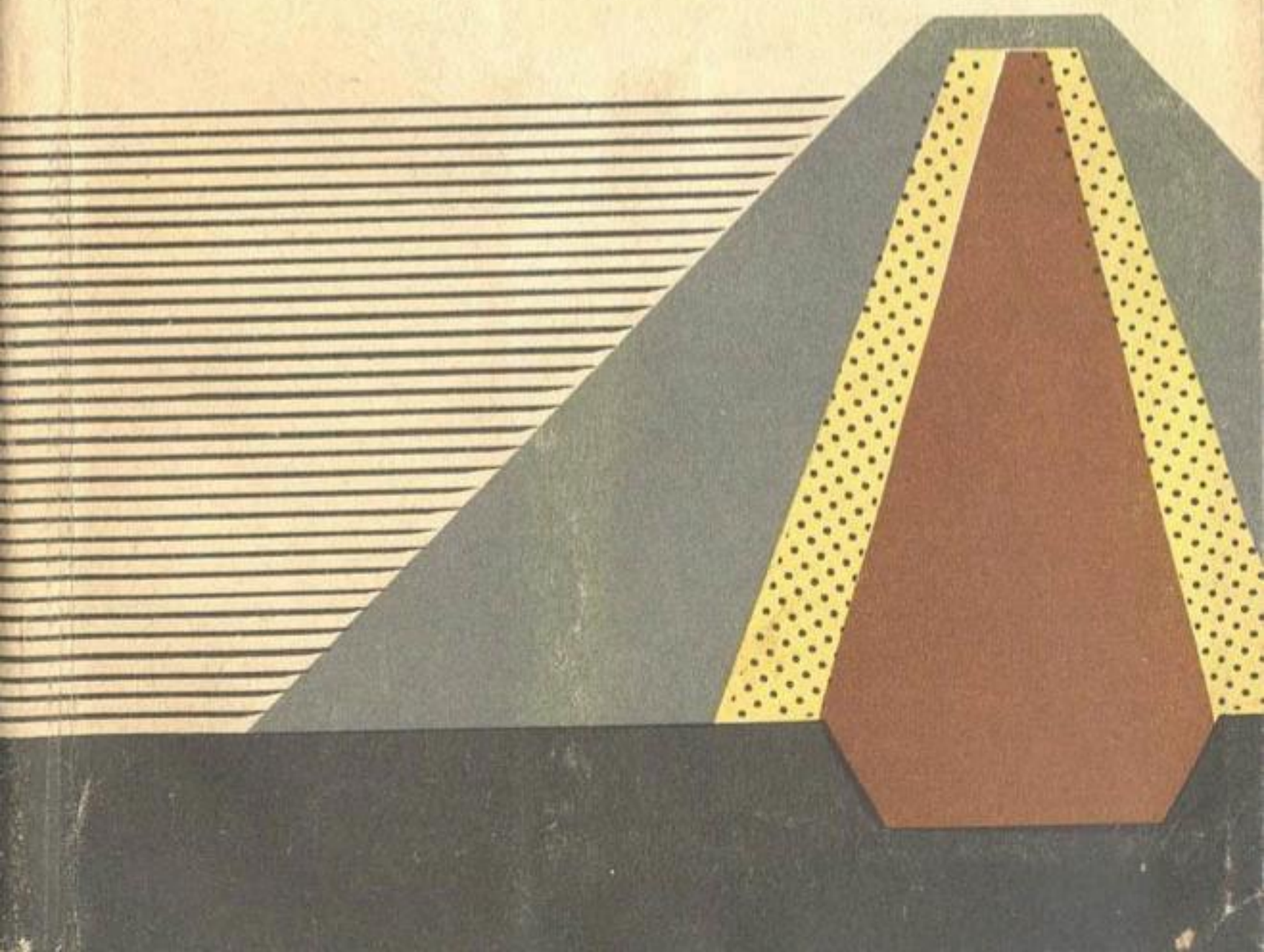


**В. Н. ЖИЛЕНКОВ**

**ВОДОУПОРНЫЕ  
СВОЙСТВА ГРУНТОВ  
ЯДЕР И ЭКРАНОВ  
ВЫСОКИХ ПЛОТИН**





МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР

ГЛАВТЕХСТРОЙПРОЕКТ

ВСЕСОЮЗНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ  
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

В. Н. ЖИЛЕНКОВ

# ВОДОУПОРНЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ ЯДЕР И ЭКРАНОВ ВЫСОКИХ ПЛОТИН

„ЭНЕРГИЯ“

Ленинградское отделение

1968

В работе описывается методика и приводятся результаты фильтрационно-суффозионных исследований, выполненных для проектирования Нурекской каменно-земляной плотины высотой 300 метров. На основе этих исследований дается количественная оценка водопроницаемости суглинка ядра плотины, а также рассматривается вопрос о начальном градиенте напора при фильтрации воды в суглинке и других связных грунтах.

Особое внимание уделяется установлению критериев сопротивляемости суглинка воздействию фильтрационного потока и определению общих принципов подбора зернового состава обратных фильтров, защищающих связные грунты. Вместе с тем поясняется физическая сущность явлений разрушения связных грунтов фильтрационными силами. В работе дано описание некоторых конструктивных мероприятий, позволяющих повысить фильтрационную прочность каменно-земляной плотины, когда имеется вероятность возникновения трещин в ее ядре (экране) или в скальном основании.

Выполненные исследования могут представить интерес, как для специалистов, занимающихся изучением фильтрационно-суффозионных свойств грунтов, так и для инженерно-технических работников, ведущих проектирование и строительство гидротехнических сооружений.

*Владимир Николаевич Жиленков*

## **Водоупорные свойства грунтов ядер и экранов высоких плотин**

„Энергия“, Ленинградское отделение, 1968 г.  
стр. 116 с рис.

Редактор *Н. А. Алексанянц*

Технический редактор *Л. П. Никитина*

Сдано в производство 21/1 1968 г. Подписано к печати 20/III 1968 г. М-17123. Печ. л. 7,18. Уч.-изд. л. 6,84. Бум. л. 3,59. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Типографская бумага № 1. Заказ 55. Тираж 600. Цена 49 к.

Типография Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева.  
Ленинград, Гжатская ул., 21.



## ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы возросла тенденция к строительству каменно-земляных плотин, которые постепенно вытесняют ранее широко распространенные бетонные плотины. Это направление в развитии гидротехники обусловлено многими причинами, прежде всего стремлением увеличить надежность сооружения и одновременно лучше использовать местные ресурсы, сократив до минимума количество привозных материалов. Каменно-земляные плотины чаще всего строятся в горных районах, где, с целью регулирования неравномерного стока рек, приходится создавать водохранилища большой емкости, достигающей иногда нескольких десятков кубических километров. Соответственно увеличивается и высота плотин, во многих случаях превосходящая сто метров. Вместе с тем, горные районы обычно являются сейсмически активными, что вынуждает в этих условиях разрабатывать дополнительные мероприятия, повышающие надежность сооружения.

Как известно, водоудерживающая способность каменно-земляной плотины обеспечивается наличием в ней ядра или экрана, состоящего из малопроницаемого грунта. В свою очередь, защита от возможного разрушения ядра или экрана плотины вследствие механической суффозии, разуплотнения, эрозии и т. п. осуществляется с помощью обратных фильтров. В этой связи становится понятным тот особый интерес, который проявляют проектировщики к вопросам расчета и конструирования водопорных элементов каменно-земляных плотин. К сожалению, отсутствие достаточно обоснованных рекомендаций и правил вызвало большое распространение методов проектирования по так называемым „аналогам“, с использованием давно устаревших критериев, которые оказались непригодными для оценки важнейшего показателя надежности сооружения—его фильтрационной прочности<sup>1</sup>.

Наметившийся разрыв между потребностями инженерной практики и возможностями расчетного аппарата в этой обла-

<sup>1</sup> Уместно отметить, что по данным мировой статистики около половины всех аварий гидротехнических сооружений происходит вследствие недостаточной сопротивляемости самого сооружения или его основания воздействию фильтрационного потока.



сти стал особенно заметен во время проектирования не имеющей себе равной по высоте каменно-земляной плотины Нурекского гидроузла. Наиболее важными и сложными оказались вопросы оценки фильтрационно-суффозионных свойств лессового суглинка, который предполагалось использовать в качестве материала ядра плотины и вопрос о начальном градиенте фильтрации в суглинке.

Особое значение имели исследования, целью которых являлось определение сопротивляемости суглинка воздействию фильтрационного потока в ядре и основании плотины. В частности, были рассмотрены случаи разрушения суглинка вследствие его размокания, контактного выпора и продольного размыва потоком в слое фильтра или по трещинам в береговых скальных массивах в месте примыкания к ним ядра. И, наконец, большое внимание уделялось разработке и обоснованию мероприятий, обеспечивающих фильтрационную прочность водоупорного элемента плотины при возникновении в нем трещин, вызванных, например, землетрясением. Для экспериментального изучения в условиях лаборатории процессов фильтрации и суффозии в такой высокой плотине, как Нурекская, пришлось создать специальные установки, с помощью которых можно было воспроизводить большие сжимающие нагрузки и давления воды.

Автор дал более подробное объяснение физической сущности явлений фильтрационного разрушения грунтов, так как эти вопросы не нашли достаточно полного освещения в литературе. Некоторые из рассмотренных проблем требуют дальнейшего изучения, однако автор считал целесообразным изложить свою точку зрения, надеясь, что обмен мнениями поможет решению весьма сложных вопросов оценки фильтрационно-суффозионных свойств связных грунтов вообще.

Учитывая, что лессовый суглинок имеет сравнительно низкие показатели сопротивляемости воздействию фильтрационного потока, результаты выполненных исследований можно использовать для предварительного обоснования проектов высоких каменно-земляных плотин, возводимых из более качественных грунтов.

Все исследования проводились автором в Фильтрационной лаборатории имени академика Н. Н. Павловского во ВНИИГе имени Б. Е. Веденеева. Пользуясь случаем, он приносит благодарность сотрудникам Лаборатории, принимавшим участие в осуществлении трудоемких экспериментов, в особенности своим ближайшим помощникам и. о. инж. А. П. Уваровой и инж. Л. В. Гуляевой.

Автор также выражает признательность руководителю фильтрационной лаборатории ВНИИГа, проф., доктору техн. наук В. И. Аравину, взявшему на себя труд по просмотру рукописи данной работы.



## Глава первая

### ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СУГЛИНКА

При проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений часто возникает необходимость в точной оценке водопроницаемости связного грунта. В одних случаях такая оценка требуется для определения возможной осадки бетонного сооружения и величины противодействия в его основании, в других — для выяснения эффективности экранирования ложа канала, водоема, стенок тоннеля и т. д. Вопросы определения фильтрационных свойств связных грунтов приобретают особую важность в связи с наблюдающейся тенденцией к строительству высоких каменно-земляных плотин, водопорные элементы которых (понуры, экраны и ядра) чаще всего возводятся из суглинков и глин. Повышенный интерес к изучению закономерностей изменения водопроницаемости грунта в зависимости от его состава, плотности и условий формирования структуры обусловлен, прежде всего, необходимостью прогнозирования снижения напора при фильтрации воды в плотине, интенсивности ее осадок и возникающего при этом порового давления. Следует отметить, что упомянутые вопросы изучены совершенно недостаточно, а некоторые из них, как, например, вопрос о начальном градиенте напора, оказались по существу запутанными.

Автор выражает надежду, что на основе рассмотрения результатов исследований, выполненных для обоснования проекта Нурекской плотины высотой 300 м, будет создано более четкое представление о характере изменения водопроницаемости связных грунтов при их уплотнении и вместе с тем внесена определенная ясность в методику экспериментального изучения фильтрационных свойств этих грунтов.

Описываемые ниже исследования имеют целью выявить общую зависимость между коэффициентами фильтрации и пористости лессового суглинка, который предполагается использовать в качестве материала ядра плотины. Решение этой задачи представляет значительный практический интерес прежде всего в связи с оценкой возможных деформаций ядра, а также в связи с определением интенсивности порового давления и параметров фильтрационного потока в нем.



## § 1. Некоторые физико-механические характеристики суглинка

Исследуемый суглинок, залегающий в районе строительства Нурекской ГЭС (Лангарское месторождение), принадлежит к категории широко распространенных в Средней Азии лессовых грунтов, которые, как известно, отличаются рядом специфических свойств: однородностью зернового состава, повышенной размокаемостью, просадочностью и т. п. Гранулометрический состав суглинка характеризуется следующими относительными значениями содержания частиц по весу:

| Диаметр частиц, мм | > 0,1 | 0,1—0,05 | 0,05—0,02 | 0,02—0,01 | 0,01—0,005 | < 0,005 |
|--------------------|-------|----------|-----------|-----------|------------|---------|
| Содержание, %      | 0,2   | 3,4      | 25,4      | 64,9      | 4,5        | 1,6     |

На основе микроскопического исследования суглинка удалось установить, что его частицы, средний размер которых равен примерно 15 мк, представлены в основном зернами кварца, имеющими округлую форму. Результаты химического анализа суглинка (табл. 1) показали, что помимо силикатов (квар-

Таблица 1

Результаты химического анализа лессового суглинка  
Лангарского месторождения (р-н строительства Нурекской ГЭС)

| Водная вытяжка     |               |                         | Солянокислая вытяжка<br>(в 10-процентном растворе HCl) |               |
|--------------------|---------------|-------------------------|--------------------------------------------------------|---------------|
| Ионы               | Содержание, % | Содержание мг-экв/100 г | Окислы                                                 | Содержание, % |
| Cl'                | 0,0063        | 0,18                    | R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                          | 6,45          |
| SO <sub>4</sub> "  | 0,0036        | 0,08                    | SO <sub>3</sub>                                        | 0,03          |
| HCO <sub>3</sub> ' | 0,0622        | 1,02                    | CaO                                                    | 11,40         |
| Ca"                | 0,0176        | 0,88                    | MgO                                                    | 1,87          |
| Mg"                | 0,0026        | 0,22                    | Не растворимый остаток                                 | 66,40         |
| K + Na             | 0,0041        | 0,18                    |                                                        |               |
| Сухой остаток      | 83,0          |                         |                                                        |               |

Содержание карбонатов — 24 %; гипса — 0,05 (из расчета на 100 г абсолютно сухого грунта).



ца) в нем содержится до 24% карбонатов и 0,05% гипса. По содержанию легко- и труднорастворимых солей суглинок относится к малозасоленным грунтам.

Влажность суглинка, соответствующая верхнему пределу пластичности,  $W_T = 28\%$ , на границе раскатывания  $W_p = 20\%$ ; число пластичности  $W_n = 8\%$ . Средний удельный вес частиц суглинка  $\Delta = 2,70 \text{ г/см}^3$ .

Экспериментальным путем было установлено, что максимальное уплотнение суглинка достигается при так называемой „оптимальной“ его влажности, равной 16—18%. На рис. 1 графически показано изменение величины объемного веса суглинка, уплотненного трамбованием вручную, в зависимости от его начальной влажности. Аналогичные результаты получены в натурных условиях при уплотнении суглинка с помощью виброкатка и автомашин [1].

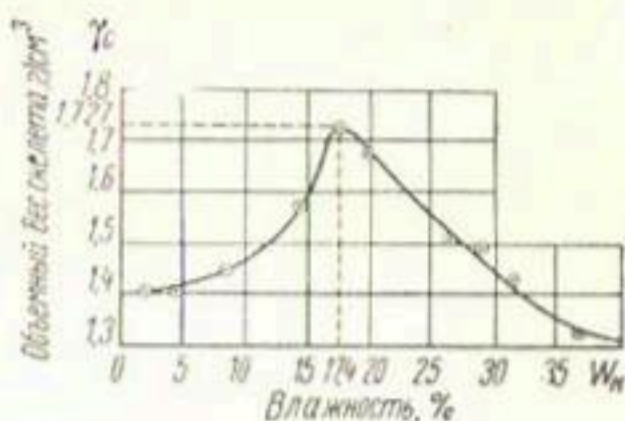


Рис. 1. Изменение объемного веса лессового суглинка в зависимости от его начальной влажности, при послойном уплотнении трамбованием вручную.

## § 2. Характерные особенности изучения фильтрационных свойств связных грунтов

Величина водопроницаемости грунта (как и любого пористого тела) определяется структурой его порового пространства, которая, в свою очередь, может быть охарактеризована двумя параметрами — количеством и поперечными размерами пор. В этом отношении связные грунты, в особенности лессовые суглинки, отличаются некоторыми свойствами, обусловленными их агрегатной структурой (наличием комковатости). В указанных грунтах имеется, по крайней мере, две системы пор: поры межагрегатные и внутриагрегатные. Прямые микроскопические исследования вахшского лесса [2] показали, что его структура характеризуется наличием пористых агрегатов (комочков) 0,06—0,16 мм в поперечнике, отделенных друг от друга порами диаметром 0,05—0,1 мм.

Упаковка элементарных частиц в агрегатах и самих агрегатов может быть достаточно близкой к наиболее плотной, гексагональной. С. Н. Рыжов [3], определяя внутриагрегатную пористость лессового суглинка, нашел, что она изменяется между 27 и 30%, т. е. близка к теоретической величине пористости при гексагональной упаковке, равной 25,9%. Межагрегатная пористость может достигать 0,2—0,5 от величины общей пористости [4]. Если сами агрегаты, в свою очередь,



будут состоять из еще более мелких, то пористость грунта может достигать величины, значительно превышающей ту, которая характерна для рыхлой кубической упаковки.

При изучении структуры суглинистых грунтов в слоях качественных насыпей было установлено, что чем меньше влажность грунта, тем больше прочность комков и тем менее совершенно проходит первая фаза уплотнения — уничтожение межагрегатной порозности. В работе [5] дается ссылка на пример из строительной практики и отмечается, что минимум водопроницаемости слоя грунта был достигнут при его уплотнении с влажностью, большей его оптимальной влажности, но меньшей его предела текучести. В этом случае при изменении влажности суглинка от 18 до 28% его коэффициент фильтрации снизился с  $4 \cdot 10^{-6}$  до  $4 \cdot 10^{-8}$  см/сек при незначительном уменьшении плотности от 1,57 до 1,50 г/см<sup>3</sup>. Понижение водопроницаемости связного грунта при увеличении его начальной влажности отмечалось также Н. Я. Денисовым [6] и С. М. Кривовязем [7].

Таким образом, при изучении водопроницаемости связных грунтов следует обращать особое внимание на состояние их структуры, определяемой первоначальной влажностью и способом уплотнения грунта.

Как известно, основным методом возведения водоупорных элементов каменнонабросных плотин является метод послойной отсыпки грунта и уплотнения его специальными механизмами, например, виброкатками. При этом по высоте каждого из отсыпаемых слоев грунт уплотняется неодинаково: больше в верхней зоне и меньше — в нижней. В зависимости от толщины слоя разница величин объемного веса грунта в указанных зонах может достигать 0,3—0,5 г/см<sup>3</sup> [1]. Данное обстоятельство неизбежно приводит к возникновению фильтрационной анизотропии (различию водопроницаемостей грунта вдоль и поперек отсыпанных слоев). Величина анизотропии может быть выяснена или путем постановки экспериментов, в которых моделируется фильтрация воды по этим двум направлениям, или путем проведения фильтрационных испытаний образцов грунтов, отобранных из различных точек опытной насыпи или непосредственно из сооружения. Последнему методу следует отдать предпочтение, так как при этом определяется водопроницаемость грунта с „естественной“ структурой. Характерные обстоятельства фильтрации воды вдоль и поперек уложенного слоя грунта при одновременном его обжатии внешней нагрузкой можно воспроизвести в лаборатории, для чего необходимо иметь соответствующие фильтрационно-компрессионные приборы, позволяющие осуществлять эксперимент в максимальном приближении к натурным условиям. Так, например, уложенный в ядро Нурекской плотины грунт будет сильно уплотнен давлением вышележащих слоев, которое



в нижней трети ядра достигнет величины  $60 \text{ кг/см}^2$ . Воспроизведение условий фильтрации в грунте при таких больших сжимающих давлениях потребовало создания принципиально новых экспериментальных установок, с помощью которых, в частности, удалось выявить общую закономерность изменения водопроницаемости лессового суглинка в зависимости от обстоятельств формирования его структуры, плотности и начальной влажности.

### § 3. Конструкции экспериментальных установок для изучения фильтрационных свойств грунтов

#### Вертикальный фильтрационно-компрессионный прибор

Этот прибор, схема которого показана на рис. 2, предназначен для изучения фильтрационных и суффозионных свойств грунтов при одновременном их уплотнении вертикальным сжимающим давлением до  $50 \text{ кг/см}^2$ . Соответствующее усилие, равное  $13000 \text{ кг}$ , от гидравлического домкрата передается на грунт через шток и верхнюю подвижную решетку прибора. Так как площади поперечных сечений поршня домкрата и цилиндра прибора одинаковы и равны  $260 \text{ см}^2$ , то величина давления на грунт фиксируется непосредственно по показаниям манометра, регистрирующего давление масла или глицерина в камере домкрата.

Одновременно с уплотнением уложенного слоя грунта внешним давлением, в нем осуществляется фильтрация воды, подаваемой из поплавкового бачка-дозатора, который автоматически поддерживает уровень „верхнего бьефа“. При желании направление фильтрации можно менять путем пересоединения подводящей трубки. Осадка испытуемого образца грунта в процессе опыта определяется по показаниям индикатора (мессуры), закрепленного на штоке.

Данный прибор может быть также использован для оценки суффозионных свойств грунта при весьма больших градиентах напора. Он рассчитан на создание давления воды внутри цилиндра до  $5 \text{ атм}$  при максимальных нагрузках и до  $10 \text{ атм}$  при нагрузках, равных  $25 \text{ кг/см}^2$ . Для визуального наблюдения за состоянием испытуемого грунта цилиндр прибора имеет четыре окна, вырезанных в его наружном металлическом кожухе, в который запрессована гильза из оргстекла. В нижней части цилиндра имеется конус с присоединенным к нему песко-сборником, что позволяет использовать прибор также для проведения суффозионных исследований несвязных грунтов, в том числе при подборе зернового состава обратных фильтров.

Общий напор воды, действующий на весь испытуемый образец грунта, определяется по показаниям пьезометров, соединенных с „верхним“ и „нижним“ бьефами. В случае необхо-



димости пьезометрический напор внутри грунта можно определить с помощью специальных устройств, например индуктивного датчика давления, показанного вместе с комплектом

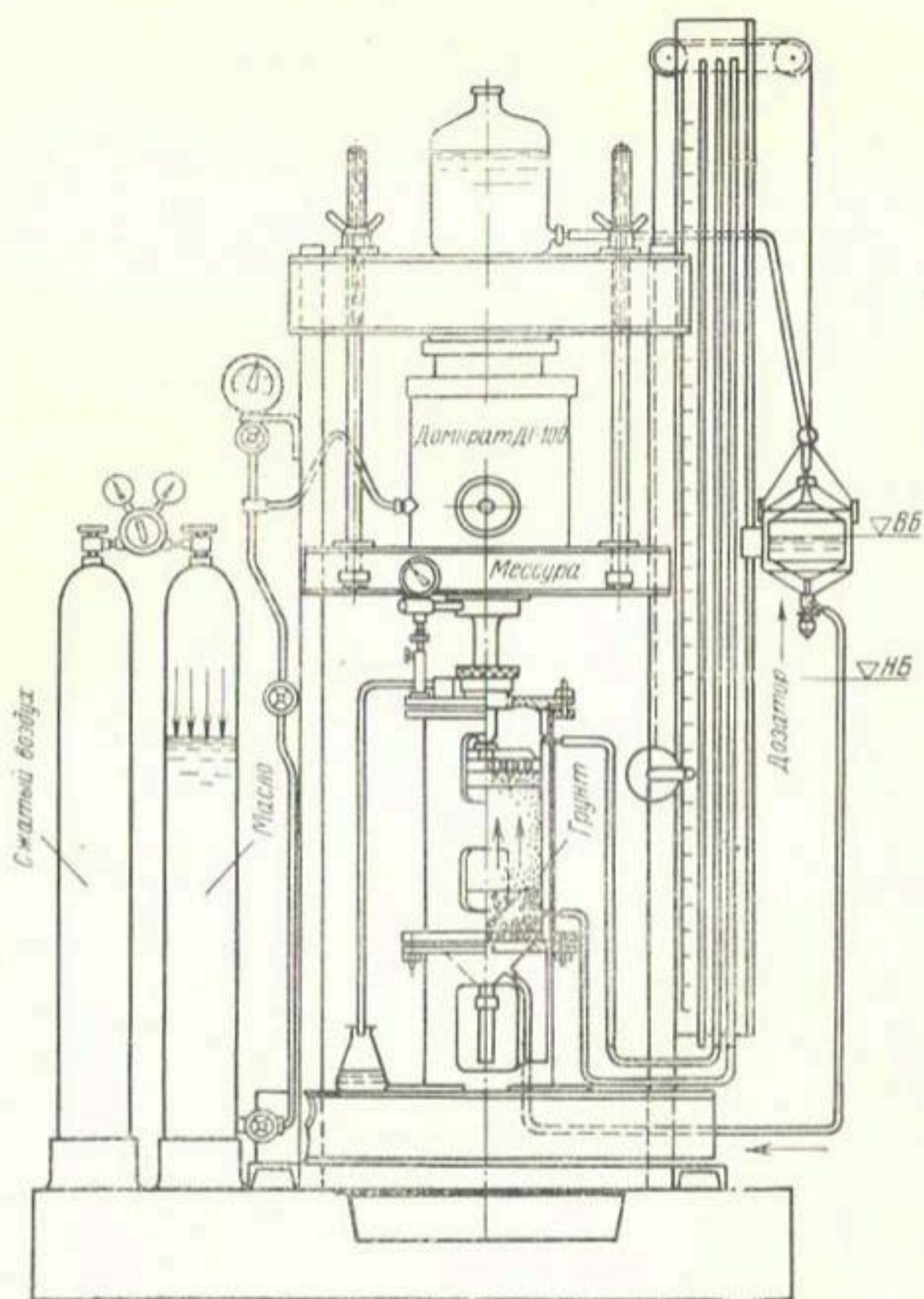


Рис. 2. Схема вертикального фильтрационно-компрессионного прибора.

измерительной аппаратуры на рис. 3. Этот прибор отличается от существующих прежде всего размерами, позволяющими испытывать грунт с естественной комковатой структурой (что



весьма важно с точки зрения оценки его фильтрационных свойств), а также изучать суффозионную устойчивость грунта на контакте с крупнозернистым материалом обратных

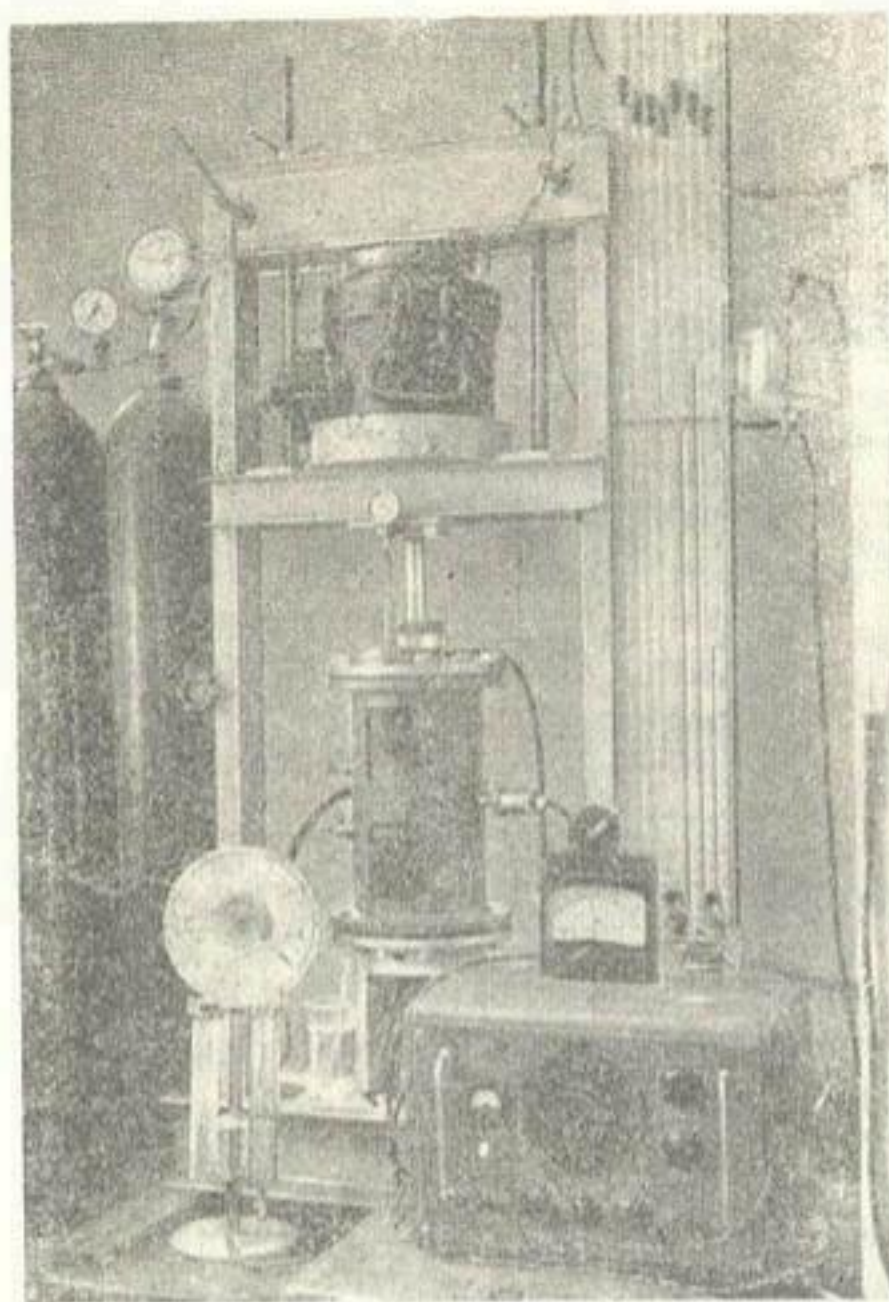


Рис. 3. Внешний вид фильтрационно-компрессионного прибора (на переднем плане слева — устройство для измерения объема профильтровавшейся воды, справа — блок электрических приборов для определения внутрипорового давления воды в грунте).

фильтров. Кроме того, большая площадь поперечного сечения прибора резко увеличивает его „разрешающую“ способность при определении водопроницаемости грунта в области малых градиентов напора. Как будет видно из последующего изложения, данное обстоятельство сыграло решающую роль при изучении вопроса о так называемом „начальном градиенте напора“.



## Прибор осе-радиальной фильтрации

С целью изучения отмеченных выше особенностей фильтрации в ядре, возведенном методом послойной укладки грунта, был сконструирован и изготовлен прибор осе-радиальной фильтрации.

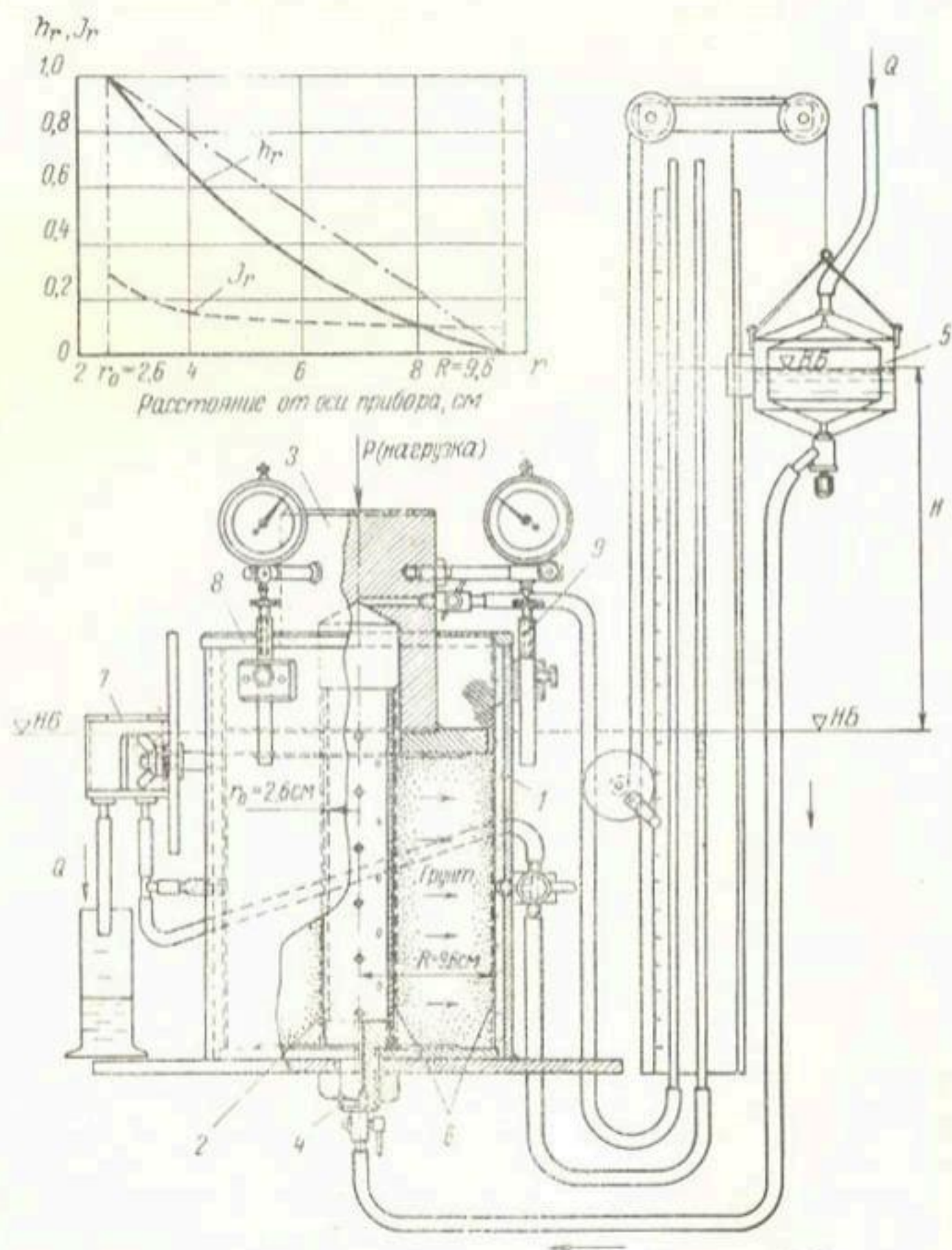


Рис. 4. Схема прибора осе-радиальной фильтрации и графики изменения приведенных величин напора  $h_r = \frac{h}{H}$  и градиента напора  $J_r = \frac{I}{H}$ .



Прибор (рис. 4) имеет цилиндрический корпус 1 с внутренним диаметром 194 мм, по оси которого расположена перфорированная трубка 2 с внешним диаметром 50 мм. Сверху в корпус вставляется кольцевой массивный поршень 3, через посредство которого передается уплотняющее грунт давление интенсивностью до 50 кг/см<sup>2</sup>. При этом испытуемый грунт помещается в кольцевое пространство между корпусом прибора и перфорированной трубкой. Распределение плотности грунта по высоте слоя может выбираться в зависимости от условий поставленной задачи. Чаще всего наибольший интерес представляет случай, когда характер изменения плотности в опыте соответствует таковому в натуре. Во время проведения опыта вода через ниппель 4 поступает внутрь перфорированной трубки, откуда она проникает в грунт и фильтрует в радиальном направлении под действием напора, величина которого может изменяться в зависимости от положения поплавкового бачка-дозатора 5. Для равномерного притока воды к грунту трубка снаружи окружается латунной сеткой 6 и слоем фильтровальной бумаги. На внутренней поверхности корпуса прибора устанавливается также дренажная сетка, прикрепленная к кольцу 8. Эта сетка обеспечивает отвод профильтровавшейся воды, поступающей затем через два диаметрально расположенных штуцера в сливной бачок 7. Для предотвращения испарения в процессе проведения опыта уровень воды в сливном бачке должен находиться примерно на отметке поверхности грунта, которая снижается по мере увеличения давления на грунт. В связи с этим предусмотрена установка сливного бачка на требуемой высоте с помощью винта на корпусе прибора.

Суммарная осадка грунта регистрируется по показаниям трех симметрично расположенных на поршне индикаторов, причем опорой для их штоков служат выдвижные (телескопические) подставки 9, закрепленные на корпусе прибора. Эти подставки позволяют легко устанавливать начальные нулевые показания индикаторов. Измерение напора фильтрующей воды осуществляется с помощью пьезометров, для чего на поршне и корпусе сделаны специальные краники.

Исходя из принципа работы прибора, определение водопроницаемости слоя грунта следует производить на основании формулы для подсчета расхода поглощающей скважины, расположенной в напорном пласте:

$$Q = \frac{2\pi k_c T H}{\ln \frac{R}{r_0}}, \quad (1)$$

где  $k_c$  — суммарный коэффициент фильтрации грунта в продольном направлении пласта (слоя);

$T$  — мощность пласта (в данном случае высота слоя грунта в приборе);



$H$  — величина напора;  
 $R$  — расстояние от оси скважины до контура стока;  
 $r_0$  — радиус скважины (внутренней трубки),  
откуда

$$k_c = \frac{Q}{2\pi TH} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (2)$$

В рассматриваемом случае (с учетом толщины сеток)  $R = 9,6$  см и  $r_0 = 2,6$  см. Следовательно,

$$k_c = 0,2 \frac{Q}{H(T_n - S)}, \quad (3)$$

где  $T_n$  — начальная высота слоя грунта в приборе;  
 $S$  — величина суммарной осадки грунта, соответствующей по времени измерению расхода фильтрации.

### Прибор для определения водопроницаемости грунта с ненарушенной структурой

В отношении определения водопроницаемости ядра (понура или экрана) плотины, возводимого из связного грунта, наиболее достоверные результаты могут быть получены путем проведения фильтрационных испытаний образцов, отобранных с помощью колец из опытных насыпей или непосредственно из сооружения. Эти образцы помещаются в специально приспособленные для проведения такого рода испытаний фильтрационно-компрессионные приборы, которые обычно рассчитаны на создание сравнительно небольших давлений на грунт (в пределах нескольких  $\text{кГ/см}^2$ ).

Для точного прогнозирования водопроницаемости ядра Нурекской плотины с учетом реальных условий его возведения потребовалось создать прибор, в котором фильтрационные испытания образцов суглинка с „ненарушенной“ структурой могли проводиться при давлениях до  $60 \text{ кГ/см}^2$ . В качестве исходных размеров при конструировании прибора были приняты внутренний диаметр металлического пробоотборного кольца и его высота, соответственно равные 88 и 30 мм. Из рис. 5 видно, что цилиндрический корпус 1 прибора, с запрессованной в него латунной гильзой 2, снизу имеет припаянное днище 3, служащее одновременно опорой, через перфорированное кольцо 4, для нижней решетки 5, которая также припаявается по окружности к внутренней гильзе 2. Сверху прибор закрывается крышкой 6, через которую проходит вертикальный шток 7, передающий нагрузку на верхнюю подвижную решетку 8, укрепленную ребрами жесткости. Перемещение этой решетки, вызванное осадкой грунта, фиксируется при помощи мессуры 9, установленной на штоке. Перед тем как поместить испытуемый грунт в прибор, на нижнюю решетку ук-



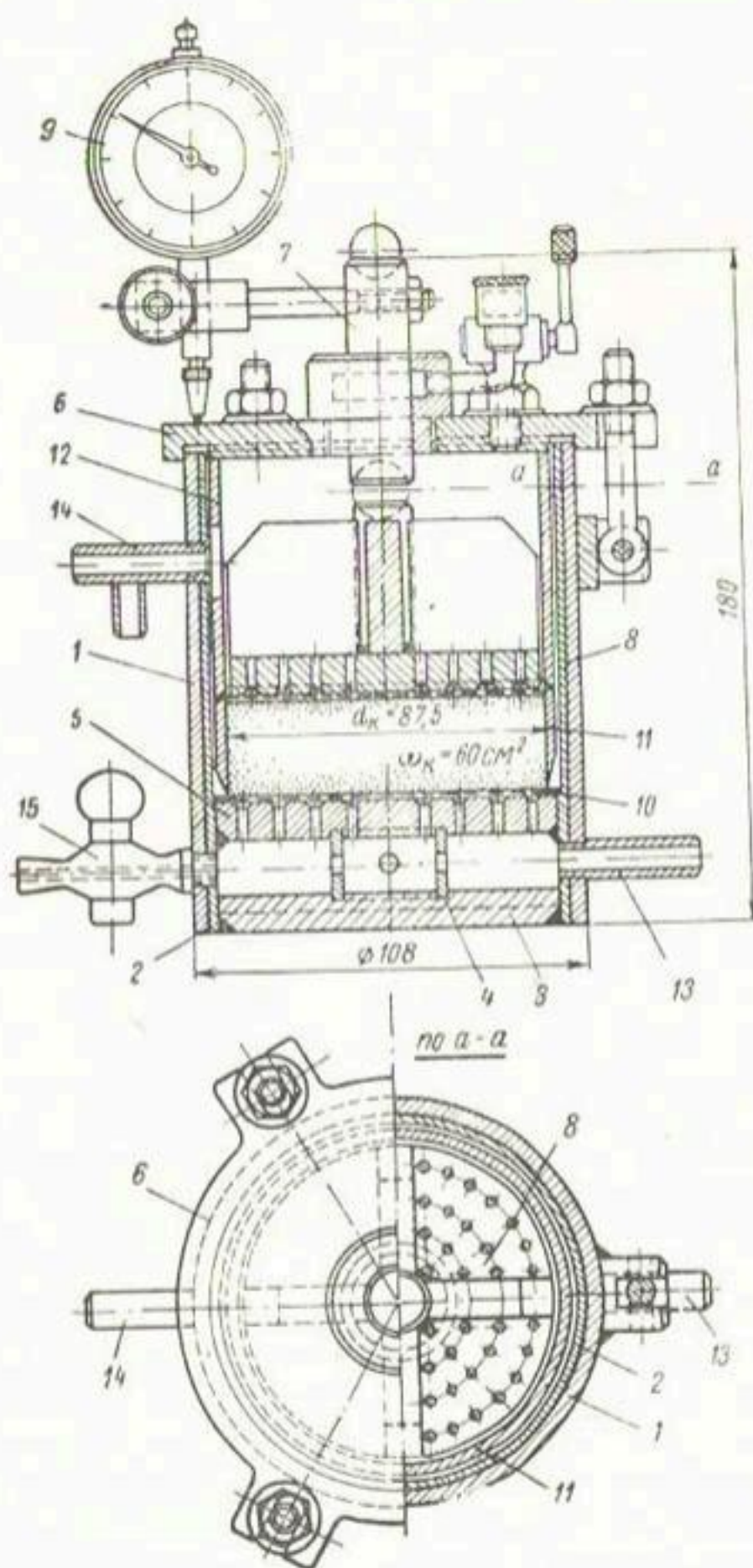


Рис. 5. Продольный и поперечный разрезы прибора для определения водопроницаемости образцов грунта с ненарушенной структурой.



ладывается резиновое кольцо 10, являющееся уплотняющей прокладкой между решеткой и металлическим пробоотборным кольцом 11, в котором находится грунт. Кольцо прижимается к прокладке под действием усилия, передающегося со стороны крышки прибора через втулку 12. Наличие резинового кольца-прокладки полностью исключает просачивание воды между пробоотборным кольцом и корпусом прибора. Простота и надежность такого уплотнения является отличительной

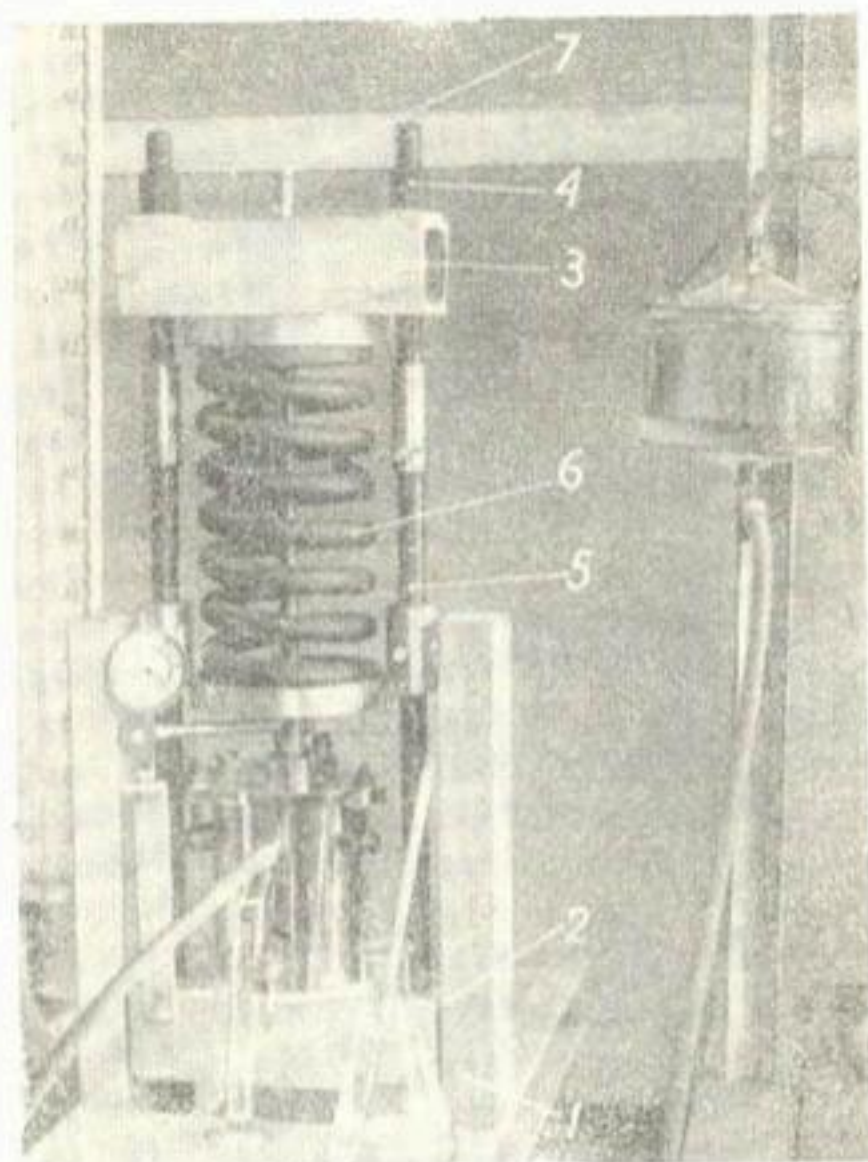


Рис. 6. Устройство для создания нагрузки при испытании грунта в фильтрационно-компрессионном приборе.

особенностью данного прибора. Чтобы обеспечить равномерное распределение потока воды по всей площади образца, на нижнюю решетку прибора, внутри уплотняющего кольца, укладывается латунная сетка и слой фильтровальной бумаги (сверху образца для равномерного отвода профильтровавшейся воды также укладывается фильтровальная бумага и сетка). Подвод воды к прибору производится через патрубок 13, а отвод — через тройник 14, к которому присоединяется один из пьезометров; второй присоединяется к крану 15.



## Устройство для создания нагрузки при испытании грунта

Перед испытаниями грунта в фильтрационных приборах необходимо осуществить возможно более полное удаление содержащегося в нем воздуха путем постепенного его водонасыщения в направлении снизу вверх. Однако при этом не всегда удается целиком вытеснить воздух из подстилающего или дренажного слоя, на который укладывается грунт в приборе. Оставшийся там воздух и воздух, вновь поступивший из грунта во время его сжатия, скапливается под нижней поверхностью испытуемого образца, препятствуя протеканию воды. Кроме того, в некоторых случаях, когда определяется водопроницаемость илистых грунтов, можно наблюдать выделение газа (чаще всего метана), также резко уменьшающего интенсивность фильтрации. В связи с этим надо иметь возможность выпустить скопившийся воздух или газ из прибора, например путем поворота его на  $180^\circ$ , и таким образом предотвратить появление воздушной „пробки“.

Нами разработана конструкция устройства, позволяющего переворачивать фильтрационно-компрессионный прибор перед водонасыщением грунта и во время последующего его испытания, не уменьшая при этом сжимающей нагрузки. Устройство (рис. 6) выполнено в виде поворотной рамы, шарнирно закрепленной в опорных стойках станины 1. Нижняя балка рамы 2, на которой устанавливается прибор, неподвижна, а верхняя 3, с помощью гаек 4, может перемещаться вдоль тяжей 5, сжимая пружину 6 и создавая, тем самым, необходимое для уплотнения грунта усилие. Величина усилия определяется по отметкам на штоке 7, проходящем через верхнюю балку рамы. Замена громоздких рычажных приспособлений нагрузочным устройством с предварительно протарированной пружиной также делает установку более компактной.

## Прибор для измерения расходов воды

При экспериментальном изучении фильтрационно-суффозионных свойств грунта расходы протекающей через него воды измеряют обычно так называемым „объемным способом“, с помощью мензурки и секундомера. Этот способ требует больших затрат времени и не позволяет в процессе опыта осуществлять постоянное наблюдение за изменением скорости фильтрации.

Нами, совместно с Б. К. Булем, разработан прибора-расходомер, предназначенный для непосредственного измерения относительно небольших (менее 2 л/сек) расходов воды и других жидкостей, преимущественно в лабораторных установках.

В основу конструкции прибора положен принцип определения уровня жидкости в открытом сосуде, включенном в по-



дающий ее трубопровод. Расходомер (рис. 7) состоит из цилиндрического корпуса 1 с находящимся внутри его поплавком 2, который вместе с прикрепленным к нему конусом 3 свободно насажен на направляющий осевой стержень 4. Поплавок соединен гибкой нитью (например, тонкой стальной струной) 5 со шкивом 6, на оси которого закреплены показывающая стрелка 7 и пружина 8.

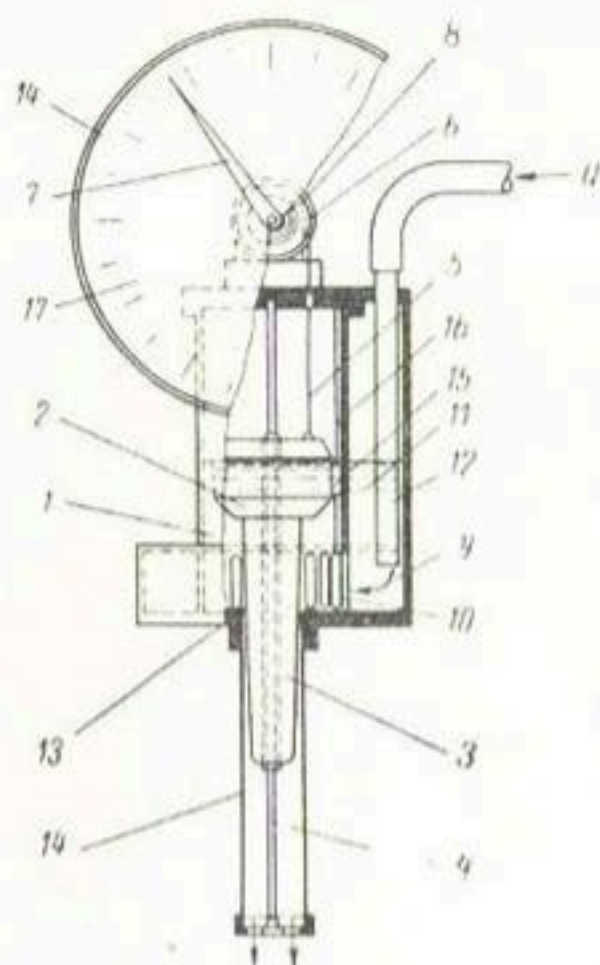


Рис. 7. Схематический разрез прибора для измерения расходов воды.

В нижней части корпуса расположена распределительная камера 9 с прорезями 10 на внутренней ее стенке. Распределительная камера соединена с приемным отсеком 11, в который вставлена подводящая жидкость трубка 12. В днище расходомера имеется центральное отверстие 13, в которое входит конус и к которому присоединена сливная трубка 14. Поплавок 2 снабжен приливом 15, скользящим по направляющей 16. Прибор также имеет круговую шкалу 17, укрепленную на корпусе 1.

Расходомер работает следующим образом. При пуске жидкости последняя через трубку 12 попадает в распределительную камеру 9, далее, через прорези 10, втекает внутрь цилиндра 1 и поднимает находящийся в нем поплавок 2; при этом конус 3 приоткрывает отверстие 13, через которое жидкость вытекает в сливную трубку 14. Каждому расходу протекающей через расходомер жидкости отвечает определенный ее уровень в цилиндре 1 и соответствующее положение поплавка 2, которое указывается стрелкой 7 на шкале 17. Последняя, путем тарировки, градуируется непосредственно в величинах расхода жидкости. Показывающий механизм может быть также использован для дистанционного измерения расходов (например, с помощью электроизмерительного прибора) и в качестве управляющего устройства.

Опытный образец расходомера, изготовленный в Фильтрационной лаборатории ВНИИГа, имеет пределы измерений расхода от 1 до 200 мл/сек и относительную погрешность, не превышающую 0,5%. Расходомер может быть выполнен в переносном и стационарном вариантах.



#### § 4. Методика экспериментальных исследований водопроницаемости лессового суглинка

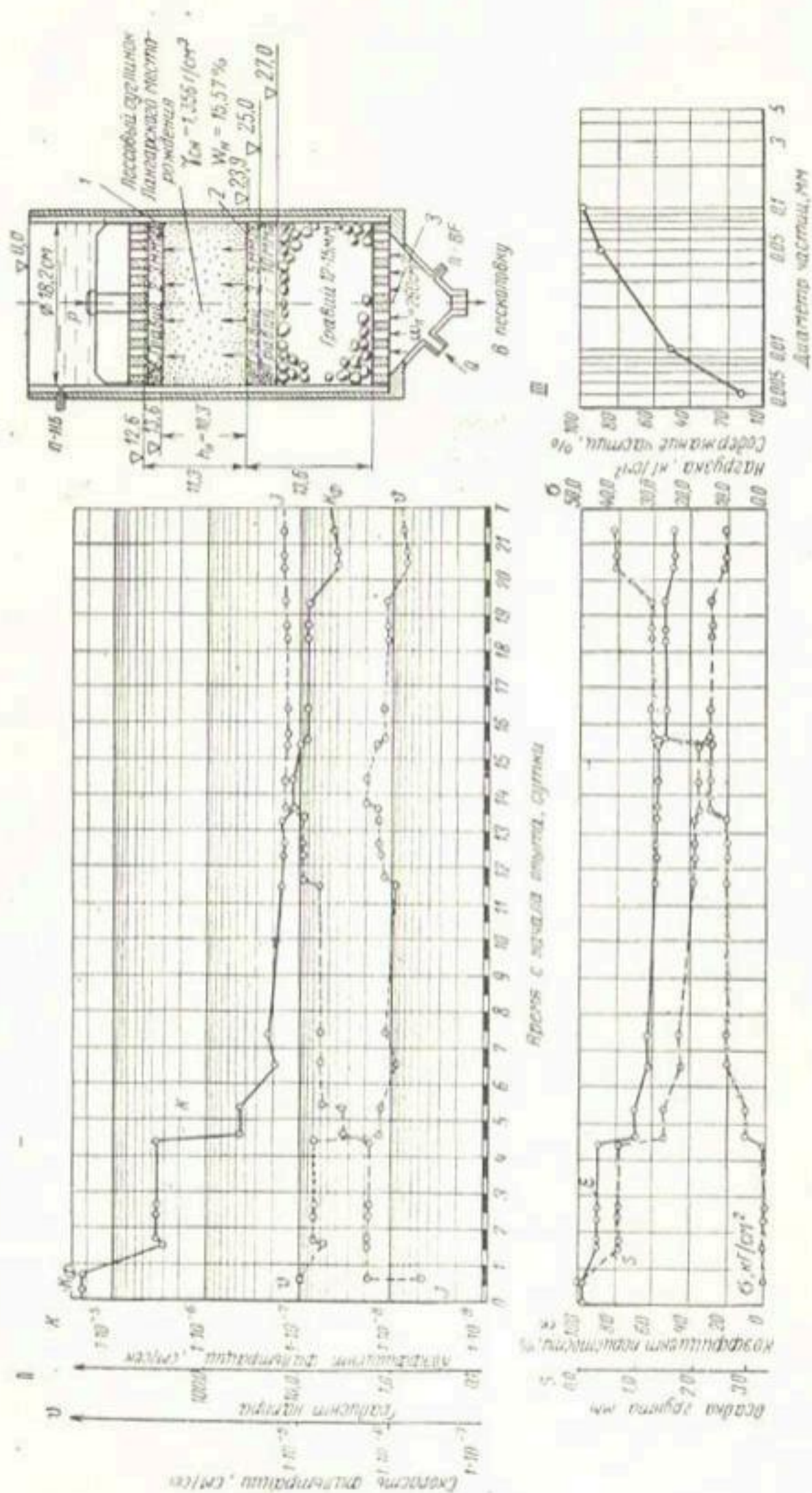
Определение водопроницаемости лессового суглинка производилось с помощью вышеупомянутых фильтрационных приборов. В большинстве случаев испытаниям подвергались образцы грунта, приготовленные в лабораторных условиях. Для этого суглинок, имеющий первоначальную влажность около 1,8%, измельчался и просеивался через сито с отверстиями 1 или 5 мм, после чего в приготовленную таким образом навеску суглинка добавлялось, при одновременном его перемешивании, необходимое количество воды. Затем увлажненный до требуемой величины суглинок с незначительным его уплотнением укладывался в прибор<sup>1</sup>. Одновременно отбирались пробы (не менее двух) для контроля начальной влажности.

При проведении опытов в фильтрационно-компрессионных приборах, с целью равномерного распределения потока по площади образца, а также для предотвращения просыпания (или продавливания) суглинка в поры подстилающего гравийного слоя или в отверстия решетки, снизу и поверх образца укладывалась фильтровальная бумага, иногда в сочетании с латунной сеткой, имеющей размер ячеек в 1 мм. После окончания загрузки прибора на верхнюю его решетку передавалось от домкрата или пружины усилие, необходимое для заданного начального уплотнения суглинка. Заметим, что получение одинаковой плотности по всему объему образца возможно в том случае, когда его высота не превышает поперечных размеров (диаметра) прибора, так как при соблюдении этого условия практически не будет проявляться „силосный эффект“, возникающий вследствие наличия сил трения между грунтом и стенками прибора. После начального уплотнения производилось замачивание суглинка водой (или химическим равновесным раствором его компонентов) в направлении снизу вверх до тех пор, пока вода не проникала через всю толщу образца, после чего прибор заполнялся водой до уровня слива, расположенного на постоянной отметке<sup>2</sup>. Для обеспечения равномерного (по всей площади) притока воды к образцу особое внимание при замачивании суглинка уделялось полному удалению воздуха из-под

<sup>1</sup> Трамбование связного грунта во время его укладки в прибор совершенно недопустимо, так как при этом образуются отдельные сильно переуплотненные слои, которые являются причиной неравномерного распределения напора по высоте образца.

<sup>2</sup> Широкое распространение получил совершенно неправильный способ подготовки связного грунта к фильтрационным испытаниям, при котором грунт укладывается в прибор в водонасыщенном состоянии. Считается, что этот способ полностью исключает влияние газовой фазы на проницаемость грунта. Результаты наших опытов показали, что во всех случаях при замачивании грунта восходящим потоком происходит практически полное его водонасыщение.





*I*—схема опыта (направление фильтрации снизу вверх); *I*—два слоя фильтровальной бумаги, датунная сетка  $2 \times 2$  мм; *2*—два слоя фильтровальной бумаги; *3*—решетка с отверстиями  $\varnothing 10$  мм; *II*—график изменения во времени осадки, коэффициентов фильтрации и пористости лессового суглинка при испытании его в вертикальном фильтрационно-компрессионном приборе; *III*—интегральная кривая гранулометрического состава суглинка.



нижней поверхности образца, для чего вначале прибор устанавливался с небольшим наклоном и скапливающийся в верхней части подстилающего слоя воздух выпускался через краник.

В процессе уплотнения и замачивания измерялись с помощью индикатора осадки верхней решетки, по которым в определенные моменты времени подсчитывался объемный вес суглинка. На этом заканчивался первый, подготовительный этап опыта. Далее поднятием бачка-дозатора создавался напор, достаточный для точного измерения расхода фильтрации. По напору и расходу подсчитывались градиент, скорость и коэффициент фильтрации (приведенные к температуре 20°C), а по суммарной осадке—объемный вес или коэффициент пористости суглинка.

В соответствии с основной целью исследований, заключавшейся в выяснении характера изменения водопроницаемости суглинка при его уплотнении, в каждом опыте постепенно увеличивалось (отдельными ступенями) сжимающее давление. Таким образом, весь опыт подразделялся на ряд этапов (периодов), продолжительность которых находилась в зависимости от времени полного выравнивания осадок и расхода фильтрации, происходившего обычно в течение двух—трех суток.

На основе полученных в опыте данных для каждого его этапа определялись значения коэффициентов фильтрации и пористости суглинка, изменение которых во времени (вместе с некоторыми другими величинами) можно наглядно представить в виде графика (рис. 8). Такая обработка результатов эксперимента позволяет затем выяснить характер интересующей нас зависимости между коэффициентами фильтрации и пористости суглинка  $k = f(\varepsilon)$  с известными его начальными параметрами (влажностью, объемным весом и крупностью агрегатов).

В целом рассмотренная методика была положена в основу проведения экспериментов на различных фильтрационных приборах. При этом, однако, обращает на себя внимание существенная особенность в определении водопроницаемости суглинка с ненарушенной структурой. В данном случае образцы суглинка отбирались непосредственно из сооружения (опытной насыпи) с помощью металлических колец внутренним диаметром 88 мм и высотой 30 мм.

Известно, что при невозможности испытаний образцов грунта на месте, их приходится парафинировать для предохранения от высыхания и механических повреждений во время перевозки. Парафинирование отнимает много времени; усложняет процесс отбора грунта и подготовку его к испытаниям. В связи с этим нами был предложен специальный контейнер для хранения и транспортировки образцов грунта, отобранных с помощью колец, без их парафинирования. Контейнер, схематически изображенный на рис. 9, представляет собой две-



пластины, изготовленные из толстой фанеры, текстолита и т. п., которые соединены болтами. Между этими пластинами помещаются кольца с грунтом. Для обеспечения полной герметизации колец на внутренней поверхности пластин укрепляется резиновая или полиэтиленовая прокладка. После того как кольца с грунтом уложены в контейнер, гайки на болтах закручиваются и, таким образом, кольца оказываются плотно прижатыми к прокладкам. Практически удобнее всего помещать в контейнер от 8 до 12 колец. Для переноски контейнера к нему прикрепляется ручка.

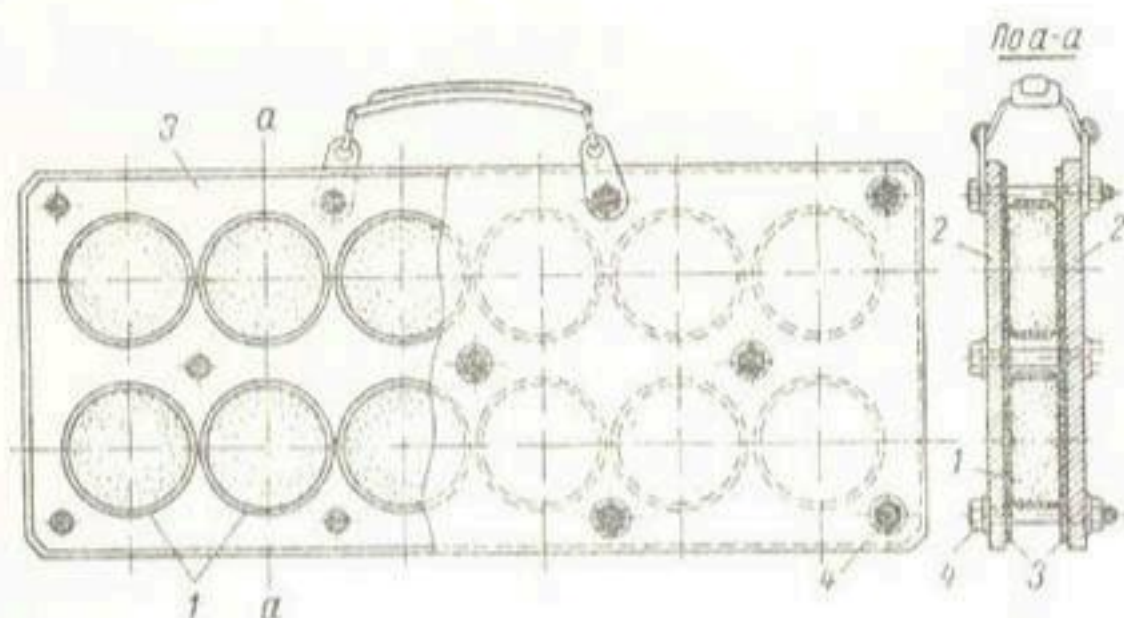


Рис. 9. Контейнер для перевозки и хранения образцов грунта, отобранных с помощью колец

1—образцы грунта в кольцах; 2—боковые пластины из фанеры или текстолита; 3—резиновые прокладки; 4—стяжные болты.

Контейнер был всесторонне испытан во время пересылки почтой и длительного хранения образцов суглинка, отобранных из опытных насыпей на строительстве Нурекской плотины в Таджикистане. При этом ни в одном случае не было замечено нарушения структуры и изменения влажности суглинка по сравнению с первоначальной.

Заканчивая описание методики экспериментального изучения фильтрационных свойств суглинка, поясним в нескольких словах примененный нами способ определения пьезометрического напора внутри испытуемого образца грунта. Этот способ основан на использовании электрического преобразователя давления (датчика) индуктивного типа, чувствительным элементом которого является стальная мембрана толщиной 0,3 мм и диаметром 20 мм. Через посредство штуцера, присоединенного к сквозному отверстию в стенке фильтрационного прибора, датчик устанавливался на требуемой высоте снаружи прибора (рис. 3). С целью предотвращения попадания грунта в мембранную полость датчика, на входе в отверстие (в месте контакта стенки с грунтом) помещалась небольшая круглая пла-



стинка из пористой керамики. Перед установкой датчика его мембранная полость и соединительный штуцер целиком заполнялись водой.

Измерения пьезометрического напора с помощью такого датчика показали, что при коэффициенте фильтрации грунта порядка  $10^{-8}$  см/сек и градиенте напора, равном  $10 \div 15$ , выравнивание давления воды происходит в течение трех часов, т. е. в сравнительно короткое время. Величина погрешности измерений не превосходит 5—7%.

### § 5. Результаты исследований фильтрационных свойств лессового суглинка

На основе анализа результатов большого числа экспериментов, в которых испытывались образцы грунта с различными начальными параметрами (влажностью, объемным весом, и крупностью агрегатов), была установлена общая закономерность изменения водопроницаемости лессового суглинка при его уплотнении. Количественно указанная закономерность характеризуется экспериментальной зависимостью между коэффициентами пористости и фильтрации суглинка:

$$k = k_0 \exp \beta (z - z_0), \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации при данном коэффициенте пористости суглинка  $z$ ;

$\beta$  — коэффициент, определяющий интенсивность снижения водопроницаемости суглинка при его уплотнении, зависящий от начальных влажности, плотности и структуры суглинка;

$k_0 = 4 \cdot 10^{-10}$  см/сек и  $z_0 = 0,05$ .

Зависимость (4), названная нами обобщенной фильтрационной характеристикой суглинка, графически изображена на рис. 10.

Из рассмотрения этого рисунка видно, что данная зависимость представлена в полулогарифмическом масштабе прямыми линиями, сходящимися в точке с координатами  $k_0$  и  $z_0$  и показывающими, насколько быстро, по мере уплотнения, уменьшается водопроницаемость суглинка с определенными начальными параметрами. Линии 1—5 получены в результате фильтрационно-компрессионных испытаний образцов суглинка, приготовленных в лаборатории, а линия 6 — в результате испытаний образцов-монолитов, отобранных из опытной насыпи. Две линии, 7 и 8, имеющие изгиб в верхней своей части, характеризуют изменение продольной водопроницаемости слоя суглинка, уложенного в прибор осе-радиальной фильтрации с возрастающим по высоте объемным весом, аналогично получаемому в натуре при послойной отсыпке и уплотнении суглинка.



Таким образом, величина водопроницаемости суглинка, согласно общей закономерности, описываемой формулой (4), резко уменьшается при увеличении его объемного веса. Например, при практически возможном уплотнении суглинка от 1,37 („насыпной объемный вес“) до 1,93 г/см<sup>3</sup>, его коэффициент фильтрации может снизиться в две тысячи раз, от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-8}$  см/сек. Коэффициент фильтрации суглинка также заметно снижается при увеличении начальной влажности. Это

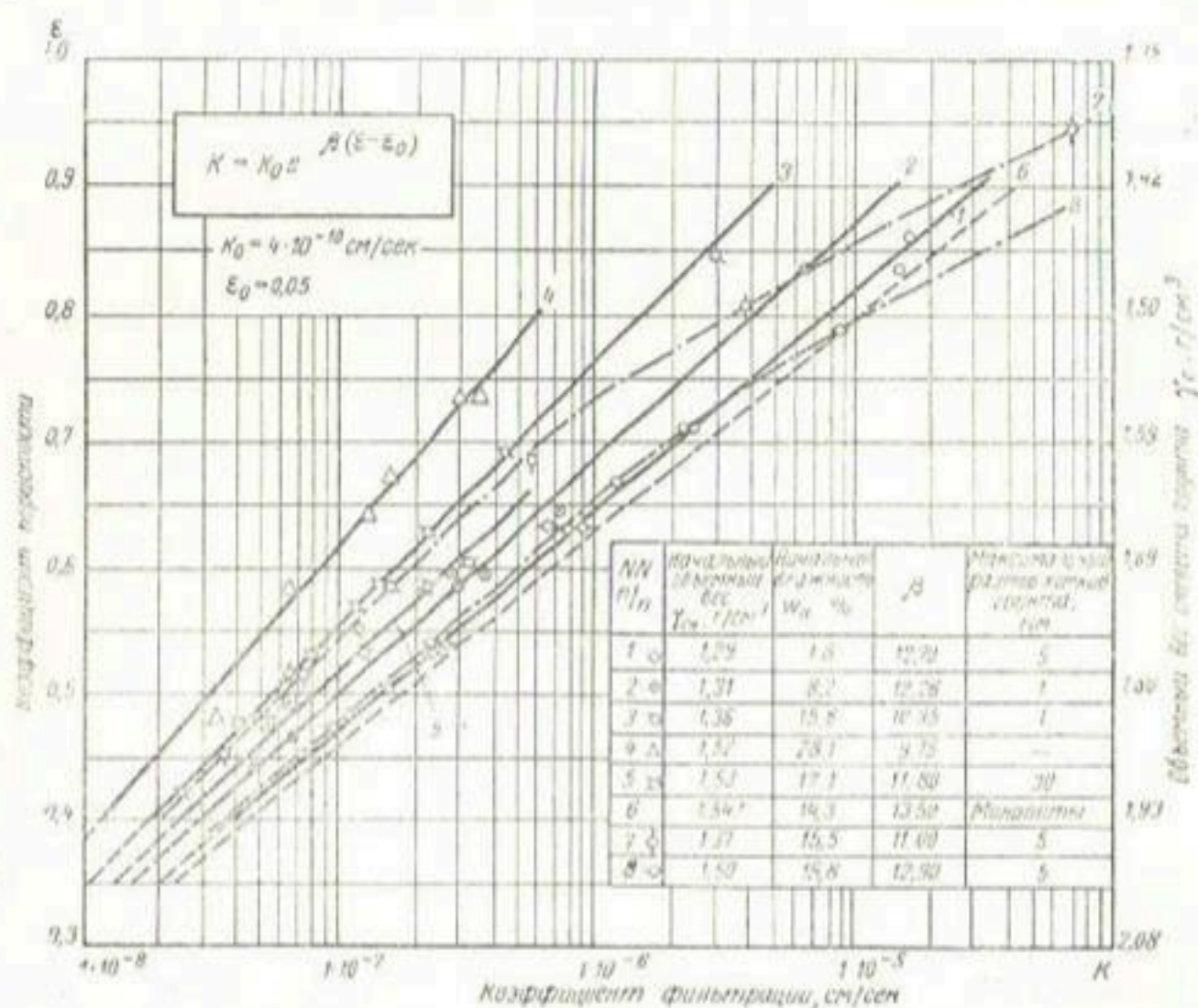


Рис. 10. Графики зависимостей между коэффициентами фильтрации и пористости лессового суглинка

Точки □ получены при испытании суглинка с  $W_H = 17,4\%$  и  $e_H = 0,49$ .

прежде всего видно по уменьшению коэффициента  $\beta$  в формуле (4). При изменении начальной влажности образцов, приготовленных в лаборатории, от 1,8 до 29% этот коэффициент, соответственно, уменьшился с 12,7 до 9,75 (см. таблицу на рис. 10). Данное обстоятельство объясняется тем, что увеличение содержания воды в суглинке способствует разрушению первоначальной комковатой его структуры, а следовательно, уменьшению макропористости.

Обращает на себя внимание факт относительного увеличения водопроницаемости суглинка по слою его укладки, которое особенно заметно при малых значениях его объемного



Результаты фильтрационных испытаний образцов суглинка, отобранных из опытной насыпи при различных нагрузках.

| № опыта       | Начальная влажность суглинка $W_n$ , % | Начальная плотность суглинка $\gamma_{с. н.}$ , г/см <sup>3</sup> | Сжимающая нагрузка<br>$\sigma = 0,164 \text{ кг/см}^2$ |                                                       |                                |                                     |
|---------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|               |                                        |                                                                   | Величина относительной осадки $s/h_n$                  | Объемный вес грунта $\gamma_{с.}$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент пористости $e$ , % | Коэффициент фильтрации $k$ , см/сек |
| 28            | 16,58                                  | 1,509                                                             | 0,0067                                                 | 1,519                                                 | 77,8                           | $1,7 \cdot 10^{-6}$                 |
| 29            | 21,16                                  | 1,365                                                             | 0,0258                                                 | 1,401                                                 | 93,0                           | $1,97 \cdot 10^{-6}$                |
| 30            | 15,52                                  | 1,374                                                             | 0,0132                                                 | 1,392                                                 | 94,1                           | $2,52 \cdot 10^{-5}$                |
| 31            | 15,98                                  | 1,669                                                             | 0,0002                                                 | 1,669                                                 | 61,8                           | $3,36 \cdot 10^{-6}$                |
| 32            | 21,14                                  | 1,532                                                             | 0,0099                                                 | 1,547                                                 | 74,8                           | $2,64 \cdot 10^{-5}$                |
| 33            | 11,52                                  | 1,451                                                             | 0,0098                                                 | 1,465                                                 | 84,5                           | $1,39 \cdot 10^{-5}$                |
| 34            | 18,42                                  | 1,467                                                             | 0,0032                                                 | 1,471                                                 | 83,8                           | $1,0 \cdot 10^{-5}$                 |
| 35            | 14,20                                  | 1,798                                                             | 0,0013                                                 | 1,800                                                 | 50,1                           | $1,27 \cdot 10^{-7}$                |
| 36            | 11,14                                  | 1,781                                                             | 0,0032                                                 | 1,786                                                 | 51,2                           | $4,36 \cdot 10^{-7}$                |
| 37            | 11,02                                  | 1,669                                                             | 0,0034                                                 | 1,674                                                 | 61,2                           | $2,43 \cdot 10^{-6}$                |
| 38            | 11,53                                  | 1,496                                                             | 0,0131                                                 | 1,515                                                 | 78,2                           | $5,30 \cdot 10^{-6}$                |
| 39            | 11,24                                  | 1,514                                                             | 0,0132                                                 | 1,534                                                 | 76,0                           | $6,73 \cdot 10^{-6}$                |
| 40            | 14,58                                  | 1,654                                                             | 0,0013                                                 | 1,656                                                 | 63,1                           | $4,19 \cdot 10^{-6}$                |
| 41            | 17,71                                  | 1,470                                                             | 0,0066                                                 | 1,479                                                 | 82,8                           | $1,11 \cdot 10^{-5}$                |
| 42            | 8,86                                   | 1,635                                                             | 0,0117                                                 | 1,654                                                 | 63,3                           | $6,46 \cdot 10^{-6}$                |
| 43            | 10,14                                  | 1,624                                                             | 0,0048                                                 | 1,636                                                 | 65,2                           | $3,92 \cdot 10^{-6}$                |
| 44            | 9,57                                   | 1,748                                                             | 0,0013                                                 | 1,750                                                 | 54,3                           | $1,33 \cdot 10^{-6}$                |
| 45            | 17,52                                  | 1,565                                                             | 0,0089                                                 | 1,579                                                 | 71,2                           | $9,51 \cdot 10^{-7}$                |
| Среднее . . . | 14,27                                  | 1,547                                                             | 0,0076                                                 | 1,584                                                 | 71,5                           | $6,99 \cdot 10^{-6}$                |



| № опыта       | Начальная влажность $W_n$ , % | Начальная плотность суглинка $\gamma_{с.н}$ , г/см <sup>3</sup> | Сжимающая нагрузка<br>$\sigma = 1,0 \text{ кг/см}^2$ |                                                       |                                |                                     |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|               |                               |                                                                 | Величина относительной осадки $s/h_n$                | Объемный вес грунта $\gamma_{с.}$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент пористости $e$ , % | Коэффициент фильтрации $k$ , см/сек |
| 28            | 16,58                         | 1,509                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 29            | 21,16                         | 1,365                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 30            | 15,52                         | 1,374                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 31            | 15,98                         | 1,669                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 32            | 21,14                         | 1,532                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 33            | 11,52                         | 1,451                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 34            | 18,42                         | 1,467                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 35            | 14,20                         | 1,798                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 36            | 11,14                         | 1,781                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 37            | 11,02                         | 1,669                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 38            | 11,53                         | 1,496                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 39            | 11,24                         | 1,514                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 40            | 14,58                         | 1,654                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 41            | 17,71                         | 1,470                                                           | —                                                    | —                                                     | —                              | —                                   |
| 42            | 8,86                          | 1,635                                                           | 0,0314                                               | 1,688                                                 | 60,0                           | $4,21 \cdot 10^{-6}$                |
| 43            | 10,14                         | 1,624                                                           | 0,0201                                               | 1,659                                                 | 62,8                           | $1,92 \cdot 10^{-6}$                |
| 44            | 9,57                          | 1,748                                                           | 0,0148                                               | 1,774                                                 | 52,2                           | $1,16 \cdot 10^{-6}$                |
| 45            | 17,52                         | 1,565                                                           | 0,0245                                               | 1,604                                                 | 68,3                           | $6,45 \cdot 10^{-7}$                |
| Среднее . . . | 14,27                         | 1,547                                                           | 0,0227                                               | 1,681                                                 | 60,8                           | $1,98 \cdot 10^{-6}$                |



| № опыта         | Начальная влажность суглинка $W_n$ , % | Начальная плотность суглинка $\gamma_{с.н'}$ , г/см <sup>3</sup> | Сжимающая нагрузка<br>$\sigma = 2,50 \text{ кг/см}^2$ |                                                    |                                |                                     |
|-----------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|                 |                                        |                                                                  | Величина относительной осадки $s, h_n$                | Объемный вес грунта $\gamma_c$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент пористости $e$ , % | Коэффициент фильтрации $k$ , см/сек |
| 28              | 16,58                                  | 1,509                                                            | 0,0771                                                | 1,635                                              | 65,2                           | $4,54 \cdot 10^{-7}$                |
| 29              | 21,16                                  | 1,365                                                            | 0,1096                                                | 1,533                                              | 76,3                           | $1,93 \cdot 10^{-7}$                |
| 30              | 15,52                                  | 1,374                                                            | 0,1421                                                | 1,601                                              | 68,9                           | $1,20 \cdot 10^{-6}$                |
| 31              | 15,98                                  | 1,669                                                            | 0,0232                                                | 1,708                                              | 58,2                           | $2,39 \cdot 10^{-6}$                |
| 32              | 21,14                                  | 1,532                                                            | 0,0930                                                | 1,689                                              | 50,0                           | $6,48 \cdot 10^{-7}$                |
| 33              | 11,52                                  | 1,451                                                            | 0,1016                                                | 1,615                                              | 67,2                           | $1,48 \cdot 10^{-6}$                |
| 34              | 18,42                                  | 1,467                                                            | 0,0681                                                | 1,574                                              | 71,8                           | $2,70 \cdot 10^{-6}$                |
| 35              | 14,20                                  | 1,798                                                            | 0,0259                                                | 1,845                                              | 46,1                           | $3,86 \cdot 10^{-8}$                |
| 36              | 11,14                                  | 1,781                                                            | 0,0292                                                | 1,834                                              | 47,2                           | $1,38 \cdot 10^{-7}$                |
| 37              | 11,02                                  | 1,669                                                            | 0,0436                                                | 1,745                                              | 54,7                           | $1,14 \cdot 10^{-6}$                |
| 38              | 11,53                                  | 1,496                                                            | 0,0688                                                | 1,606                                              | 68,5                           | $1,18 \cdot 10^{-6}$                |
| 39              | 11,24                                  | 1,514                                                            | 0,0759                                                | 1,638                                              | 65,0                           | $1,22 \cdot 10^{-6}$                |
| 40              | 14,58                                  | 1,654                                                            | 0,0356                                                | 1,715                                              | 57,4                           | $1,48 \cdot 10^{-6}$                |
| 41              | 17,71                                  | 1,470                                                            | 0,0934                                                | 1,621                                              | 66,6                           | $1,17 \cdot 10^{-6}$                |
| 42              | 8,86                                   | 1,635                                                            | 0,0621                                                | 1,743                                              | 55,0                           | $1,53 \cdot 10^{-6}$                |
| 43              | 10,14                                  | 1,624                                                            | 0,0409                                                | 1,693                                              | 59,4                           | $1,44 \cdot 10^{-6}$                |
| 44              | 9,57                                   | 1,748                                                            | 0,0279                                                | 1,798                                              | 50,3                           | $8,21 \cdot 10^{-7}$                |
| 45              | 17,52                                  | 1,565                                                            | 0,0472                                                | 1,642                                              | 64,4                           | $3,39 \cdot 10^{-7}$                |
| Среднее . . . . | 14,27                                  | 1,547                                                            | 0,0647                                                | 1,679                                              | 61,2                           | $1,09 \cdot 10^{-6}$                |



| № опыта       | Начальная влажность $W_n$ , % | Начальная плотность суглинка $\gamma_{с.н}$ , г/см <sup>3</sup> | Сжимающая нагрузка<br>$\sigma = 5,0 \text{ кг/см}^2$ |                                                    |                                |                                     |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|               |                               |                                                                 | Величина относительной осадки $s/h_n$                | Объемный вес грунта $\gamma_c$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент пористости $e$ , % | Коэффициент фильтрации $k$ , см/сек |
| 28            | 16,58                         | 1,509                                                           | 0,1140                                               | 1,703                                              | 58,7                           | $2,12 \cdot 10^{-7}$                |
| 29            | 21,16                         | 1,365                                                           | 0,1354                                               | 1,578                                              | 70,9                           | $2,33 \cdot 10^{-8}$                |
| 30            | 15,52                         | 1,374                                                           | 0,1752                                               | 1,665                                              | 62,3                           | $4,06 \cdot 10^{-7}$                |
| 31            | 15,98                         | 1,669                                                           | 0,0432                                               | 1,744                                              | 55,0                           | $1,48 \cdot 10^{-6}$                |
| 32            | 21,14                         | 1,532                                                           | 0,1229                                               | 1,746                                              | 54,7                           | $3,59 \cdot 10^{-7}$                |
| 33            | 11,52                         | 1,451                                                           | 0,1344                                               | 1,676                                              | 61,2                           | $7,72 \cdot 10^{-7}$                |
| 34            | 18,42                         | 1,467                                                           | 0,1103                                               | 1,648                                              | 63,9                           | $9,64 \cdot 10^{-7}$                |
| 35            | 14,20                         | 1,798                                                           | 0,0389                                               | 1,870                                              | 44,5                           | $2,86 \cdot 10^{-8}$                |
| 36            | 11,14                         | 1,781                                                           | 0,0390                                               | 1,853                                              | 45,7                           | $8,39 \cdot 10^{-8}$                |
| 37            | 11,02                         | 1,669                                                           | 0,0637                                               | 1,782                                              | 51,5                           | $6,90 \cdot 10^{-7}$                |
| 38            | 11,53                         | 1,496                                                           | 0,0983                                               | 1,659                                              | 62,8                           | $5,69 \cdot 10^{-7}$                |
| 39            | 11,24                         | 1,514                                                           | 0,1056                                               | 1,692                                              | 59,7                           | $5,26 \cdot 10^{-7}$                |
| 40            | 14,58                         | 1,654                                                           | 0,0607                                               | 1,760                                              | 53,6                           | $6,58 \cdot 10^{-8}$                |
| 41            | 17,71                         | 1,470                                                           | 0,1266                                               | 1,683                                              | 60,5                           | $5,02 \cdot 10^{-7}$                |
| 42            | 8,86                          | 1,635                                                           | 0,0924                                               | 1,801                                              | 49,9                           | $3,54 \cdot 10^{-7}$                |
| 43            | 10,14                         | 1,624                                                           | 0,0622                                               | 1,731                                              | 56,0                           | $5,57 \cdot 10^{-7}$                |
| 44            | 9,57                          | 1,748                                                           | 0,0429                                               | 1,826                                              | 47,9                           | $2,85 \cdot 10^{-7}$                |
| 45            | 17,52                         | 1,565                                                           | 0,0715                                               | 1,685                                              | 60,2                           | $2,69 \cdot 10^{-7}$                |
| Среднее . . . | 14,27                         | 1,517                                                           | 0,0909                                               | 1,727                                              | 56,6                           | $4,85 \cdot 10^{-7}$                |



| № опыта       | Начальная влажность $W_n$ , % | Начальная плотность суглинка $\gamma_{с.н.}$ , г/см <sup>3</sup> | Сжимающая нагрузка $\sigma = 8,0 \text{ кг/см}^2$ |                                                    |                                |                                     |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|               |                               |                                                                  | Величина от-носительной осадки $s/h_n$            | Объемный вес грунта $\gamma_c$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент пористости $e$ , % | Коэффициент фильтрации $k$ , см/сек |
| 28            | 16,58                         | 1,509                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 29            | 21,16                         | 1,365                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 30            | 15,52                         | 1,374                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 31            | 15,98                         | 1,669                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 32            | 21,14                         | 1,532                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 33            | 11,52                         | 1,451                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 34            | 18,42                         | 1,467                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 35            | 14,20                         | 1,798                                                            | —                                                 | —                                                  | —                              | —                                   |
| 36            | 11,14                         | 1,781                                                            | 0,052                                             | 1,875                                              | 44,0                           | $5,57 \cdot 10^{-8}$                |
| 37            | 11,02                         | 1,669                                                            | 0,0805                                            | 1,815                                              | 48,4                           | $4,46 \cdot 10^{-7}$                |
| 38            | 11,53                         | 1,496                                                            | 0,1180                                            | 1,696                                              | 59,2                           | $3,36 \cdot 10^{-7}$                |
| 39            | 11,24                         | 1,514                                                            | 0,1254                                            | 1,731                                              | 56,0                           | $2,94 \cdot 10^{-7}$                |
| 40            | 14,58                         | 1,654                                                            | 0,0816                                            | 1,800                                              | 50,1                           | $3,21 \cdot 10^{-7}$                |
| 41            | 17,71                         | 1,470                                                            | 0,1467                                            | 1,722                                              | 56,9                           | $3,00 \cdot 10^{-7}$                |
| 42            | 8,86                          | 1,635                                                            | 0,1114                                            | 1,839                                              | 46,8                           | $2,06 \cdot 10^{-7}$                |
| 43            | 10,14                         | 1,624                                                            | 0,0793                                            | 1,763                                              | 53,3                           | $3,80 \cdot 10^{-7}$                |
| 44            | 9,57                          | 1,748                                                            | 0,0551                                            | 1,849                                              | 46,1                           | $1,48 \cdot 10^{-7}$                |
| 45            | 17,52                         | 1,565                                                            | 0,0897                                            | 1,719                                              | 57,2                           | $2,16 \cdot 10^{-7}$                |
| Среднее . . . | 14,27                         | 1,547                                                            | 0,0893                                            | 1,781                                              | 51,8                           | $2,70 \cdot 10^{-7}$                |

Примечания. 1. Образцы суглинка отбирались из различных точек насыпи, расположенных на отметках  $0,25 \pm 1,2 \text{ м}$  по отношению к поверхности ее основания. 2. В опытах № 28, 29, 31, 33, 35 и 37—45 испытывались образцы суглинка, отобранные путем врезки проботорного кольца в горизонтальном направлении, а в опытах № 30, 32, 34 и 36—в вертикальном.



веса ( $1,35-1,45 \text{ г/см}^3$ ), когда коэффициенты фильтрации вдоль и поперек слоев различаются между собой в 5—10 раз. Это различие водопроницаемостей, называемое анизотропией фильтрационных свойств, весьма характерное для сооружений, построенных из связных грунтов, получило количественную оценку в результате экспериментов на приборах продольной (осе-радиальной) и поперечной фильтрации, в которых воспроизводились условия движения воды в двух указанных направлениях. Опыты показали, что с возрастанием интенсивности уплотняющей нагрузки до  $5-7 \text{ кг/см}^2$  ( $\varepsilon = 0,65-0,70$ ) величина анизотропии становится пренебрежимо малой и в таких случаях, например при расчетах фильтрации в достаточно высоких плотинах, ее не следует учитывать.

Особого рассмотрения заслуживают эксперименты, в которых испытывались образцы суглинка из опытной насыпи, отсыпанной слоями толщиной 0,4 м с последующим их уплотнением виброкатком ПВК-25. Отбор образцов в количестве двадцати штук производился с помощью металлических колец с внутренним диаметром 88 мм и высотой 30 мм в разных точках вертикальной стенки траншеи, вырытой бульдозером в теле насыпи. Основное внимание при отборе образцов обращалось на то, чтобы кольцо врезалось в грунт без перекоса, иначе могло произойти образование щели между грунтом и стенкой кольца.

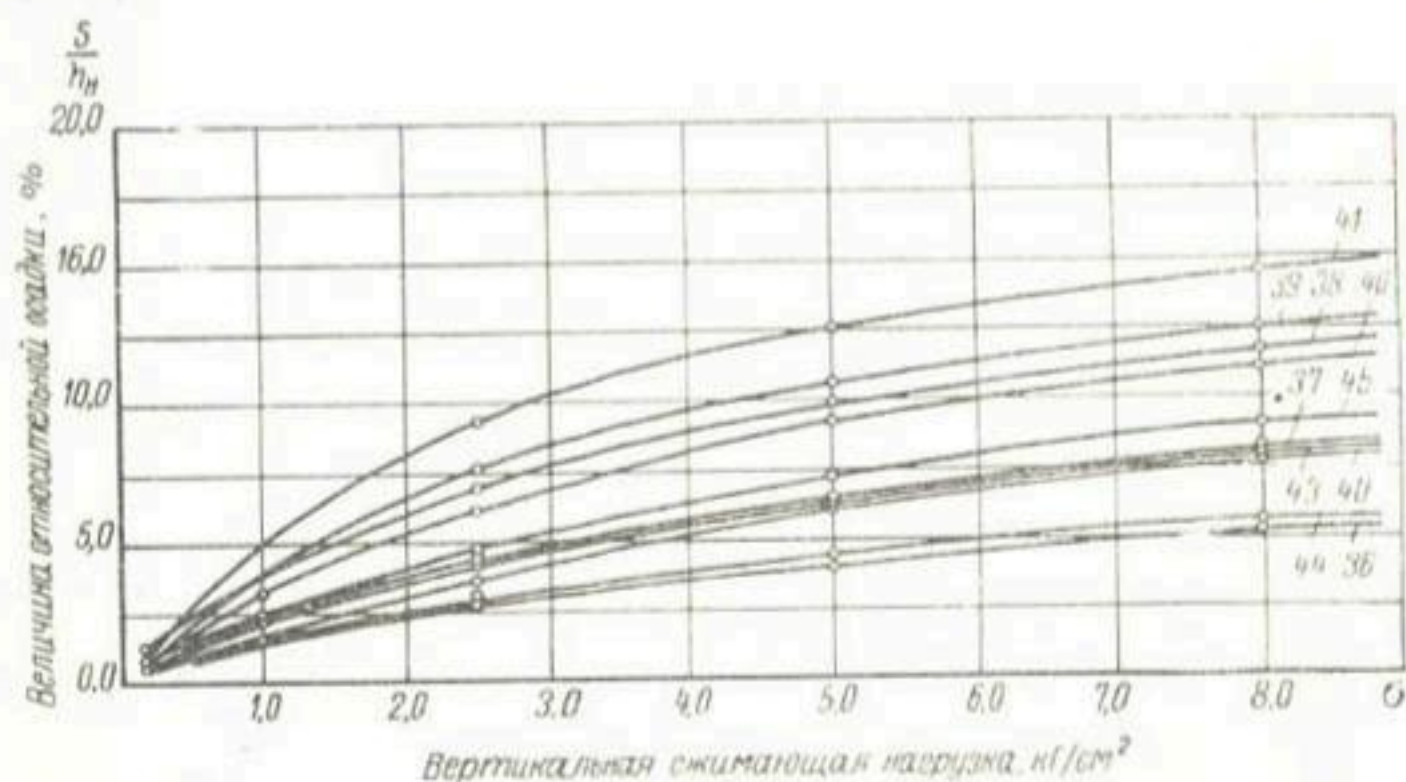


Рис. 11. Графики зависимостей относительной осадки образцов суглинка из опытной насыпи от величины вертикальной сжимающей нагрузки, при одновременной фильтрации воды в суглинке.

На основании анализа результатов испытаний, приведенных в табл. 2, можно сделать следующие выводы.

1. Начальный объемный вес и влажность суглинка изменялись в пределах  $\gamma_{с.н} = 1,365 \div 1,798 \text{ г/см}^3$  и  $W_n = 8,86 \div 21,16\%$ ;



средние значения были, соответственно, равны  $1,574 \text{ г/см}^3$  и  $14,27\%$ . Такой большой диапазон изменения указанных характеристик суглинка обусловлен неодинаковым его уплотнением по высоте слоев насыпи, о чем упоминалось в § 4.

2. Последовательное увеличение в процессе опыта вертикальной нагрузки от начальной, равной  $0,164 \text{ кг/см}^2$ , до  $8,0 \text{ кг/см}^2$ , вызвало соответствующие деформации сжатия образцов, которые для образцов, имевших начальный объемный вес, равный в среднем  $1,697 \text{ г/см}^3$ , составляли  $5-8\%$ , а для образцов с начальным объемным весом  $1,465 \text{ г/см}^3$  (так же средним для всей группы) —  $12-15\%$ .

Таким образом, изменение объемного веса образцов на  $0,232 \text{ г/см}^3$  приводит к увеличению их деформаций сжатия в два раза. Это соотношение должно сохраниться при нагрузках свыше  $8 \text{ кг/см}^2$ , так как кривые изменения относительных деформаций, показанные на графике рис. 11, будут в указанной области эквидистантными.

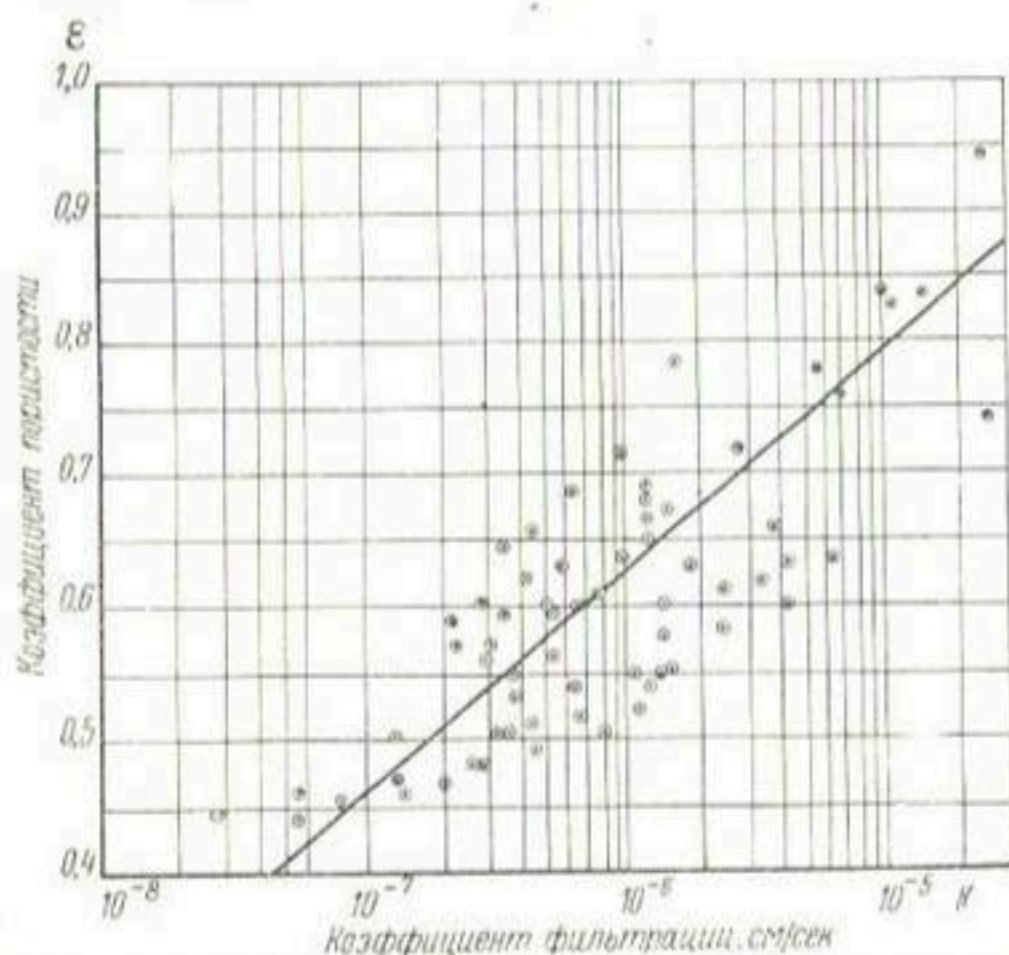


Рис. 12. График зависимости между коэффициентами фильтрации и пористости суглинка, уложенного в опытную насыпь

Прямая характеризует зависимость  $k = 4 \cdot 10^{-10} \exp 13,5(\epsilon - 0,05) \text{ см/сек}$ .

3. Точки, соответствующие найденным в экспериментах значениям коэффициентов фильтрации и пористости образцов, оказались расположенными на графике  $k-\epsilon$  (рис. 12) в очень узкой полосе, определяющей взаимную связь (корреляцию) между средними величинами коэффициентов фильтрации и пористости суглинка с „ненарушенной“ структурой. Эта связь



также выражается формулой (4), в которой коэффициент  $\beta$ , характеризующий интенсивность снижения водопроницаемости суглинка, равен 13,5. Для приготовленных в лаборатории образцов суглинка с той же начальной влажностью, около 15%, коэффициент  $\beta$  равен 10,95 (линия 3 на графике рис. 10). Таким образом, здесь отчетливо проявляется зависимость водопроницаемости суглинка от его структуры.

4. Водопроницаемость образцов суглинка, отобранных в одной и той же точке насыпи, но в разных направлениях (вертикальном и горизонтальном), оказалась практически одинаковой, в связи с чем было установлено отсутствие фильтрационной анизотропии суглинка в пределах весьма малого его объема.

## § 6. Расчетный метод определения водопроницаемости суглинка

Водопроницаемость ядра (или экрана) плотины будет изменяться по высоте вследствие уплотнения грунта под действием веса вышележащих слоев. Например, в нижних сечениях ядра Нурекской плотины интенсивность уплотняющей нагрузки достигнет  $60 \text{ кг/см}^2$ . Непосредственное использование формулы (4) для оценки водопроницаемости различных зон ядра плотины оказывается в достаточной мере затруднительным, так как при этом необходимо дополнительно определять по компрессионным характеристикам коэффициенты пористости суглинка. Более простая расчетная зависимость может быть получена на основе упомянутой формулы (4) и соотношения между коэффициентами пористости глинистых грунтов и уплотняющей нагрузкой [8]:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - \operatorname{tg} \alpha (\ln p_2 - \ln p_1) = \varepsilon_1 - a \ln p_2/p_1, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_1$  — коэффициент пористости при  $p_1$ ;

$\varepsilon_2$  — коэффициент пористости при  $p_2$ ;

$a = \operatorname{tg} \alpha$  — угловой коэффициент, который называется абсолютным коэффициентом компрессии.

В результате опытов, в которых определялись коэффициенты пористости суглинка при различных уплотняющих нагрузках, было установлено, что при оптимальной начальной влажности суглинка  $W_n = 15\text{—}17\%$  его абсолютный коэффициент компрессии  $a = 0,10$ . Так, используя величины относительных деформаций образцов суглинка, отобранных из насыпи (см. графики на рис. 11), можно определить их коэффициенты пористости по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{\gamma} - 1 = \frac{\Delta(1 - s/h_n)}{\gamma_{с.н}} - 1, \quad (6)$$



где  $\Delta$  — удельный вес суглинка, равный  $2,7 \text{ г/см}^3$ ;

$s/h_n$  — относительная деформация сжатия образца при данной нагрузке;

$\gamma_{с.н}$  — объемный вес скелета суглинка в начале опыта.

Затем, подставив в формулу (5) величины нагрузки  $p$  и соответствующие им значения  $\epsilon$ , находим коэффициент  $a$ . На основе полученных данных можно также определить величину сжимающего давления  $p_0$ , при котором коэффициент пористости суглинка  $\epsilon_0 = 0,05$ . Оказалось, что это давление  $p_0 = 1900 \text{ кг/см}^2$ . Тогда, согласно (5), коэффициент пористости суглинка при давлении  $p$  будет равен

$$\epsilon = \epsilon_0 + a \ln \frac{p_0}{p} = 0,05 + 0,1 \ln \frac{1900}{p}, \quad (7)$$

Подставляя в формулу (4) вместо  $\epsilon$  (7), получаем выражение для подсчета коэффициента фильтрации суглинка при данном сжимающем давлении  $p$ ,  $\text{кг/см}^2$ :

$$k = k_0 \exp \zeta \ln \frac{1900}{p}, \quad (8)$$

где  $\zeta = a\beta$ .

Для образцов суглинка, приготовленных в лаборатории при  $\gamma_{с.н} = 1,35-1,50 \text{ г/см}^3$  и  $W_n = 10-16\%$ , среднее значение  $\beta = 12$ , в связи с чем

$$k = 3,4 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-2,76 \lg p} \text{ см/сек.} \quad (9)$$

Например, при  $p = 50 \text{ кг/см}^2$  расчетный коэффициент фильтрации суглинка с указанными начальными характеристиками будет равен  $2,13 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек}$ , что почти совпадает с его значением, полученным в эксперименте ( $k = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек}$ ). Для образцов суглинка, отобранных из насыпи ( $\gamma_{с.н} = 1,547 \text{ г/см}^3$  и  $W_n = 14,3\%$ ),  $\beta = 13,5$ . В соответствии с этим расчет водопроницаемости суглинка в ядре плотины может производиться по формуле

$$k = 7,1 \cdot 10^{-6} e^{-31 \lg p} \text{ см/сек.} \quad (10)$$

Таким образом, если известно сжимающее давление в рассматриваемом горизонтальном сечении ядра, то можно сразу по формуле (10) подсчитать коэффициент фильтрации ядра в этом сечении. Для самых нижних сечений ядра (на глубине 250—300 м), где давление  $p = 60 \text{ кг/см}^2$ , расчетное значение коэффициента фильтрации  $k = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек}$ , а в средних сечениях (при  $p = 30 \text{ кг/см}^2$ ) —  $k = 8,4 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек}$ .

## § 7. Результаты исследований начального градиента напора при фильтрации воды в суглинке

К. Терцаги [9], изучавший водопроницаемость глинистых грунтов различной дисперсности, нашел, что коэффициент



фильтрации начинает сильно уменьшаться, когда размер частиц грунта доходит до 0,1 мк. Он предположил, что уменьшение коэффициента фильтрации связано с возрастанием вязкости воды, находящейся внутри пор с очень малыми поперечниками.

В дальнейшем было обнаружено нарушение линейной зависимости между расходом воды, профильтровавшейся через глинистый грунт, и градиентом напора (известно, что указанная зависимость является выражением закона Дарси). В связи с этим изучению фильтрации в дисперсных глинистых грунтах был посвящен целый ряд работ, например [10, 11], которые подтвердили „аномальный“ характер протекания воды в таких грунтах. Оказалось, что фильтрация воды в этих случаях осуществляется лишь при достижении определенной величины (отличной от нуля) градиента напора, получившего название „начального градиента“.

В настоящее время широко распространена теория, объясняющая указанное явление наличием на стенках пор грунта тонких слоев (пленок) воды с несколько необычными свойствами. Так, например, было установлено [12], что „пленочная“ вода способна в состоянии покоя выдерживать сдвигающие (касательные) усилия. В этом отношении весьма показателен опыт Гриффитса [13] со стальным шариком, проталкиваемым через отверстие. Если шарик, диаметр которого меньше диаметра отверстия на очень малую величину, предварительно смочить в воде, а затем поместить его в отверстие, то в узком промежутке между ним и стенками отверстия образуется слой воды, выдерживающий значительные касательные напряжения при проталкивании шарика.

Все современные теории движения жидкостей в капиллярных системах учитывают влияние этих слоев, получивших название слоев связанной или пленочной воды, возникновение которых объясняется действием электрических сил между заряженными частицами двух фаз (твердого тела и жидкости). Эти слои при достаточно малой концентрации растворенных в воде веществ имеют диффузный характер и образуют сольватную пленку (гидратную оболочку), толщина которой для воды на стекле, согласно исследованиям Б. В. Дерягина [14], оказалась в пределах  $10^{-4} \div 10^{-5}$  см.

На основании этих исследований можно сделать вывод о существовании „начального градиента“ при фильтрации воды в глинистых грунтах, поперечные размеры пор которых примерно того же порядка.

Вместе с тем, нами было установлено [15], что толщина сольватных слоев на стенках пор резко уменьшалась при возрастании концентрации растворенных в воде веществ. Так, для раствора компонентов портландского цемента с удельным электрическим сопротивлением около 1000 ом·см, толщина этого слоя не превышала 0,002 мк, т. е. была пренебрежимо



малой. Кроме того, в ряде экспериментальных исследований водопроницаемости глинистых грунтов, в том числе при весьма больших сжимающих давлениях, достигавших  $350 \text{ кг/см}^2$  [16], не обнаружено отклонения от закона Дарси в широком диапазоне скоростей фильтрации. Все это указывает на слабую изученность вопроса о начальном градиенте фильтрации в глинистых грунтах, имеющем большое практическое значение при расчетах фильтрации и порового давления внутри земляных плотин, противодавления под бетонными сооружениями, в основании которых залегают глинистые грунты, а также при прогнозировании возможных осадок сооружений вследствие фильтрационной консолидации грунтов основания.

В связи с этим нами была предпринята попытка выявить с помощью эксперимента наличие при фильтрации в суглинке начального градиента напора. В тщательно поставленных опытах, проводившихся в фильтрационно-компрессионном приборе с площадью сечения  $260 \text{ см}^2$ , были испытаны образцы суглинка с различными характеристиками, которые указаны в табл. 3.

Таблица 3

Основные характеристики лессового суглинка в опытах по изучению начального градиента фильтрации

| № опыта | Начальный объемный вес $\gamma_s$ , н/г/см <sup>3</sup> | Начальная влажность $W_n$ , % | Объемный вес во время опыта $\gamma_s$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент пористости $e$ , % | Коэффициент фильтрации $k$ , см/сек | Коэффициент водонасыщения $G$ | Влажность в конце опыта $W_k$ , % |
|---------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 12      | 1,56                                                    | 25,8                          | 1,95                                                       | 38,1                           | $2,25 \cdot 10^{-8}$                | 1,0                           | 16,4                              |
| 13      | 1,46                                                    | 17,8                          | 1,83                                                       | 47,5                           | $4,23 \cdot 10^{-8}$                | 0,99                          | 17,4                              |

Описанные опыты имели некоторые методические отличия, состоящие в следующем.

1. Для того чтобы исключить влияние осмотических процессов, использовался раствор, находящийся в химическом равновесии с испытуемым грунтом. Этот раствор, имеющий удельное электрическое сопротивление  $\rho = 540 \text{ ом} \cdot \text{см}$ , был получен после отделения твердой фазы из грунтовой суспензии.

2. В связи с тем, что при малых градиентах напора (в ряде случаев, меньших единицы) фильтрация воды через испытуемый грунт была весьма незначительной, все измерения в опыте начинались после полного завершения консолидации грунта (затухания его осадок). Несоблюдение данного условия может привести к ошибкам в определении интенсивности фильтрации, поскольку во время уплотнения грунта, за счет его осадки, внутри прибора освобождается определенный объем, на заполнение которого отвлекается дополнительный расход воды.



Кроме того, при этом происходит выдавливание воды из пор грунта. Указанные явления трудно поддаются количественной оценке и их, по возможности, надо избегать.

3. В каждом опыте через окна в корпусе прибора осуществлялось тщательное наблюдение за состоянием контактной зоны и, по мере необходимости, производился выпуск воздуха

через специальное отверстие, так как вследствие наличия прослойки воздуха (или газа), скопившегося под нижней поверхностью образца, могло произойти резкое уменьшение фильтрации. Возможность выделения газа особенно необходимо принимать во внимание при испытании илистых грунтов.

4. Для предотвращения изменения первоначальной структуры грунта в процессе испытаний все опыты проводились в условиях сжатия грунта внешним давлением, превышающим в несколько раз интенсивность фильтрационных сил.

5. С целью возможно более точного определения скоростей фильтрации при небольших градиентах напора, когда на результаты измерений заметное влияние оказывают колебания температуры, опыты проводились в течение длительного времени (порядка нескольких месяцев).

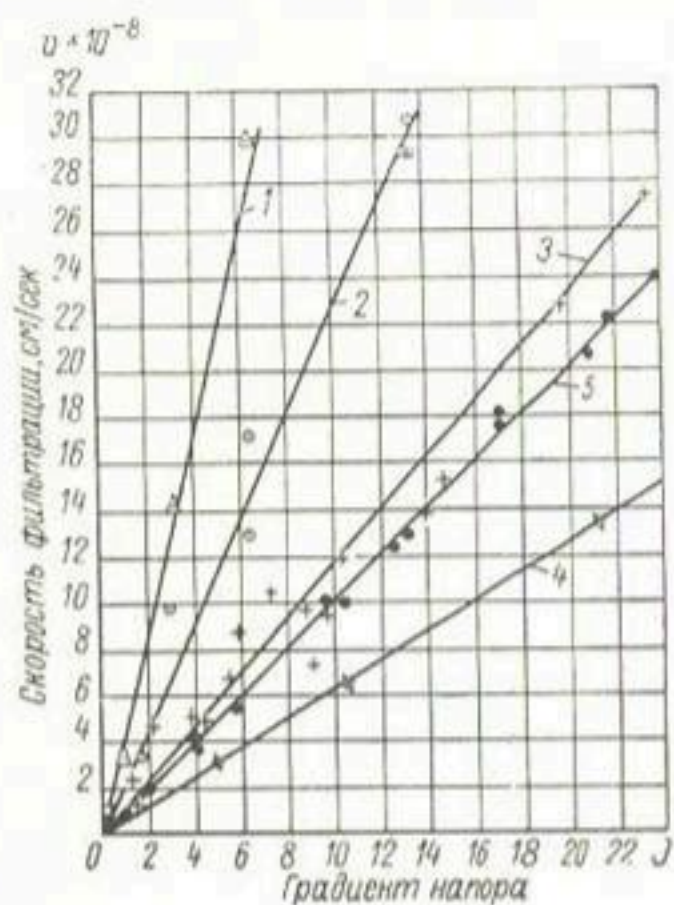


Рис. 13. Графики зависимостей между градиентом напора и скоростью фильтрации для различных связных грунтов

1—лессовый суглинок,  $k=1,23 \cdot 10^{-8}$  см/сек (опыт № 13, продолжительностью 76 суток); 2—лессовый суглинок,  $k=2,25 \cdot 10^{-8}$  см/сек (опыт № 12, продолжительностью 84 суток); 3—кембрийская глина,  $k=1,16 \cdot 10^{-8}$  см/сек (опыт № 16, продолжительностью 132 суток); 4—ил Азовского моря,  $k=6,29 \cdot 10^{-9}$  см/сек (опыт № 15, продолжительностью 39 суток); 5—тектоническая «глинка трещин», заполняющая отдельные трещины в скальном массиве основания Нурекской плотины,  $k=1,0 \cdot 10^{-8}$  см/сек (опыт № 17, продолжительностью 270 суток).

Этими экспериментами, один из которых продолжался 76 дней, а другой—84 дня, была подтверждена линейная зависимость между скоростью фильтрации воды в сильно уплотненном лессовом суглинке и градиентом напора, изменявшемся в диапазоне от 0,9 до 13,5 (рис. 13). Таким образом, удалось получить убедительные доказательства отсутствия начального градиента напора при фильтрации воды в суглинке. Практическое значение этого вывода трудно переоценить, так как, согласно опубликованным в литературе данным, например [17], фильтрация в связных грунтах с относительно более высокой водопроницаемостью полностью прекращалась при снижении



градиентов напора до нескольких единиц и, в ряде случаев, до нескольких десятков.

Имевшаяся возможность в отношении осуществления соответствующих экспериментов была использована нами для дальнейших исследований с целью выяснения начального градиента напора при фильтрации в грунтах иного минералогического и зернового состава.

В качестве испытуемых грунтов были выбраны кембрийская гидрослюдистая глина из забоя туннеля Ленинградского метрополитена, ил со дна подходного канала Ждановского порта на Азовском море и тектоническая „глинка трения“, заполняющая отдельные трещины в скальном массиве основания Нурекской плотины.

Зерновой состав этих грунтов характеризуется следующими относительными количествами содержащихся в них частиц (в процентах):

| Диаметр частиц,<br>мм | >0,1 | 0,1—0,05 | 0,05—<br>0,01 | 0,01—<br>0,005 | <0,005 |
|-----------------------|------|----------|---------------|----------------|--------|
| Кембрийская глина     | —    | 7,2      | 29,4          | 13,8           | 49,6   |
| Ил                    | 0,5  | 7,4      | 15,4          | 59,4           | 17,1   |
| Глинка трения         | 13,3 | 22,9     | 38,8          | 8,6            | 16,4   |

Остальные наиболее важные характеристики грунтов даны в табл. 4.

Таблица 4

| Грунт                   | Удельный вес грунта $\Delta$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | Характерные влажности, % |       |       | Удельное электрическое сопротивление химически равновесного раствора $\rho$ , ом/см | Объемный вес грунта в опыте $\gamma_{с.н.}$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент фильтрации грунта в опыте $k$ , см/сек |
|-------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                         |                                                     | $W_T$                    | $W_p$ | $W_n$ |                                                                                     |                                                                 |                                                    |
| Кембрийская глина . . . | 2,75                                                | 27,7                     | 16,5  | 11,2  | 1000                                                                                | 1,65                                                            | $1,16 \cdot 10^{-8}$                               |
| Ил . . . . .            | 2,22                                                | 61,8                     | 28,9  | 32,9  | 330                                                                                 | 1,37                                                            | $6,29 \cdot 10^{-9}$                               |
| Глинка трения . . .     | 2,73                                                | 20,1                     | 13,8  | 6,3   | 3720                                                                                | 2,12                                                            | $1,0 \cdot 10^{-8}$                                |

Начальные значения объемного веса и влажности грунтов во время их укладки в прибор были, соответственно, равны: для кембрийской глины—1,45 г/см<sup>3</sup> и 34,8%; для ила—0,972 г/см<sup>3</sup> и 65,3%; для „глинки трения“—2,12 г/см<sup>3</sup> и 10,6%.



В результате выполненных исследований фильтрационных свойств этих грунтов, проводившихся по методике, аналогичной для опытов с лессовым суглинком, также не удалось обнаружить начальный градиент напора, что подтверждается графиками зависимостей  $v = kI$ , которые показаны на рис. 13 (графики 3, 4 и 5). Как видно из рассмотрения графика 3, скорость фильтрации воды в кембрийской глине пропорционально уменьшается по мере снижения градиента напора, вплоть до значений, близких к 0,5, что находится в явном противоречии с данными экспериментов [18], в которых фильтрация в кембрийской каолиновой глине, имевшей сопоставимые водопроницаемость и объемный вес, прекращалась при градиентах напора около 13—17. Следует, однако, отметить, что число пластичности этой глины было равно 32%, а у глины, испытывавшейся в наших опытах, — 11,2%. Можно надеяться, что вопрос о начальном градиенте напора при фильтрации воды в связных дисперсных грунтах будет окончательно решен в ближайшем будущем, после того как удастся создать технически совершенные экспериментальные установки с высокой „разрешающей способностью“, рассчитанные на определение скоростей фильтрации порядка  $10^{-10} + 10^{-12}$  см/сек.

## Глава вторая

### ИЗУЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СУГЛИНКА ВОЗДЕЙСТВИЮ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА

В каждом конкретном случае проектирования каменно-земляной плотины необходимо, в первую очередь, установить причины возможного нарушения фильтрационной прочности ее водупорного элемента, а затем определить соответствующие критерии (допускаемые диаметры пор обратного фильтра, градиенты и скорости фильтрационного потока) для данного грунта, используемого в качестве материала ядра или экрана плотины. Оценка правильности всех последующих расчетов и принятых конструктивных решений должна производиться на основе этих критериев.

Причины возможного нарушения фильтрационной прочности глинистого ядра или экрана плотины сводятся к следующим пяти основным их видам:

1) размоканию глинистого грунта во время замачивания, происходящему в виде отрыва („отслаивания“) отдельных его комочков в порах фильтра;

2) выдавливанию грунта под действием фильтрационных сил в поры фильтра, обычно называемому „контактным выпором“;

3) поверхностному размыву грунта фильтрационным потоком, стекающим вдоль контакта ядра (экрана) плотины с фильтром („контактный размыв“);



4) внутреннему размыву грунта потоком в сквозных трещинах, образовавшихся, например, в ядре вследствие неравномерных его осадок;

5) размыву (эрозии) грунта фильтрационным потоком по открытым с поверхности трещинам в скальном основании плотины.

Условия возникновения каждого из перечисленных видов нарушения фильтрационной прочности ядра или экрана подробно рассмотрены в этой главе на примерах исследований, выполнявшихся для обоснования проекта Нурекской плотины. Здесь также освещены некоторые вопросы, относящиеся к раскрытию физической сущности явлений фильтрационного разрушения связных грунтов.

## § 8. Изучение устойчивости суглинка при замачивании

Нередко замачивание связного грунта сопровождается разрыхлением его структуры. Это явление, называемое размоканием, происходит на контакте с обратным фильтром в виде самопроизвольного отслаивания частиц или агрегатов грунта. В местах отслаивания образуются сводики, из которых, по мере дальнейшего распространения процесса размокания возникают значительные по объему каверны (рис. 14), резко снижающие несущую способность грунта. Вследствие этого при неправильно подобранном составе обратного фильтра, размокание может явиться причиной разрушения водоупорного элемента плотины, например экрана, во время его замачивания со стороны нижнего бьефа.

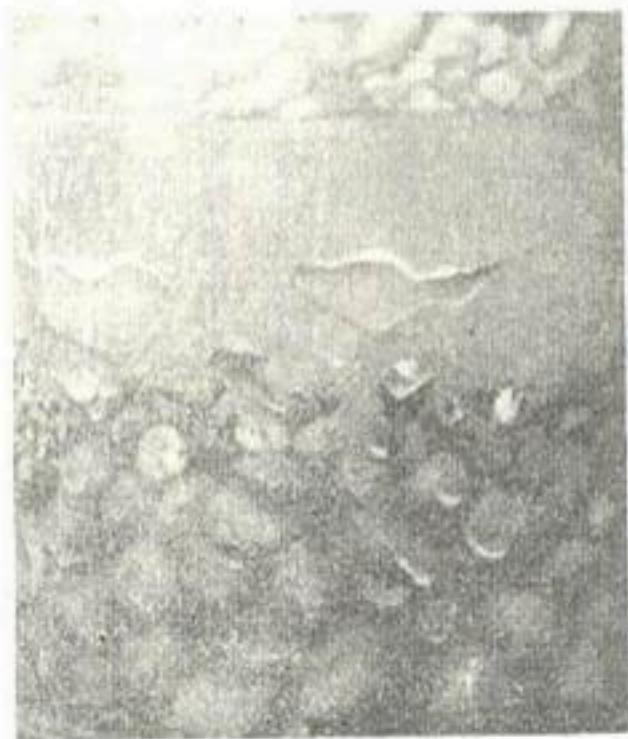


Рис. 14. Разрушившийся при замачивании слой суглинка (внутри слоя отчетливо видны заполненные водой каверны и скопившийся в них воздух, выдавленный из пор суглинка).

С целью выяснения физической сущности и некоторых, наиболее важных с точки зрения практики, особенностей размокания, были поставлены эксперименты в фильтрационно-суффозионных приборах с прозрачными стенками (замачивание суглинка производилось со стороны подстилающего слоя гравия различной



крупности<sup>1</sup>). В результате этих экспериментов удалось понять причины размокания суглинка и выяснить допустимый наибольший диаметр пор гравия (фильтра), при которых не происходило разрушения суглинка, так как образовавшиеся своды оказывались устойчивыми.

Согласно приведенным в табл. 5 данным, этот диаметр, являющийся одним из критериев для подбора состава фильтра, примерно равен 3 мм. Опыты по изучению размыва суглинка ядра плотины фильтрационным потоком в трещинах основания также показали, что интенсивное размокание суглинка, сопровождающееся вынадением его в трещину, наблюдается во всех случаях, когда раскрытие трещины превышает 1 мм.

Таблица 5

Результаты опытов по определению устойчивости суглинка при его замачивании

| № опыта           | Начальный объемный вес суглинка $\gamma_{с.н.}$ , г/см <sup>3</sup> | Начальная влажность суглинка $W_n$ , % | Крупность частиц фильтра $D$ , мм | Расчетный диаметр пор фильтра $D_0 = \frac{D}{2,4}$ , мм | Величина вертикальной нагрузки $\sigma$ , кг/см <sup>2</sup> | Характер разрушения суглинка                               |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 51                | 1,75                                                                | 17,6                                   | 12—15                             | 5,6                                                      | —                                                            | Произошло полное разрушение образца в процессе замачивания |
| 52                | 1,70                                                                | 10,0                                   | 12—15                             | 5,6                                                      | —                                                            | То же                                                      |
| 53                | 1,80                                                                | 19,0                                   | 7—10                              | 3,5                                                      | 0,6                                                          | Разрушения не наблюдалось                                  |
| 54                | 1,80                                                                | 17,8                                   | 7—10                              | 3,5                                                      | 0,12                                                         |                                                            |
| 62                | 1,70                                                                | 16,7                                   | 7—10                              | 3,5                                                      | 1,0                                                          | То же                                                      |
| 64                | 1,75                                                                | 17,0                                   | 15                                | 6,2                                                      | 1,0                                                          | Произошло разрушение образца                               |
| 65                | 1,75                                                                | 17,0                                   | 10                                | 4,2                                                      | 1,0                                                          | То же                                                      |
| 65-а <sup>1</sup> | 1,63                                                                | 16,2                                   | 10—12                             | 4,6                                                      | 0,8                                                          | "                                                          |

<sup>1</sup> Фотография грунта в этом опыте показана на рис. 14.

В тех же опытах было замечено, что устойчивость суглинка против размокания резко повышается с увеличением его начальной влажности. Так, при влажности, соответствующей полному водонасыщению, размокание суглинка практически будет отсутствовать. Этот весьма важный факт подтверждает наше предположение о механизме размокания, суть которого

<sup>1</sup> Нижняя поверхность слоя суглинка при этом имела незначительный уклон, благодаря которому во время замачивания полностью вытеснялся водой воздух, находившийся в порах гравия.



состоит в том, что разрушение грунта в данном случае происходит вследствие сжатия находящегося внутри его пор воздуха, быстро перемещающимися капиллярными менисками. Размокание может сопровождаться отрывом (отслаиванием) частиц грунта, потерявших связь между собой при разрыхлении. Непрерывно повторяющийся процесс отслаивания наиболее отчетливо проявляется в зоне „фронта промачивания“ грунта там, где внутрипоровое давление достигает максимальных значений. В связи с этим становится понятным упоминавшийся выше факт отсутствия размокания полностью водонасыщенного грунта. Ранее было замечено [19], что размокания глинистого грунта также не происходило, если он предварительно уплотнялся при влажности, соответствующей максимальной молекулярной влагоемкости.

Здесь, для сравнения, уместно напомнить о существующих гипотезах, поясняющих причины размокания связных грунтов. Согласно одной из них, размокание грунта обусловлено тем, что при его замачивании исчезает капиллярное давление во внутрипоровой воде, ранее обжимавшей скелет грунта. По другой гипотезе при смачивании глинистого грунта водой происходит быстрое набухание коллоидных оболочек, приводящее к увеличению объема наружного слоя грунта. В результате неравномерных деформаций, возникающих на границе между наружным и внутренним слоями, происходит скалывание и отделение наружного (увлажненного) слоя от основной массы грунта. Этот процесс многократно повторяется: от образца грунта отделяются все новые и новые слои, пока не разрушится весь образец.

Затрагивая вопросы структурной прочности, следует упомянуть о том, что сцепление частиц или агрегатов (комков) глинистого грунта обусловлено наличием между ними обратимых связей, имеющих различную физико-химическую природу. Например, сцепление частиц молекулярными (ван-дер-ваальсовыми) силами преимущественно наблюдается при образовании коагуляционных структур. Кроме того, в реальных грунтах большое значение имеют кристаллизационные связи и связи, возникающие вследствие действия капиллярных сил. Обратимые связи часто разрушаются во время замачивания грунта по причине миграции воды к участкам контактов между частицами (адсорбционное понижение прочности грунта).

Однако, как показали наши эксперименты, основной причиной размокания лессового суглинка являются растягивающие напряжения, возникающие в нем при интенсивном капиллярном впитывании воды (о чем упоминалось выше). Уменьшение же капиллярного обжатия скелета суглинка и набухание коллоидных оболочек его частиц оказывает весьма малое влияние на процесс размокания. Этот вывод подтверждается недавно опубликованной статьей [20], в которой описывается случай



образования каверн вблизи поверхности промачивания грунта вследствие сжатия находящегося в его порах воздуха капиллярными менисками.

Таким образом, исходя из указанной схемы (рис. 15) разрушения грунта при замачивании, условие его устойчивости можно выразить неравенством

$$c > p_{\text{в}},$$

где  $c$  — величина сцепления грунта;

$p_{\text{в}}$  — давление воздуха в порах грунта в зоне поверхности капиллярных менисков.

В связи с этим исключительно важное значение приобретает разработка способов оценки капиллярного давления воды в грунте.

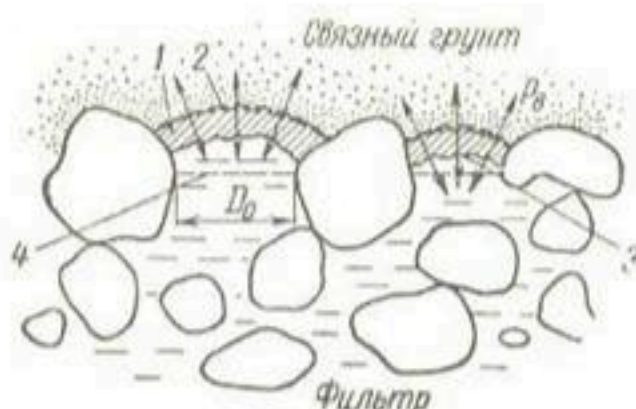


Рис. 15. Схема размокания связного грунта на контакте с фильтром

1—зона капиллярного впитывания; 2—каверна; 3—сводки; 4—первоначальная поверхность грунта.

Обобщая полученные в экспериментах данные, можно сделать следующие выводы:

1) разрушение суглинистого грунта, при его замачивании со стороны крупнозернистого материала обратного фильтра, происходящее в виде отрыва или отслаивания отдельных его комочков (агрегатов), выпадающих под действием силы тяжести в фильтр,

обусловлено резким повышением внутрипорового давления в грунте вследствие интенсивного капиллярного впитывания им воды;

2) устойчивость суглинистого грунта при его замачивании сохраняется, если поперечные размеры пор фильтра не превышают двух-трех миллиметров.

Последний вывод надо иметь в виду, когда суглинистый грунт используется в качестве материала экрана каменно-земляной плотины.

## § 9. Определение капиллярного давления воды в суглинке

Описываемый ниже способ определения „эффективного“ капиллярного давления воды в грунте или другом пористом теле, который был ранее предложен нами [21], заключается в следующем.

Представим себе, что через образец грунта (рис. 16) фильтрует вода под действием гидростатического напора величиной  $H_{\text{ф}}$ . В том случае, когда поверхность образца, через ко-



торую выходит фильтрационный поток, каким-либо образом защищена от высыхания (например, находится под уровнем воды), установившийся расход фильтрации будет равен

$$Q_{\phi} = k \frac{H_{\phi}}{l} \omega, \quad (11)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации грунта;  
 $l$  — толщина (длина) образца;  
 $\omega$  — площадь поперечного сечения образца.

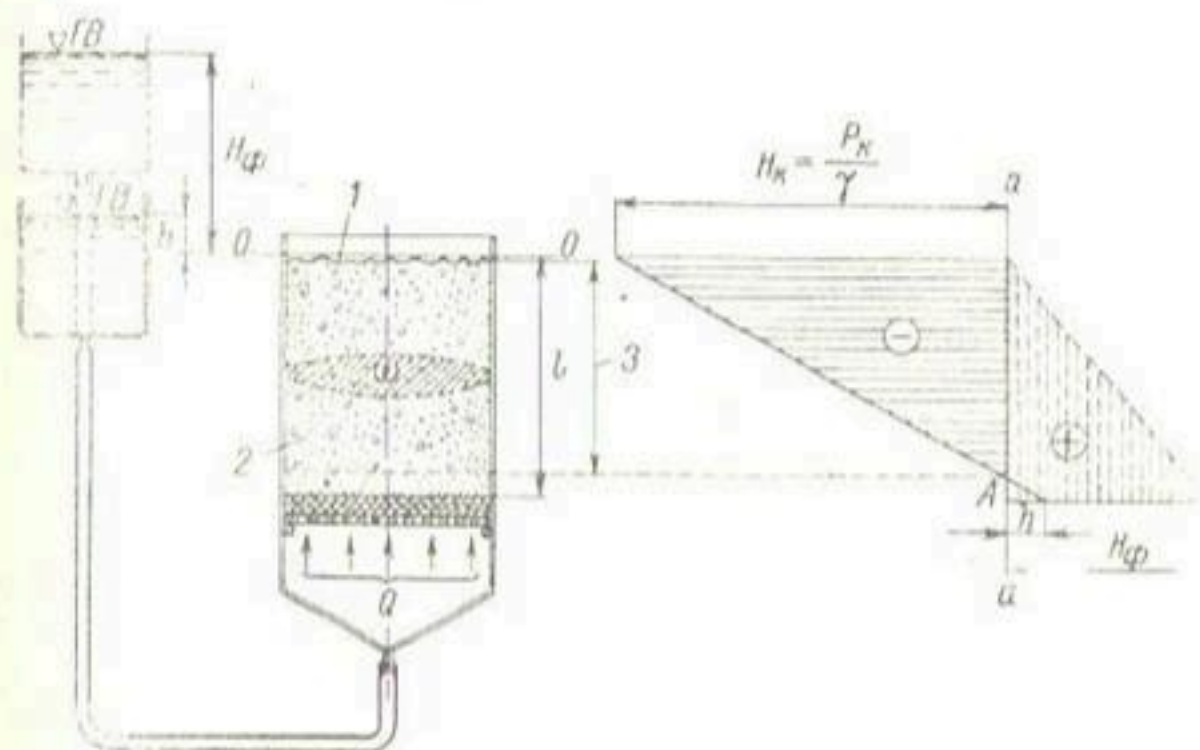


Рис. 16. Схема опыта по определению капиллярного давления воды в грунте

1 — поверхность капиллярных менисков; 2 — образец; 3 — зона „вакуума“.

Если затем образец со стороны упомянутой поверхности (низовой грани) подвергнуть высушиванию, то в его порах возникнут капиллярные мениски, после чего при снижении гидростатического напора до нуля (или минимального значения  $h$ ) фильтрация будет продолжаться, но уже под действием капиллярного давления<sup>1</sup>.

Очевидно, что при высушивании поверхности образца скорость фильтрации должна быть равна скорости испарения, т. е. объему воды, испаряющейся с единицы площади в еди-

<sup>1</sup> В данном случае термин „капиллярное давление“ означает интенсивность растягивающих усилий во внутрипоровой воде, возникающих непосредственно под капиллярными менисками. Это принятое в физике определение капиллярного давления не следует путать с тем, которое встречается в учебниках по механике грунтов. Там обычно под капиллярным давлением подразумевается сжимающее напряжение в скелете грунта, возникающее от усилий, передающихся на стенки пор со стороны менисков.



ницу времени. При полном высушивании этой скорости будет соответствовать расход

$$Q_k = k \frac{H_k + h}{l} \omega, \quad (12)$$

где  $H_k$  — капиллярный напор, или „эффективная“ высота пассивного капиллярного поднятия воды в порах образца<sup>1</sup>.

Под „эффективным“ поднятием следует понимать капиллярное поднятие в системе, состоящей из пор с одинаковым „эффективным“ радиусом, которое в определенном отношении (например, в отношении создания градиента давления) эквивалентно капиллярному поднятию в системе (грунте), состоящей из различных по своим поперечным размерам пор.

Приравнивая выражения для коэффициента фильтрации, полученные из (11) и (12), находим, что

$$H_k = H_\phi \frac{Q_k}{Q_\phi} - h. \quad (13)$$

По этой методике был поставлен ряд опытов с целью определения величины капиллярного давления воды в суглинке различной плотности. В одном из них образец суглинка толщиной  $l = 12,7$  см с площадью поперечного сечения  $\omega = 170$  см<sup>2</sup> имел начальную влажность  $W_n = 17,3\%$  и объемный вес  $\gamma_s = 1,86$  г/см<sup>3</sup>. В первой части опыта установившийся фильтрационный расход  $Q_\phi$ , соответствующий напору  $H_\phi = 166$  см, был равен  $4,07 \cdot 10^{-5}$  см<sup>3</sup>/сек. Во второй части, продолжавшейся непрерывно более 60 часов, расход  $Q_k$  достиг своего постоянного значения  $8,9 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/сек примерно через 10 часов после начала высушивания низовой поверхности образца с помощью вентилятора. Этот расход вычислялся по замерам понижения уровня воды в градуированной трубке (бюретке), являющейся „верхним бьефом“ прибора. Подставив указанные значения  $Q_\phi$ ,  $Q_k$  и  $H_\phi$  в формулу (13), получили  $H_k = 36,4$  м.

В двух других опытах величина  $H_k$  оказалась равной 20 м при  $\gamma_s = 1,8$  г/см<sup>3</sup> и 11,5 м при  $\gamma_s = 1,7$  г/см<sup>3</sup>.

Зная высоту капиллярного поднятия воды  $H_k$ , можно определить „эффективный“ диаметр пор грунта  $d_k$  по формуле Жюрена

$$d_k = \frac{4\sigma}{\gamma_w H_k} \cos \theta, \quad (14)$$

<sup>1</sup> Помимо случая высушивания, „пассивное“ капиллярное поднятие воды можно наблюдать при понижении уровня грунтовых вод, когда мениски располагаются в сужениях (перехватах) поровых каналов, что, вместе с гистерезисом смачивания, является причиной значительного различия между „пассивным“ и „активным“ капиллярными поднятиями воды в грунте.



где  $\sigma$  — величина поверхностного натяжения на границе раздела фаз, равная 0,073 г/см;

$\gamma_v$  — объемный вес воды;

$\theta$  — угол смачивания, зависящий от свойства материала стенок поры и условий смачивания.

Вычисленные по этой формуле „эффективные“ диаметры пор суглинка в опытах изменялись от 0,84 до 2,61 мк. Они оказались весьма близкими к средним их значениям ( $1,7 \div 2,68$  мк), подсчитанным по формуле В. Н. Кондратьева [22]:

$$d_0 = 0,655 \eta_* d_{50}, \quad (15)$$

где  $\eta_* = d_n/d_{100-n}$  — параметр неоднородности грунта, равный отношению диаметров частиц грунта, соответствующих значениям  $n$  и  $100-n$  по интегральной кривой зернового состава грунта;

$d_{50}$  — средний диаметр частиц грунта.

Интересно отметить, что в суглинке, имеющем пористость  $n = 0,34$  ( $\gamma_s = 1,78$  г/см<sup>3</sup>), около одной трети объема его порового пространства занимают поры с диаметрами менее 0,5 мк.

Это было установлено в результате исследований структуры суглинка крио-электрическим методом, сущность которого изложена в нашей работе „Определение количественной характеристики порового пространства бетона“, Сб. докладов по гидротехнике, вып. 2, Госэнергоиздат, 1961.

## § 10. Определение условий возникновения контактного выпора суглинка

Выдавливание связного грунта в поры крупнозернистого материала обратного фильтра, происходящее вследствие воздействия на грунт фильтрационных сил и сил сжатия, обусловленных, например, весом сооружения, называется контактным выпором. Это явление может иметь место как во время эксплуатации сооружения, так и в период его строительства, когда по причине интенсивного возрастания нагрузки (веса сооружения) грунт переходит в пластичное или даже в текучее состояние. Условие отсутствия контактного выпора представляет собой один из критериев фильтрационной прочности водоупорных элементов каменнонабросных плотин.

Опыты показывают, что критический градиент фильтрации, при котором происходит контактный выпор, зависит прежде всего от поперечных размеров (диаметров) пор фильтра, а также от величины сцепления грунта, следовательно, от его плотности. Попытка теоретического определения критического градиента впервые предпринята Р. Н. Давиденковым [23]. Он рассмотрел условия устойчивости связного грунта в зоне контакта (сопряжения) его с обратным фильтром на основе



расчетной схемы отрыва от массы грунта отдельных частиц и целых комочков (агрегатов). Р. Н. Давиденков считал, что отрыв произойдет тогда, когда на внутренней поверхности отрывающегося в результате действия фильтрационных сил и собственного веса объема грунта будут преодолены силы сцепления (под которыми в данном случае следует понимать сопротивление грунта разрыву). Он считал также, что разрушение грунта, происходящее вследствие отрыва частиц, может прекратиться, если на контакте его с фильтром после небольшого „отслаивания“ образуются устойчивые сводики.

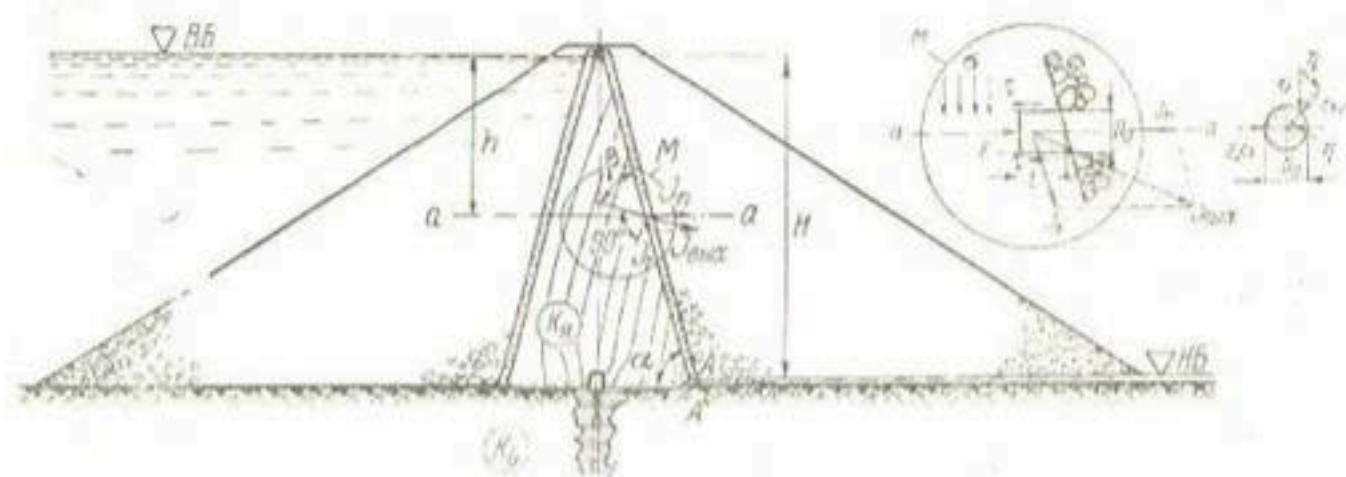


Рис. 17. Схема действия сил на выдавливаемый элемент грунта при контактном выпоре

$$I_H = \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta; \quad I_T = \sin \alpha; \quad I_{\text{вых}} = \frac{\sin \alpha}{\cos \beta}.$$

Предложенная Р. Н. Давиденковым схема расчета грунтовых водоупорных элементов плотин по условию отсутствия контактного выпора получила дальнейшее развитие в последующих работах других авторов, однако вопрос об устойчивости связанного грунта при контактном выпоре до сих пор остается нерешенным. В связи с этим при проектировании ряда высоких каменнонабросных плотин (в том числе Нурекской) вновь обратились к изучению указанного вопроса. Здесь можно отметить выполненные за последние годы в ЛПИ и ВОДГЕО исследования [24, 25], окончательно подтвердившие несоответствие упомянутой схемы разрушения связанного грунта физической сущности наблюдаемых при этом явлений.

В результате наших опытов удалось установить, что при отсутствии обжатия грунта внешним давлением контактный выпор характеризуется деформациями сдвига, обусловленными действием фильтрационных сил, а последующее разрушение грунта происходит таким образом. Вначале (при достижении критического градиента) через отдельную наиболее крупную пору в слое фильтра выдавливается сравнительно небольшой элемент грунта, и это влечет за собой его разрыхление в зоне выдавливания. Одновременно возрастают градиенты напора, что,



в свою очередь, вызывает прорыв остальной толщи грунта. По образовавшемуся „фильтрационному ходу“ грунт затем довольно быстро размывается потоком воды, устремившемся из верхнего бьефа.

Оценка фильтрационной прочности водопорного устройства (ядра, экрана) плотины по условию отсутствия контактного выпора может быть произведена на основе сопоставления удерживающих и сдвигающих сил, действующих на выделенный в толще ядра или экрана цилиндрический элемент (отсек) грунта (рис. 17), диаметр которого равен диаметру наиболее крупной поры фильтра в рассматриваемом сечении.

Удерживающими (пассивными) силами являются силы сцепления и трения, действующие по поверхности выделенного элемента<sup>1</sup>. Сила сцепления

$$C = c\pi D_0 l + c \frac{\pi D_0^2}{4} = c\pi D_0 \left( l + \frac{D_0}{4} \right), \quad (16)$$

где  $c$  — удельная величина сцепления, зависящая от плотности (объемного веса) грунта;

$l$  — длина выдавливаемого элемента грунта;

$D_0$  — диаметр поры фильтра.

Сила бокового трения

$$T = \pi D_0 l \sigma_{r_{cp}} \operatorname{tg} \varphi, \quad (17)$$

где  $\sigma_{r_{cp}}$  — среднее по поверхности элемента нормальное напряжение;

$\varphi$  — угол внутреннего трения грунта.

В соответствии с показанной на рис. 17 схемой действия вертикальных сжимающих напряжений  $\sigma$  и бокового давления  $\xi\sigma$  находим, что сила

$$\begin{aligned} T &= \pi D_0 l \operatorname{tg} \varphi \frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma_r d\gamma_1 = 2D_0 l \operatorname{tg} \varphi \int_0^{\pi/2} (\sigma \sin \gamma_1 + \xi \sigma \cos \gamma_1) d\gamma_1 = \\ &= 2D_0 l \sigma (1 + \xi) \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\xi$  — коэффициент бокового давления грунта.

Экспериментальными исследованиями лессовидного суглинка лангарского месторождения, проводившимися в Лаборатории механики грунтов ВНИИГа, было обнаружено наличие линейной зависимости между коэффициентами бокового и внутрипорового давления. В условиях полной стабилизации (отсутствие осадок) величина  $\xi$  в среднем оказалась равной 0,3.

<sup>1</sup> Вес элемента вследствие относительно малой его величины в расчет не принимаем.



Сдвигающими силами являются:  
фильтрационная

$$W = \alpha_2 \gamma_w \frac{\pi D_0^2}{4} I_n, \quad (19)$$

где  $\alpha_2$  — коэффициент поверхностной пористости (коэффициент противодействия), обычно принимаемый в расчетах равным единице;

$I_n$  — направленная в сторону выдавливания составляющая выходного градиента напора (в зоне сопряжения с обратным фильтром);

сила бокового давления

$$F = \xi \sigma \frac{\pi D_0^2}{4}, \quad (20)$$

также направленная в сторону выдавливания грунта.

Допуская с запасом, что боковое давление достигает своей полной величины на расстоянии от поверхности сопряжения с фильтром, приблизительно равном диаметру поры, можно считать  $l = D_0$ . Тогда, приравнявая суммы удерживающих и сдвигающих сил, определим критический градиент напора  $I_{кр}$ , при котором произойдет выдавливание грунта:

$$I_{кр} = \frac{5c + \sigma [8/\pi \operatorname{tg} \varphi (1 + \xi) - \xi]}{\alpha_2 \gamma_w D_0}. \quad (21)$$

Из этой формулы следует, что для данной расчетной схемы величина критического градиента находится в обратной зависимости от диаметра поры, через которую выдавливается грунт. Обращает на себя внимание тот факт, что сопротивляемость контактному выпору связного грунта в ядрах или экранах высоких плотин определяется главным образом силами трения, так как сцепление грунта относительно невелико (его величина обычно не превышает нескольких десятых  $\text{кГ/см}^2$ ). Однако сцепление играет решающую роль, когда в ядре или экране плотины со стороны нижнего бьефа возникают зоны, в которых сжимающие напряжения резко уменьшаются либо переходят в растягивающие.

Расчеты, произведенные по формуле (21), показали, что критические градиенты при выдавливании (выпоре) лессовидного суглинка с объемным весом  $\gamma_s = 1,7 \text{ г/см}^3$  (при  $c = 0,08 \text{ кГ/см}^2$ ;  $\varphi = 30^\circ$  и  $\xi = 0,37$ ) в пору диаметром  $D_0 = 1 \text{ см}$  при отсутствии сжатия равны 400, а при  $\sigma = 10 \text{ кГ/см}^2$  возрастают до 16900!

Предложенный расчетный способ оценки сопротивляемости связного грунта контактному выпору нуждался в экспериментальной проверке. Для этого были поставлены опыты, позво-



лившие создать такие условия воздействия одномерного фильтрационного потока на грунт, при которых происходило его выдавливание в отверстие, имитирующее поровый канал обратного фильтра.

Рассматривая изображенную на рис. 18 схему сил, действующих на выдавливаемый элемент грунта, аналогичным образом находим, что сдвигающими являются: фильтрационная сила

$$W = \alpha_2 \gamma_w \frac{\pi D_0^2}{4} H \quad (22)$$

и сила гидростатического давления

$$p = \alpha_2 \gamma_w (H - l) \frac{\pi D_0^2}{4}, \quad (23)$$

а к удерживающим относится сила сцепления

$$C = c \pi D_0 (l + D_0/4) \quad (24)$$

и сила трения

$$T = \frac{\xi \gamma_w H + \xi \gamma_w H (1 - l/B)}{2} \pi D_0 l \operatorname{tg} \varphi = \xi \gamma_w H (2 - l/B) \frac{\pi D_0}{2} l \operatorname{tg} \varphi. \quad (25)$$

Учитывая, что  $H = BI$ , из условия равенства сумм удерживающих и сдвигающих сил определяем критический градиент фильтрации для данной схемы контактного выпора элемента грунта длиной  $l = D_0$ :

$$I_{кр} = \frac{1 + \frac{5c}{\alpha_2 \gamma_w D_0}}{1 + \frac{B}{D_0} \left[ 1 - \frac{2\xi \operatorname{tg} \varphi}{\alpha_2} \left( 2 - \frac{D_0}{B} \right) \right]}. \quad (26)$$

Эксперименты по проверке формулы (26) и, следовательно, (21) осуществлялись с помощью специального, но довольно простого прибора. Из рис. 19 видно, что прибор состоит из цилиндра 1, закрытого с двух сторон фланцами. В центре нижнего фланца находится отверстие 2, имитирующее пору. Кроме него во фланце просверливается еще несколько небольших отверстий, которые служат для равномерного оттока профильтрованной воды. С этой же целью помещаемый в прибор грунт укладывается на дренажную прокладку 3, состоящую из мелкой латунной сетки и листа фильтровальной бумаги. Для предотвращения происходящего во время замачивания разуплотнения грунта поверх его укладывается слой гравия с частицами крупностью 3 — 5 мм, на который, через



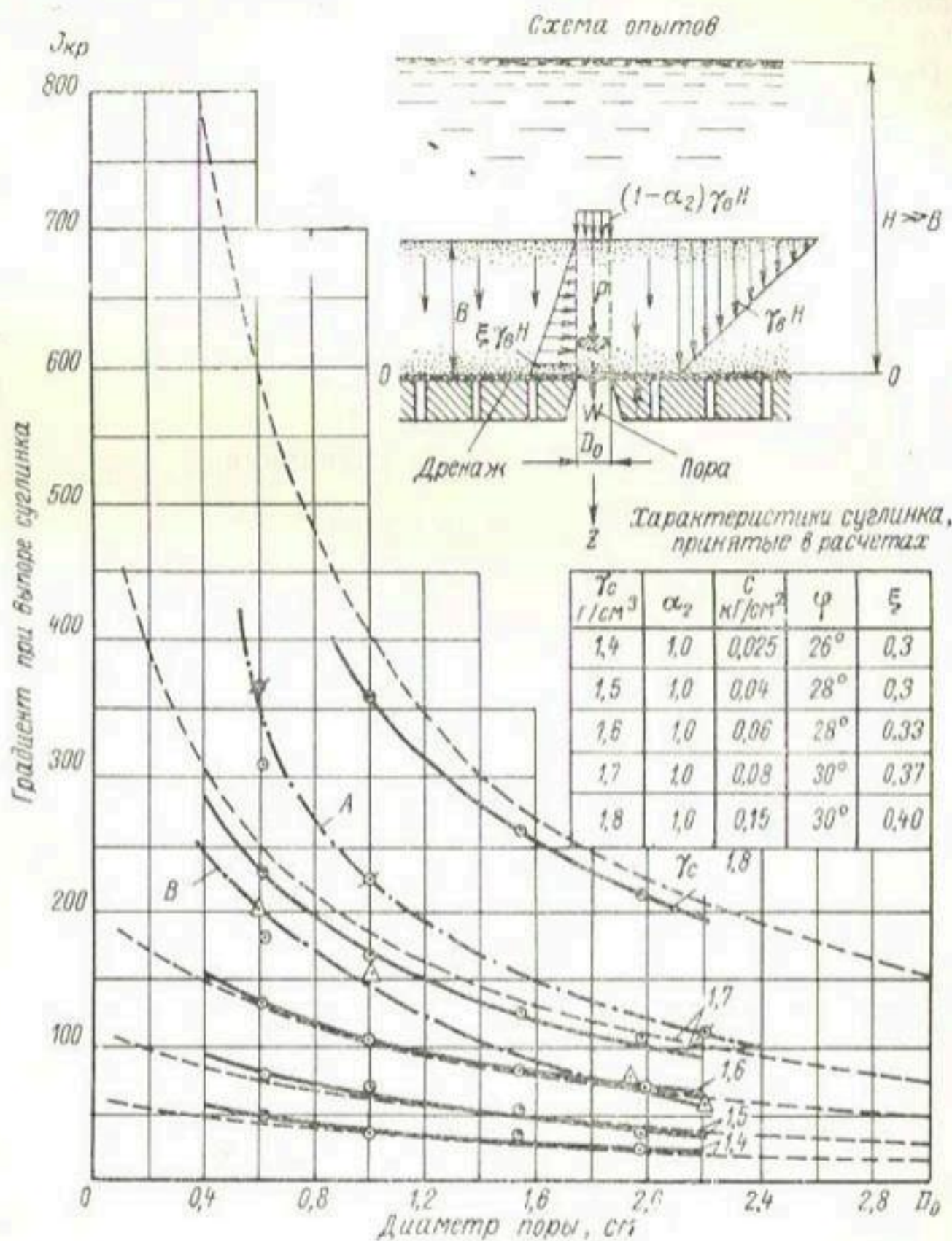


Рис. 18. Графики зависимостей между критическим градиентом фильтрационного потока и диаметром отверстия при контактном выпоре лессового суглинка с оптимальной начальной влажностью  $W_n = 16-18\%$ :

— — — получены в опытах; — — — рассчитаны по формуле (26). Кривые A и B получены в опытах с обратным фильтром из галечникового грунта при объемном весе суглинка, соответственно равном  $1,75-1,80$  и  $1,5-1,6$  г/см<sup>3</sup>, и толщине его слоя  $3-4$  см.



решетку 4, передается незначительное по величине давление от предварительно сжатого резинового кольца 5.

Следует отметить, что во всех без исключения опытах грунт уплотнялся до требуемого объемного веса только путем постепенного его сжатия под прессом<sup>1</sup>.

Последовательность действий в проведении каждого из опытов состояла в том, что после укладки грунта и окончания его замачивания, осуществлявшегося обычно со стороны верхнего бьефа, давление воды внутри прибора постепенно увеличивалось до тех пор, пока не происходил контактный выпор. Таким образом было испытано более ста образцов лессовидного суглинка различного объемного веса, при диаметрах отверстия, имитирующего пору,  $D_0 = 6; 10; 15,4$  и  $19,7$  мм. Почти во всех опытах испытывались образцы с начальной влажностью, равной 16–18%, т. е. близкой к оптимальной. Результаты опытов в виде графиков зависимостей  $I_{кр} = f(D_0)$  представлены на рис. 18, на котором также показаны графики зависимостей, выражаемых формулой (26). Из совместного рассмотрения этих графиков можно установить достаточно хорошее соответствие между зависимостями  $I_{кр} = f(D_0)$ , полученными в эксперименте и расчетным путем.

Определение разрушающих фильтрационных градиентов при контактом выпоре производилось также в опытах, в которых обратный фильтр имитировался слоем гравия или галечника различной крупности. Эти опыты, проводившиеся в фильтрационно-суффозионных приборах диаметром 15, 20, 30 см, по своей методике практически не отличались от опытов по определению водопроницаемости суглинка, описанных в первой главе.

Единственная разница состояла в том, что в данных опытах фильтрация всегда осуществлялась в направлении сверху вниз при постепенном увеличении напора. Во всех случаях явление выпора сопровождалось образованием в слое суглинка

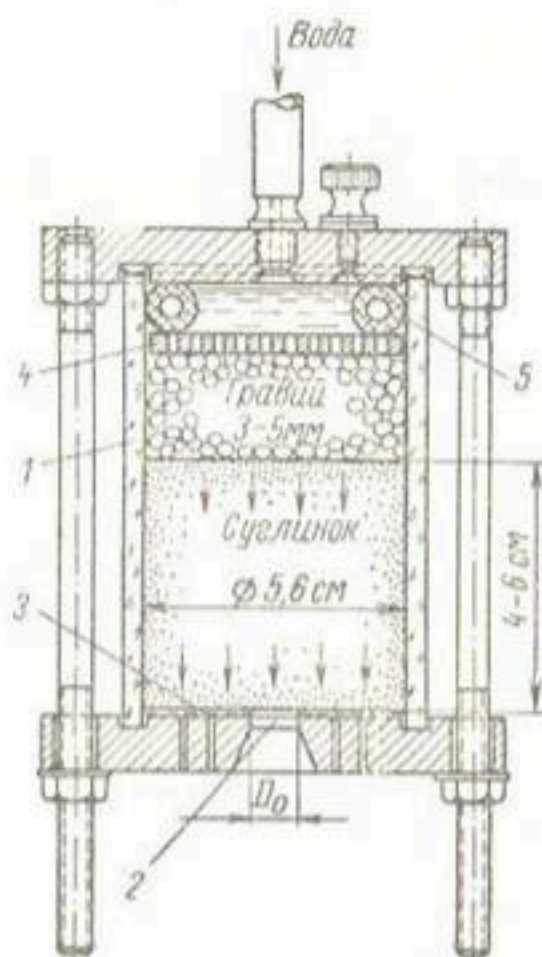


Рис. 19. Продольный разрез прибора для определения фильтрационного градиента при контактом выпоре.

<sup>1</sup> Уплотнение грунта трамбованием недопустимо, так как возникающая при этом слоистость является причиной неравномерного распределения напора по высоте образца.



толщиной от 2 до 8 см сквозного отверстия, диаметр которого примерно был равен диаметру поры обратного фильтра<sup>1</sup>.

В табл. 6 даны исходные характеристики суглинка и материала фильтра, а также приведены значения разрушающих градиентов, изменение которых показано на рис. 18 в виде графиков, обозначенных индексами *A* и *B*. Из рассмотрения графиков видно, что зависимости  $I_{кр} = f(D_0)$ , полученные в опытах с гравийно-галечниковым фильтром и „искусственной“ порой, совпадают вполне удовлетворительно.

Таблица 6

Результаты опытов по определению критических градиентов напора при контактном выпоре суглинка

| № опыта | Объемный вес суглинка $\gamma_c, \text{г/см}^3$ | Начальная влажность суглинка $W_n, \%$ | Начальная толщина слоя суглинка $B, \text{см}$ | Диаметр частиц фильтра $D, \text{мм}$ | Величина вертикальной нагрузки $\sigma, \text{кг/см}^2$ | Состояние поверхности контакта суглинок—фильтр | Продолжительность опыта $T, \text{сут}$ | Величина разрушающего градиента напора $I_{кр}$ |
|---------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 54      | 1,74                                            | 17,8                                   | 2,1                                            | 7—10                                  | 0,12                                                    | Подводное                                      | 24                                      | > 350                                           |
| 55      | 1,65                                            | 28,8                                   | 2,0                                            | 12—15                                 | 0,2                                                     | „                                              | 16                                      | 200                                             |
| 56      | 1,48                                            | 32,0                                   | 3,2                                            | 20—30                                 | 0,2                                                     | „                                              | 3                                       | 150                                             |
| 57      | 1,50                                            | 30,0                                   | 3,2                                            | 40—50                                 | 0,2                                                     | „                                              | 7                                       | 57                                              |
| 58      | 1,45                                            | 31,0                                   | 4,0                                            | 40—50                                 | 0,17                                                    | „                                              | 10                                      | 32                                              |
| 59      | 1,42                                            | 12,1                                   | 2,9                                            | 12—15                                 | 1,12                                                    | Надводное                                      | 31                                      | 182                                             |
| 60      | 1,53                                            | 9,8                                    | 3,0                                            | 20—30                                 | 0,93                                                    | „                                              | 32                                      | 145                                             |
| 61      | 1,73                                            | 19,7                                   | 3,2                                            | 12—15                                 | 1,12                                                    | „                                              | 30                                      | > 340                                           |
| 63      | 1,64                                            | 13,4                                   | 3,5                                            | 40—50                                 | 0,52                                                    | „                                              | 5                                       | 30                                              |
| 66      | 1,60                                            | 13,0                                   | 5,0                                            | 40—50                                 | 0,65                                                    | „                                              | 11                                      | 41                                              |
| 67      | 1,75                                            | 15,0                                   | 3,5                                            | 30—40                                 | 1,0                                                     | „                                              | 20                                      | 228                                             |
| 68      | 1,75                                            | 17,4                                   | 4,6                                            | 40—50                                 | 0,4                                                     | „                                              | 14                                      | 175                                             |
| 69      | 1,75                                            | 15,8                                   | 3,0                                            | 20—30                                 | 1,0                                                     | „                                              | 9                                       | 230                                             |

Основываясь на результатах изучения физической сущности явления контактного выпора и условий его возникновения, можно сделать некоторые общие выводы.

1. Разрушающие фильтрационные градиенты при контактном выпоре для большинства связных грунтов, обладающих сцеплением не ниже  $0,01 \text{ кг/см}^2$ , значительно превосходят те, какие обычно имеют место в реальных водоупорных элементах (ядрах или экранах) каменно-земляных плотин. Так, например, выходные градиенты напора в относительно тонком

<sup>1</sup> Для предотвращения нехарактерного разрушения суглинка около стенки прибора, в этом месте укладывался фильтр из более мелкозернистого материала, например гравия.



ядре Нурекской плотины не превышают пяти, что в несколько десятков и даже сотен раз меньше их критических величин при самом крупном материале обратного фильтра. В связи с этим почти полностью теряется смысл проведения экспериментальных исследований контактного выпора грунтов (суглинков и глин) с достаточно высоким сцеплением. И все же, в некоторых случаях, при расчете водоупорных элементов, необходимо учитывать возможность контактного выпора, имея в виду, что отсыпка в натурных условиях разнородного материала фильтра часто сопровождается его сегрегацией (разделением по фракциям). Вследствие наблюдающегося при этом скопления крупных фракций в слое фильтра образуются отдельные зоны, в которых размеры пор будут значительно превышать расчетные, вычисленные по интегральной кривой среднего гранулометрического состава материала фильтра. Известными дополнительными мероприятиями можно уменьшить сегрегацию, но полностью избежать ее нельзя. Поэтому в таких случаях в качестве расчетного следует выбирать диаметр пор фильтра, соответствующий фракциям максимальной крупности.

2. Фильтрационный градиент при контактом выпоре возрастает с увеличением объемного веса грунта (что обуславливается соответствующим повышением его сцепления), а также с увеличением сжимающего давления, благодаря которому возникают удерживающие силы трения. Величину разрушающего (критического) градиента с достаточной для практических расчетов точностью можно определить по формулам (21) и (26).

3. На величину разрушающего градиента не оказывает существенного влияния положение (надводное или подводное) поверхности сопряжения грунт—обратный фильтр.

## § 11. Определение сцепления суглинка методом поверхностной пенетрации

Рассмотренные в предыдущих параграфах исследования со всей очевидностью показали, что величина сцепления, являющаяся одной из прочностных характеристик связного грунта в значительной мере обуславливает его сопротивляемость воздействию фильтрационного потока. Этот факт следует учитывать при проектировании ядра или экрана плотины, для чего надо заранее знать, каким образом сцепление грунта зависит от изменения его объемного веса, влажности и т. п.<sup>1</sup> Если известна такая зависимость, в ряде случаев отпадает необхо-

<sup>1</sup> Из дальнейшего изложения будет видно, что выяснение характера изменения сцепления суглинка представляет особый интерес в отношении оценки возможности размыва ядра Нурекской плотины фильтрационным потоком в трещинах основания и береговых склонов.



димость в проведении большого числа трудоемких экспериментов по определению воздействия фильтрационного потока на грунт при различном его состоянии, поскольку появляется возможность вполне обоснованно прогнозировать соответствующее изменение его фильтрационной прочности. Заметим, что при этом важно знать лишь относительное изменение величины сцепления грунта.

Принимая во внимание данное обстоятельство, для определения характера изменения сцепления суглинка мы выбрали широко используемый в последнее время весьма простой и надежный метод поверхностной пенетрации, т. е. внедрения в грунт с его поверхности твердого тела заданной формы. В качестве внедряемых тел обычно применяется сфера или конус. По глубине их погружения под известной нагрузкой определяется сцепление грунта<sup>1</sup>.

Метод испытания грунтов с помощью сферического штампа впервые был предложен Н. А. Цыговичем [26], который также нашел расчетную зависимость для определения сцепления грунта:

$$C_{ш} = 0,18 \frac{MP}{\pi D_{ш} S}, \quad (27)$$

где  $D_{ш}$  — диаметр шарикового штампа;

$P$  — нагрузка на штамп;

$S$  — остаточная глубина вдавливания штампа;

$M$  — коэффициент, зависящий от угла внутреннего трения.

Испытание образцов суглинка с различным объемным весом производилось на специальном приборе — пенетрометре (рис. 20), отличающимся от подобных приборов тем, что нагрузка на сферический штамп диаметром 18 мм передавалась через уравновешенный дополнительными пружинами шток измерителя перемещений часового типа (мессуры), с помощью которого определялась глубина погружения штампа. Как правило, эта глубина не превышала  $0,1 D_{ш}$ , т. е. 1,8 мм.

Приготовление образцов к испытаниям осуществлялось в такой последовательности. Суглинок с определенной начальной влажностью укладывался с очень небольшим уплотнением в металлическое кольцо, которое затем помещалось в фильтрационно-компрессионный прибор. В приборе производилось уплотнение суглинка до требуемого объемного веса, после чего суглинок подвергался длительному водонасыщению. И только через несколько дней, в состоянии практически полного водонасыщения, образец подвергался испытаниям на пенетрометре путем вдавливания под нагрузкой шарикового

<sup>1</sup> Исходя из теоретических предпосылок, этот метод может быть применен только для определения сцепления и не позволяет определять угол внутреннего трения.



штампа в нескольких (до десяти) точках поверхности образца. Глубина вдавливания измерялась после выдерживания постоянной нагрузки в течение одной-двух минут. Более длительное выдерживание нагрузки является нежелательным вследствие высыхания поверхности образца в процессе его испытаний, а также по той причине, что увеличение глубины вдавливания при этом оказывается незначительным (около 5–7%).

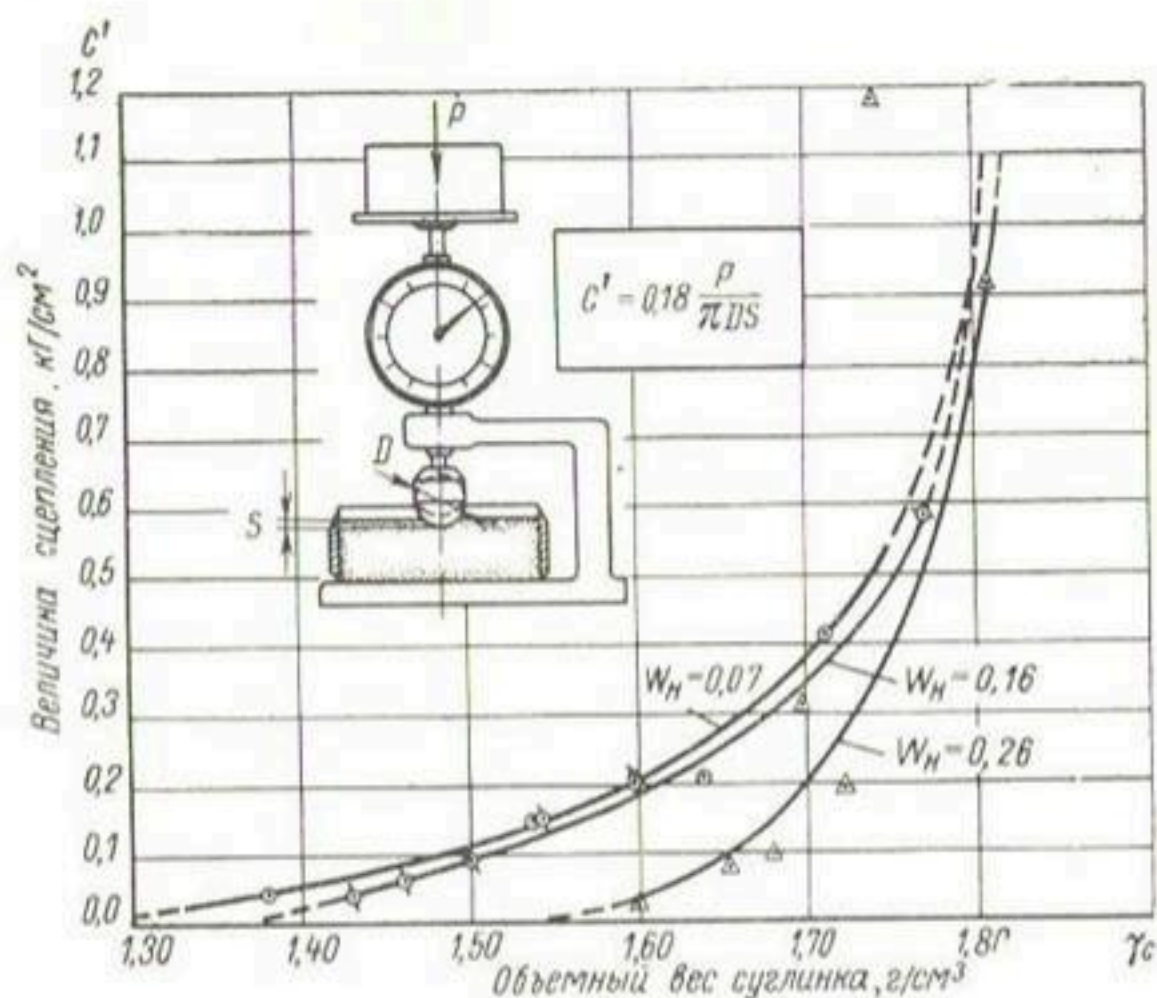


Рис. 20. Графики зависимостей между величиной сцепления и объемным весом скелета полностью водонасыщенного суглинка (по результатам определения сцепления методом поверхностной пенетрации).

Величина сцепления испытуемого образца суглинка с известным объемным весом определялась затем как среднее арифметическое отдельных значений сцепления, подсчитанных по формуле (27) для каждого вдавливания (пенетрации). Для удобства расчетов входящий в формулу коэффициент  $M$  принимался равным единице, в то время как действительное его значение может изменяться в пределах  $0,3 \div 0,4$  (при  $\varphi = 20^\circ - 30^\circ$ ).

По результатам испытаний методом поверхностной пенетрации большого количества образцов с начальной влажностью 7,16 и 25% и различной плотностью были установлены зависимости между величиной сцепления и объемным весом суглинка, которые в виде графиков показаны на рис. 20.



Из рассмотрения графиков следует, что с увеличением объемного веса суглика от 1,38 („насыпной“ объемный вес) до 1,8 г/см<sup>3</sup> его сцепление возрастает примерно в 20 раз (от 0,04 до 0,9 кГ/см<sup>2</sup>).

Зависимость между сцеплением и объемным весом суглинка (при оптимальной его начальной влажности  $W_n = 16\%$ ) можно весьма точно выразить формулой

$$C' = 12 \exp(-5,9\varepsilon) \text{ кГ/см}^2. \quad (28)$$

Имеются достаточно веские основания предполагать, что установленный экспоненциальный характер изменения сцепления вообще свойственен всем связным грунтам.

## § 12. Сопротивляемость суглинка и некоторых других связных грунтов размыву продольным потоком в слое фильтра (контактный размыв)

Во время эксплуатации каменно-земляной плотины по низовой стороне (грани) ее ядра может стекать довольно значительный поток воды, профильтровавшейся через тело самого ядра или берега, а также просочившейся сверху после выпадения ливневых осадков. Например, исследования фильтрации в обход ядра Нурекской плотины, выполненные с помощью метода ЭГДА на пространственной электролитической модели, показали, что при соотношении проницаемостей пород основания и цементационной завесы, равном 10, расходы воды, стекающей с участков высачивания, соответственно равны: для правого берега 20 л/сек и для левого — 80 л/сек<sup>1</sup>. Расходы воды, стекающей по низовой грани ядра во время ливней, могут быть в несколько раз большими. Кроме того, в период строительства плотины, для более плотной укладки отсыпae-мого в упорные призмы каменного материала, его обычно интенсивно поливают водой, которая стекает по низовой и верховой граням ядра<sup>2</sup>.

Таким образом, при проектировании каменно-земляной плотины возникает необходимость подбора (или проверки) зернового состава обратного фильтра, исходя из условия сохранения суффозионной устойчивости грунта, используемого в качестве материала ядра (экрана) плотины, по отношению к размывающему воздействию на грунт потока воды в слое фильтра. Это является одним из основных требований, предъявляемых к обратному фильтру, защищающему ядро (или экран) плотины.

<sup>1</sup> Эти исследования проводились в Фильтрационной лаборатории ВНИИГА под руководством инж. А. В. Стулькевича.

<sup>2</sup> При уплотнении камня гидромониторами вода также будет стекать и по верховой грани экрана плотины.



В данном случае расчетным критерием для оценки надежности сооружения должна быть величина допустимой (неразрывающей) скорости движения воды  $v_{0, доп}$  в порах обратного фильтра, вдоль поверхности контакта с защищаемым грунтом ядра или экрана. Действительно, только скорость потока определяет интенсивность его воздействия на вмещающее поток русло. Это приходится особо подчеркивать, так как в отдельных работах, например [27], в качестве такого критерия выбран градиент напора, с помощью которого нельзя в достаточной мере характеризовать скорость движения воды в порах зернистых материалов, имеющих различные форму частиц и пустотность.

Аналогично явлениям размыва глинистых русел открытых водных потоков, поверхностный размыв грунта ядра или экрана на плотине на контакте с обратным фильтром также начинается при вполне определенной для данного грунта скорости движения воды  $v_{0p}$  в порах фильтра<sup>1</sup>. Причем поперечные размеры пор фильтра не должны существенным образом влиять на величину  $v_{0p}$  вследствие относительно весьма малых размеров частиц глинистых грунтов. Ниже будет показано, что экспериментами удалось подтвердить правильность этого предположения.

Таким образом, если известно значение  $v_{0p}$ , расчет обратного фильтра (по условию отсутствия контактного размыва) сводится к установлению его водопроницаемости, при которой будет удовлетворяться неравенство  $v_0 < v_{0p}$ . Тогда, исходя из заданных угла наклона  $\alpha$  боковой грани ядра (экрана) и пористости  $n_\phi$  материала обратного фильтра, его коэффициент фильтрации

$$k_\phi < n_\phi \frac{v_{0p}}{I_\phi} = n_\phi \frac{v_{0p}}{\sin \alpha}, \quad (29)$$

где  $I_\phi = \sin \alpha$  — градиент напора воды, стекающей вдоль поверхности контакта ядро — обратный фильтр.

Итак, решение рассматриваемого вопроса для каждого конкретного случая проектирования обратного фильтра каменно-земляной плотины связано с определением величины  $v_{0p}$ , а это можно сделать только с помощью эксперимента, в котором воспроизводятся условия контактного размыва грунта ядра (экрана) плотины. Схема одного из таких экспериментов, выполнявшихся в Фильтрационной лаборатории ВНИИГа для обоснования проекта Нурекской плотины, показана на рис. 21, где также даны графики изменения по времени градиентов

<sup>1</sup> Надо заметить, что контактный размыв возможен лишь при условии „геометрической проходимости“ отрываемых потоком отдельных частиц и агрегатов грунта в порах обратного фильтра.







напора и скорости фильтрации в слое гравия крупностью 5—7 мм, уложенного поверх слоя суглинка с объемным весом  $\gamma_c = 1,71 \text{ г/см}^3$  и начальной влажностью  $W_n = 17\%$ .

В соответствии с разработанной методикой проведения экспериментов в фильтрационно-суффозионном горизонтальном лотке, уложенный в него суглинок предварительно замачивался под нагрузкой интенсивностью около  $1 \text{ кг/см}^2$ . Происходящее при этом сжатие слоя суглинка определялось по перемещению (осадке) поршня лотка, передающего от рычажного устройства требуемое для создания данной нагрузки усилие. Фильтрация воды в слое гравия начиналась лишь по прошествии некоторого времени после замачивания, когда полностью заканчивался процесс консолидации суглинка и прекращалось перемещение поршня.

В дальнейшем, при постепенном увеличении скорости фильтрации, в определенный момент вновь возникала осадка поршня, но на этот раз уже вследствие контактного размыва суглинка. Соответствующая данному моменту скорость фильтрации  $v_{\Phi p}$  является размывающей, и ее величина совершенно отчетливо устанавливается из совместного рассмотрения графиков изменения во времени осадки поршня и скорости (рис. 21), а также по началу выноса в отстойник продуктов

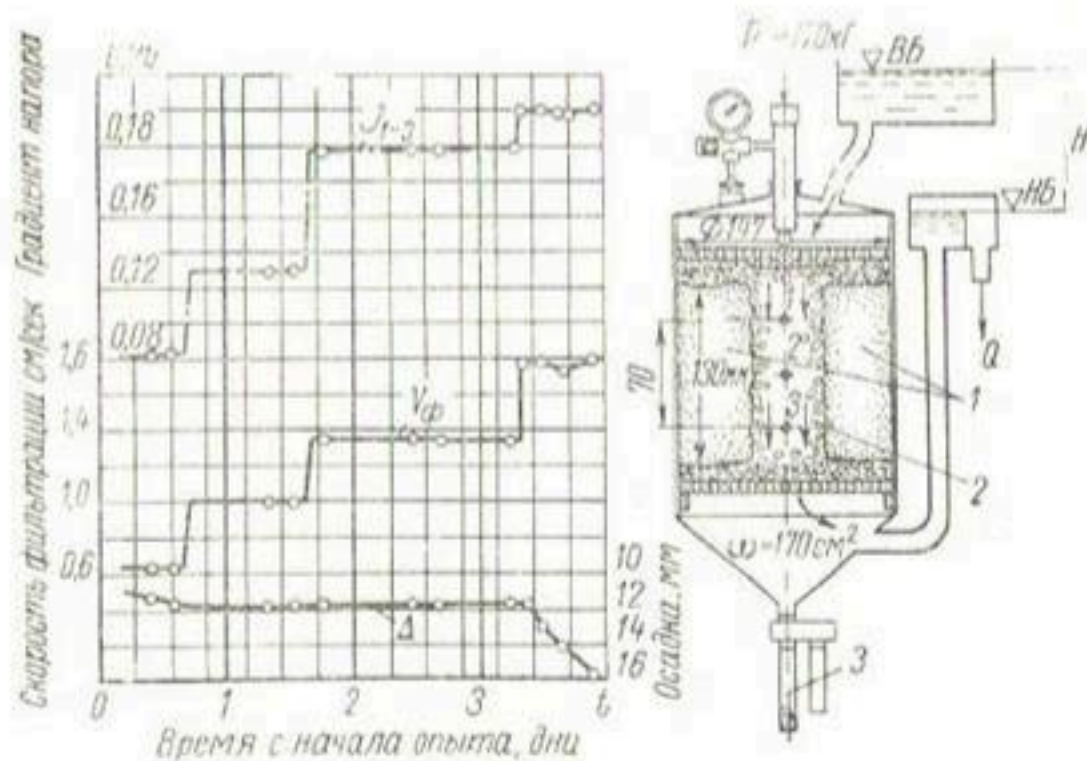


Рис. 22. Схема и результаты опыта по определению сопротивляемости суглинка размыву продольным вертикальным фильтрационным потоком в слое гравия  
1—суглинок  $\gamma_{c,n} = 1,31 \text{ г/см}^3$ ;  $W_n = 18,7\%$ ; 2—гравий; 3—песколовка.

размыва (эрозии) грунта. Истинное значение размывающей скорости движения воды в порах, имитирующего обратный фильтр слоя гравия, находим из соотношения  $v_{0p} = v_{\Phi p} / n_{\Phi}$ .



С целью выяснения влияния на размывающую скорость положения поверхности контакта суглинок—фильтр, большое число опытов было выполнено по аналогичной методике в вертикальных фильтрационно-суффозионных приборах, в которых воспроизводились условия фильтрации в направлении сверху вниз, т.е. условия, более близкие к тем, какие имеют место в натуре. В этих опытах, типичная схема одного из которых показана на рис. 22, величина размывающей скорости также определялась по графикам суммарных осадок и интенсивности выпадения в песколовку выносимых потоком частиц суглинка.

Как видно из результатов всех опытов, приведенных в табл. 7, в большинстве из них размыв суглинка (и смесей суглинка со щебнем) начинался, когда скорость движения воды в порах фильтра достигала 1—3 см/сек. Вместе с тем оказалось, что величина размывающей скорости сравнительно мало зависит от объемного веса суглинка и еще меньше от поперечных размеров пор фильтра. Действительно, при увеличении объемного веса суглинка, имеющего постоянную начальную влажность, от 1,25 до 1,8 г/см<sup>3</sup> размывающая скорость движения воды в порах фильтра возрастает всего лишь в три раза (от 1 до 3 см/сек). При увеличении же начальной влажности суглинка от 10 до 25% эта скорость возрастает примерно в пять раз. Сравнительно низкая сопротивляемость размыву суглинка с большим объемным весом (следовательно, и большим сцеплением) обусловлена, по-видимому, разуплотнением его поверхностного слоя в порах фильтра, происходящим во время замачивания. Как и следовало ожидать, „потолочный“ и „вертикальный“ размыв суглинка начинал при несколько меньших скоростях (сравнить опыты № 86, 91 и 96).

Для того чтобы выяснить наиболее характерные черты явления контактного размыва связных грунтов вообще, нами были проанализированы приведенные в табл. 7а результаты опытов других авторов. Из этой таблицы видно, что совершенно несходные между собой и взятые из различных месторождений связные грунты, с числами пластичности от 3,2 до 22%, обладают примерно одинаковой сопротивляемостью контактному размыву, т.е. размыв всех этих грунтов (независимо от их объемного веса, начальной влажности и диаметра пор обратного фильтра) начинается при скоростях движения воды в порах фильтра одного порядка, в среднем равных 7 см/сек<sup>1</sup>. Это, конечно, не является какой-то случайностью, и здесь возникает предположение, что основная причина контактного размыва связных грунтов заключается в турбулизации филь-

<sup>1</sup> Следует отметить, что приведенные в табл. 7а значения размывающих скоростей для ряда опытов несомненно завышены, поскольку регистрация начала размыва грунта в этих опытах осуществлялась несовершенными способами (чаще всего визуально).



трационного потока, при которой в результате вихреобразования и пульсаций гидродинамического давления резко возрастают усилия, расшатывающие структурные связи в грунте, и одновременно разрушается ламинарный пограничный слой.

С целью проверки данного предположения нами были проведены дополнительные исследования фильтрации воды в песчаных и гравийных грунтах, позволившие сделать следующий довольно неожиданный вывод: турбулентный режим в грунте возникает, когда скорость движения воды в его порах достигнет  $1 \div 3$  см/сек, независимо от крупности зерен грунта. Теперь становится ясно, почему при контактном размыве связных грунтов были получены более или менее одинаковые значения размывающих скоростей движения воды в порах обратного фильтра. Все это позволяет сделать несколько общих выводов.

1. Контактный размыв глинистого грунта ядра (экрана) плотины может возникнуть при турбулизации потока в обратном фильтре, когда скорость движения воды в его порах превысит 1 см/сек. Исходя из максимального в этом случае градиента напора, равного единице, находим, что коэффициент фильтрации материала обратного фильтра (наименьшая пористость которого примерно равна 0,2) не должен превосходить 0,2 см/сек (170 м/сут).

2. Физико-механические свойства связного грунта и поперечные размеры пор защищающего этот грунт обратного фильтра не оказывают большого влияния на величину размывающей скорости движения воды в порах фильтра, которая при этом может изменяться от 1 до 10 см/сек.

3. При незначительном (порядка 5—20%) содержании в грунте ядра (экрана) плотины гравийных или щебенистых фракций определенной крупности, сопротивляемость этого грунта размыву резко возрастает вследствие образования в процессе размыва на поверхности контакта с фильтром „защитного слоя“ из крупных частиц (более подробно об этом сказано в § 14).

4. Сопоставление величин размывающих скоростей при движении потока в порах обратного фильтра и в открытом русле [28] показывает, что в первом случае значения этих скоростей в 50—100 раз меньше, чем во втором. На наш взгляд, столь большое различие может быть объяснено неодинаковыми условиями гидродинамического воздействия потока на размываемый связный грунт. Так, при движении в порах фильтра поток расчленяется на хаотически искривленные струйки переменного сечения, многие из которых направлены в сторону поверхности грунта. Данное обстоятельство, усугубляемое интенсивной пульсацией давления и вихреобразованием, является основной причиной разрушения пограничного ламинарного слоя, защищающего грунт от размыва при движении потока в открытом



Таблица 7а

| № пп. | Гравелистый материал обратного фильтра |                                  |                  | Пористость $n_F$              | 5    | Защищаемый обратным фильтром глинистый грунт |                                           |                                                            |                     |                          |                           |                                             |                          | Гидравлические характеристики                  |                                                                              |    |    |  | Источники приводимых данных | № опыта |
|-------|----------------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------|------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|----|--|-----------------------------|---------|
|       | Размеры частиц $D$ , мм                | Расчетный диаметр пор $D_0$ , мм | Торчатость $n_F$ |                               |      | Месторождение грунта                         | Удельный вес $\Delta$ , г/см <sup>3</sup> | Объемный вес грунта в опыте $\gamma_s$ , г/см <sup>3</sup> | Влажность $W_n$ , % | Грануляционная $W_T$ , % | Число пластилин $W_n$ , % | Максим. молекулярная влагосмкость $W_m$ , % | Грануляционная $W_p$ , % | Скорость фильтрации при размыве $v_F$ , см/сек | Средняя скорость движения воды в порах фильтра при размыве $v_{0p}$ , см/сек | 15 | 16 |  |                             |         |
| 1     | 5—20                                   | 4,9                              | 0,39             | Кучинская глина (Подмосковье) | 2,76 | 1,50                                         | 23,1                                      | 40                                                         | 17                  | 17                       | 0,1                       | 3,8                                         | 10                       |                                                |                                                                              | 16 |    |  |                             |         |
| 2     | 5—20                                   | 4,9                              | 0,38             | То же                         | 2,76 | 1,50                                         | 17                                        | 40                                                         | 17                  | 17                       | 0,3                       | 3,0                                         | 7,9                      |                                                |                                                                              | 8  |    |  |                             |         |
| 3     | 2—50                                   | 4,9                              | 0,38             | "                             | 2,76 | 1,65                                         | 19,1                                      | 40                                                         | 17                  | 17                       | 0,4                       | 4,0                                         | 10,5                     |                                                |                                                                              | 9  |    |  |                             |         |
| 4     | 2—50                                   | 2,9                              | 0,33             | "                             | 2,76 | 1,47                                         | 29,3                                      | 40                                                         | 17                  | 17                       | 0,5                       | 2,7                                         | 8,2                      |                                                |                                                                              | 23 |    |  |                             |         |
| 5     | 5—20                                   | 4,9                              | 0,38             | "                             | 2,76 | 1,46                                         | 27,7                                      | 40                                                         | 17                  | 17                       | 0,6                       | 4,0                                         | 10,5                     |                                                |                                                                              | 24 |    |  |                             |         |
| 6     | 5—20                                   | 4,9                              | 0,38             | Суглинок лесоводный           | 2,70 | 1,65                                         | 14,6                                      | 36                                                         | 14                  | 16                       | 0,2                       | 3,4                                         | 8,9                      |                                                |                                                                              | 15 |    |  |                             |         |
| 7     | 5—20                                   | 4,9                              | 0,38             | Куйбышевский суглинок         | 2,72 | 1,50                                         | 27                                        | 39                                                         | 13                  | 18                       | 0,7                       | 3,5                                         | 9,2                      |                                                |                                                                              | 3  |    |  |                             |         |
| 8     | 5—20                                   | 4,9                              | 0,38             | То же                         | 2,72 | 1,65                                         | 19,4                                      | 39                                                         | 13                  | 18                       | 0,9                       | 4,2                                         | 11,0                     |                                                |                                                                              | 4  |    |  |                             |         |
| 9     | 8—50                                   | 8,64                             | 0,40             |                               | 2,72 | 1,65                                         | 25                                        | 39                                                         | 13                  | 18                       | 1,6                       | 4,8                                         | 12,0                     |                                                |                                                                              | 6  |    |  |                             |         |
| 10    | 5—20                                   | 4,9                              | 0,38             | Иркутский суглинок            | 2,72 | 1,50                                         | 13                                        | 35                                                         | 13                  | 14                       | 0,3                       | 2,1                                         | 5,5                      |                                                |                                                                              | 17 |    |  |                             |         |

Истомина В. С., Филь-  
трационная устойчивость  
грунтов, Госстройиздат,  
1957, табл. 50



|    |       |      |           |                                           |      |      |      |      |      |   |      |      |      |                                                                                                                                                                       |     |
|----|-------|------|-----------|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|---|------|------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11 | 10-20 | 4,2  | 0,36      | Суглинок<br>ленметростро-<br>евский       | 2,72 | 1,53 | 28   | —    | 9    | — | 0,26 | 3    | 8,2  | Праведный Г. Х., отчет<br>ВНИИГ по теме № 55,<br>1961, стр. 15                                                                                                        | 4с  |
| 12 | 10    | 2,80 | 0,37-0,40 | То же                                     | 2,72 | 1,39 | 28,8 | —    | 6,86 | — | 0,90 | 3    | 7,5  | Праведный Г. Х., „Про-<br>ектирование и подбор<br>гранулометрического<br>состава фильтров пере-<br>ходных зон высоких<br>плотин, „Энергия“, 1966.                     | 7с  |
| 13 | 15    | 4,2  | 0,36      | „                                         | 2,71 | 1,49 | 27,6 | —    | 9,01 | — | 0,63 | 1,5  | 4,15 |                                                                                                                                                                       | 18с |
| 14 | 10    | 2,89 | 0,37-0,40 | „                                         | 2,71 | 1,50 | 27,4 | —    | 9,0  | — | 1,03 | 2,8  | 7,0  |                                                                                                                                                                       | 19с |
| 15 | 3-5   | 1,0  | 0,37-0,40 | „                                         | 2,71 | 1,53 | 25,8 | —    | 9,0  | — | 3,06 | 2,2  | 5,5  |                                                                                                                                                                       | 21с |
| 16 | 10    | 2,8  | 0,37-0,40 | Днепропетров-<br>ский суглинок            | 2,76 | 1,55 | 34,5 | —    | 17   | — | 0,90 | 3,0  | 7,5  |                                                                                                                                                                       | 25с |
| 17 | 10    | 2,8  | 0,37-0,40 | Суглинок<br>метростр.                     | 2,82 | 1,32 | 36,2 | —    | 9,46 | — | 1,0  | 2,8  | 7,0  | Лубочков Е. А., Жебров-<br>ская В. Д., „Исследования<br>для обоснования проекта<br>дренажной осушитель-<br>ной системы“. Отчет<br>ВНИИГ по дог. работе,<br>1967.      | 4с  |
| 18 | 10-20 | 6,2  | 0,45      | Днепровские<br>глины                      | 2,72 | 1,47 | 26   | —    | 22   | — | 0,54 | 1,3  | 2,9  |                                                                                                                                                                       | 5   |
| 19 | 3-20  | 3,6  | 0,45      | То же                                     | 2,72 | 1,51 | 26   | —    | 22   | — | 1,45 | 3,6  | 8,0  |                                                                                                                                                                       | 8   |
| 20 | 1-30  | 3,9  | 0,35      | Суглинок<br>Пачкамарский                  | 2,70 | 1,46 | 23   | —    | 3,2  | — | 4,0  | 3,6  | 10,3 | Лубочков Е. А., Техн.<br>отчет ВНИИГ „Лабора-<br>торный подбор обрат-<br>ных фильтров ядра сме-<br>шанной земляной пло-<br>тины Пачкамарского<br>водохранилища“, 1963 | 13  |
| 21 | 5-7   | 2,5  | 0,37      | Суглинок<br>месторождения                 | 2,72 | 1,69 | 23,5 | 33,5 | 13,5 | — | 2,0  | 1,0  | 2,70 |                                                                                                                                                                       | 11  |
| 22 | 3-30  | 3,5  | 0,28      | „Означенное“<br>(Саянский гид-<br>роузел) | 2,72 | 1,67 | 29   | 33,5 | 13,5 | — | 0,1  | 0,90 | 3,2  | Лубочков Е. А., Техн.<br>отчет ВНИИГ „Лабора-<br>торно-эксперименталь-<br>ные исследования для<br>Саянской ГЭС“, раздел<br>IV, 1963                                   | 14  |
|    |       |      |           | То же                                     | 2,72 | 1,67 | 29   | 33,5 | 13,5 | — | 0,1  | 0,90 | 3,2  |                                                                                                                                                                       |     |

<sup>1</sup>  $D_0$  для опытов В. С. Истоминой вычислены по формуле В. Н. Кондратьева  $D_0=0,655 \cdot D_{09}$ .

<sup>2</sup> Щебень.



русле. Именно вследствие этого и происходит контактный размыв связного грунта при относительно небольших скоростях продольного фильтрационного потока.

### § 13. Экспериментальные исследования фильтрационной прочности моделей ядра плотины при наличии в нем сквозных трещин

Гидроэнергетическое строительство в горных районах имеет две характерные особенности:

1) неравномерный сток рек вынуждает создавать водохранилища большой емкости, что приводит к необходимости возводить высокие плотины;

2) перспективные в отношении запасов гидроэнергии горные районы часто оказываются сейсмически активными.

В связи с этим проектирование плотин, расположенных в таких районах, должно вестись с учетом сейсмического фактора.

По результатам анализа натуральных данных о поведении плотин из местных материалов во время землетрясений Г. С. Селезнев [29] разработал следующую общую классификацию сейсмических деформаций:

1. Осадки тела плотины.
2. Остаточные поперечные смещения тела плотины.
3. Расстройство контактов между конструктивными элементами плотины.
4. Трещинообразование в связных материалах тела плотины вследствие превышения динамических напряжений предела прочности материала на растяжение и на срез, а также за счет неравномерных осадок тела плотины и слабого грунта основания в результате воздействия как статических, так и динамических сил. Развитие трещин происходит в основном в гребневой зоне; в средней части ее преобладают продольные трещины со значительным проникновением в глубь плотины, а в местах примыкания плотины к бортам каньона — поперечные трещины, образующиеся иногда по всей толще гребневой зоны, но сравнительно меньше распространяющиеся в глубь тела плотины.<sup>1</sup>
5. Нарушение откосов плотины.

---

<sup>1</sup> Согласно сведениям, приведенным в работе [30], из 53 ирригационных плотин в Японии, подвергшихся в 1939 г. воздействию землетрясения, на 43 были обнаружены трещины, параллельные гребню, и только на 5 — трещины, перпендикулярные оси сооружения.



Г. С. Селезнев получил приближенные эмпирические формулы для определения абсолютных значений глубины и величины раскрытия трещин<sup>1</sup>.

$$b = 0,84 (1 - 0,038/\alpha) H; \quad (30)$$

$$\delta = 0,67 (1 - 0,024/\alpha) H, \quad (31)$$

где  $b$  — глубина проникновения трещин, м;

$\delta$  — величина раскрытия трещин, см;

$H$  — высота плотины, м;

$\alpha = \ddot{U}_0/g$  — отношение абсолютного значения максимального ускорения грунта при землетрясении к ускорению силы тяжести.

Из этих формул следует, что величина раскрытия трещин может достигать 0,6% от напора при  $\alpha = 0,25$ , а в среднем она равна 0,3%  $H$ .

Кроме упомянутых сейсмических факторов причиной появления трещин в противофильтрационных устройствах плотин могут также явиться неравномерные деформации отдельных частей сооружения, вызванные большими удельными нагрузками. Например, в среднем поперечном сечении Нурекской плотины осадка гребня ядра, обусловленная консолидацией суглинка, оценивается величиной 5—7 м. В связи с этим имеются опасения в отношении возникновения трещин в ядре, особенно в зоне примыкания его к береговым склонам [31].

Таким образом, для того чтобы дать достаточно полную оценку фильтрационной прочности Нурекской плотины, которая может быть сделана лишь с учетом трещинообразования в ее ядре, необходимо, во-первых, знать хотя бы приближенные, но не вызывающие сомнений количественные и размерные характеристики трещин и, во-вторых, установить наиболее вероятные место и время возникновения трещин до или после водонасыщения ядра, а также преимущественную их направленность (ориентировку).

Отсутствие научно обоснованных ответов на каждый из перечисленных вопросов вынуждает учитывать при проектировании плотины сочетание наиболее неблагоприятных обстоятельств, приводящих к трещинообразованию и снижающих водоупорные свойства ядра плотины.

Основываясь на некоторых условиях появления трещин в глинистых ядрах высоких плотин (сейсмика, различие деформаций, сдвиг в плоскости примыканий к берегам) и факторах, способствующих закрытию (самоуплотнению) трещин, можно отметить, что на глубине свыше 30—50 м от гребня

<sup>1</sup> Зависимости (26) и (27) получены на основании обработки данных натурных наблюдений плотин высотой до 100 м, построенных преимущественно в начале настоящего столетия и подвергшихся воздействию землетрясений различной силы.



плотины образование трещин практически невозможно, так как здесь действуют сжимающие напряжения, значительно превышающие сцепление связных (глинистых) грунтов. Именно это обстоятельство определяет место появления трещин—верхнюю зону ядра плотины, простирающуюся до отметок, где сцепление становится меньше сжимающего напряжения.

Трещины, появившиеся на более высоких отметках в „сухом“ ядре (до заполнения водохранилища), могут затем полностью закрываться при фильтрации вследствие размокания глинистого грунта.

Очевидно, что с точки зрения фильтрационной прочности плотины наиболее опасными являются поперечные сквозные трещины, проходящие через толщу ядра в направлении его низовой грани. Именно такие трещины могут явиться причиной потери водоудержательной способности плотины и даже ее разрушения в случае неправильно запроектированных обратных фильтров. Остальные виды трещин (замкнутые и открытые) представляют лишь потенциальную опасность в отношении возможности образования сквозной трещины при соединении этих трещин между собой. Данное утверждение легко доказать, принимая во внимание высокую устойчивость связных грунтов при контактном выпоре, а также учитывая большую сопротивляемость их частиц отрыву потоком фильтрации, направленным к открытой трещине, образовавшейся на низовой грани ядра. В связи с этим можно считать, что поперечные несквозные трещины, проникающие в ядро на значительную глубину и передающие гидростатическое давление со стороны верхнего бьефа, не вызовут нарушения фильтрационной прочности плотины.

Из всего сказанного следует вывод о необходимости тщательного изучения явления размыва связных грунтов фильтрационным потоком в сквозных трещинах, аналогичных тем, какие могут возникнуть в ядре (экране) плотины при чрезвычайно неблагоприятных обстоятельствах. В результате такого изучения должны быть установлены дополнительные критерии для проектирования обратных фильтров. В связи с этим заметим, что вопросы фильтрационной прочности ядер и экранов плотин при наличии в них сквозных трещин ранее не рассматривались, поскольку считалось маловероятным появление трещин в сравнительно невысоких сооружениях, расположенных в благоприятных створах. Поэтому до недавнего времени только в одной работе [32] имелось краткое упоминание о подобных исследованиях, выполненных в США для проектирования ряда плотин, в частности плотины Браунли. Позднее экспериментальные исследования по выявлению фильтрационной устойчивости связного грунта при наличии в нем сквозных трещин были начаты в институте ВОДГЕО [33]. Эти исследования велись в направлении подбора состава материала филь-



тра, защищающего ядро плотины, исходя из допустимых скоростей фильтрации в трещине при заданном ее раскрытии, а также в направлении выяснения тех условий, при которых возникающая в ядре трещина закрывается вследствие оплывания ее стенки. В частности, было установлено, что вероятность „заплывания“ трещин в ядре из лессового суглинка уменьшается при увеличении его начальной влажности.

В связи с отсутствием научно обоснованных данных о предполагаемом трещинообразовании в ядре Нурекской плотины, в том числе и сведений о величине и расположении трещин, изучение рассматриваемого вопроса носит несколько отвлеченный характер. Однако независимо от этого исследование в „чистом виде“ фильтрационно-суффозионных процессов в трещинах позволит подойти к раскрытию сущности явлений размыва, „самоуплотнения“ и кольматажа трещин, что, в свою очередь, даст возможность проектировать каменно-земляные плотины с учетом обстоятельств, приводящих к образованию сквозных трещин в противофильтрационных устройствах.

Исследования были начаты постановкой экспериментов с образцами послойно уплотненного трамбованием суглинка, который укладывался с начальной влажностью, близкой к оптимальной, на слой гравийного фильтра. Трещина в суглинке имитировалась рядом продольных отверстий (щелей) (рис. 23), получаемых путем извлечения из образца гребенки, предварительно установленной в диаметральной плоскости прибора. Выбирая гребенку различной толщины, можно было менять величину начального раскрытия щелей в пределах от 0,5 до 3 мм.

Для предотвращения разуплотнения суглинка во время замачивания сверху на него укладывался слой гравия или латунная сетка.

В каждом из опытов, которые обычно начинались после полного замачивания суглинка, измерялись расходы фильтрации через щель и потери напора в щели и слое фильтра. В отдельных опытах замер расходов велся непрерывно с помощью специального расходомера-самописца, сконструированного и изготовленного в Фильтрационной лаборатории ВНИИГа. В частности, изменение расхода фильтрации в одном из опытов показано на графике рис. 23, полученном по записям этого расходомера. Из рассмотрения графика, являющегося типичным для многих опытов, можно видеть, что при фильтрации воды через щель, создаваемую в образце суглинка до его замачивания, не существует линейной зависимости между расходом и градиентом напора. Расход резко возрастает лишь в момент увеличения градиента напора, а затем он вновь падает до некоторой величины, которая остается примерно постоянной на протяжении всего опыта. Это явление объясняет-



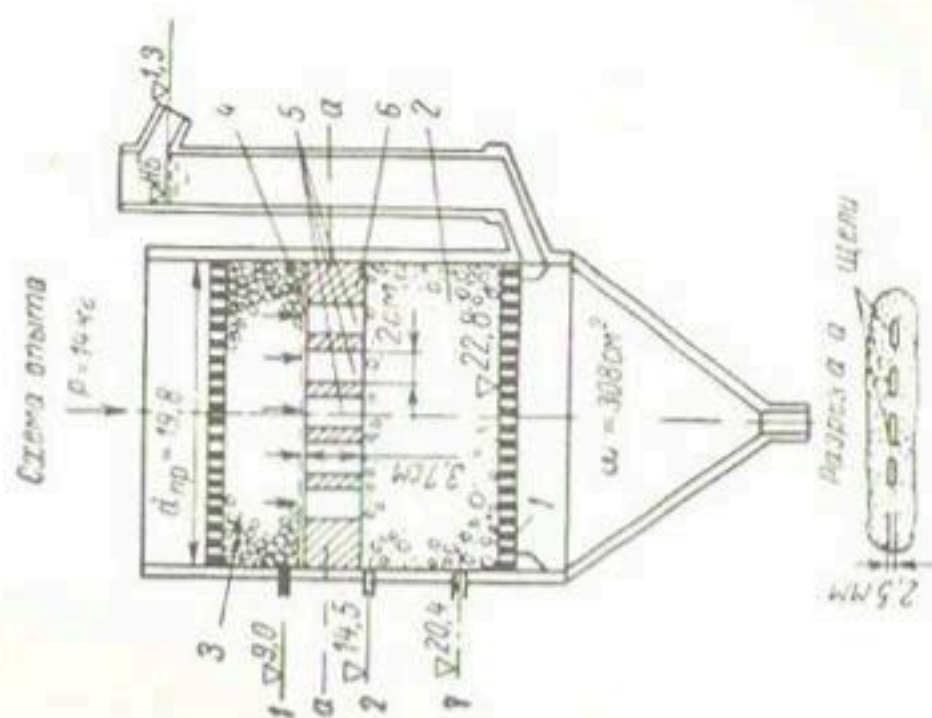
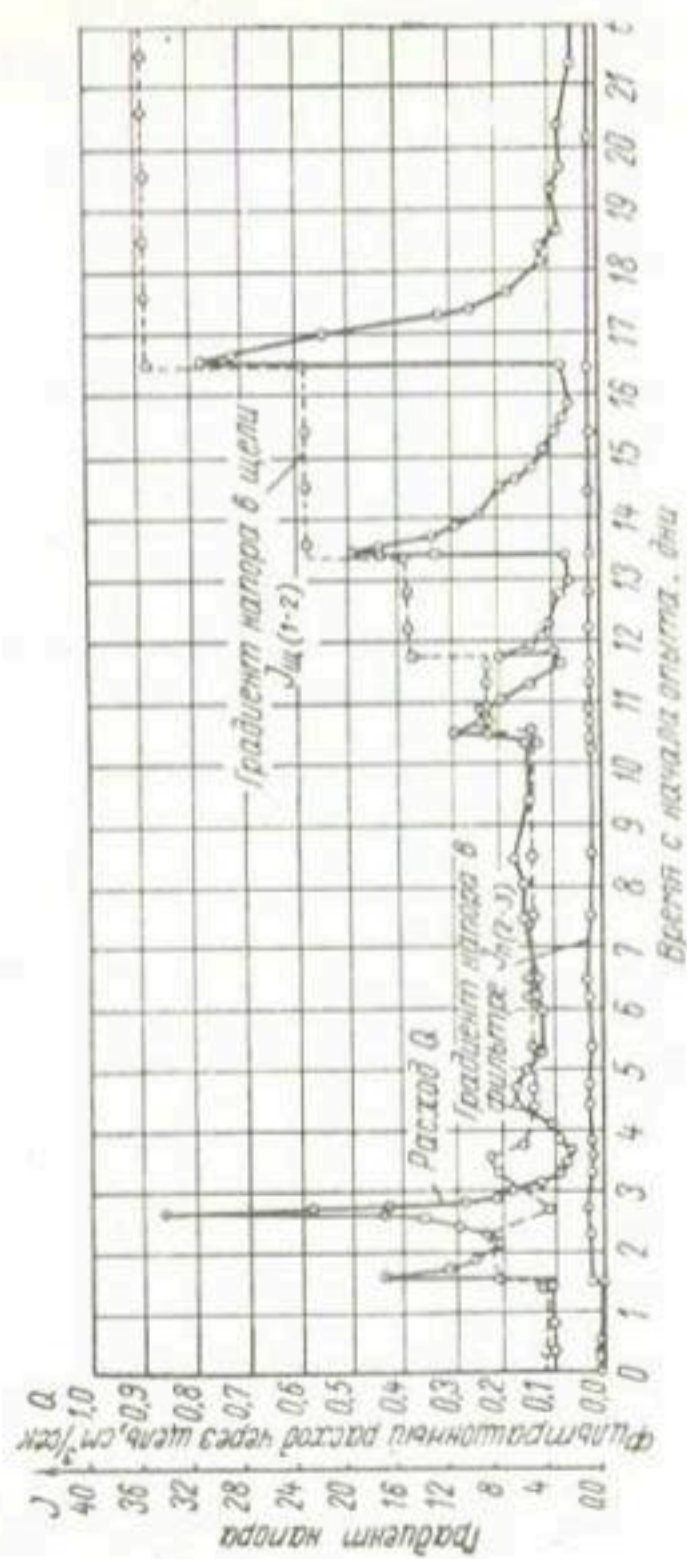


Рис. 23. Схема и результаты опыта по определению фильтрационной прочности образца суглинка при наличии в нем сквозных щелей с раскрытием 2,5 мм, созданных до водонасыщения образца

1-решетка  $d = 2$  мм; 2-галечник 0-20 мм карьера № 9; 3-галечник 12-15 мм; 4-сетка  $1 \times 1$  мм; 5-шланг 2,5 мм; 6-грунт  $T_{с.м} = 1,81 \text{ кг/см}^2$ ,  $W_H = 16,7\%$ .



результаты экспериментальных исследований фильтрационной прочности образцов из суглинка при наличии в них сквозных трещин (щелей)

| № опыта | Объемный вес суглинка $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | Начальная влажность суглинка $W$ , % | Диаметр частиц фильтра $D$ , мм | Высота образца $H$ , см | Раскрытие щели $\delta$ , мм | Коэффициент фильтрации* щели $k_{щ}$ , см/сек | Критический градиент напора $J_{кр}$ | Величина вертикальной нагрузки $KT/cm^2$ | Примечание                                                                         |
|---------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                                                    |                                      |                                 |                         |                              |                                               |                                      |                                          |                                                                                    |
| 100     | 1,75                                               | 17,0                                 | 5—7                             | 2,5                     | 0,5                          | $(1,2 \div 2,9) \cdot 10^{-4}$                | 48,4                                 | —                                        | При размыве образовались две воронки диаметром 10 и 35 мм                          |
| 101     | 1,86                                               | 18,0                                 | 5—7                             | 2,4                     | 0,5                          | $(1,2 \div 12,7) \cdot 10^{-2}$               | 5,2                                  | —                                        | Также образовались две воронки при размыве                                         |
| 102     | 1,78                                               | 18,5                                 | 5—7                             | 2,8                     | 0,5                          | —                                             | —                                    | 0,1                                      | При замачивании сверху вниз произошел размыв грунта                                |
| 103     | 1,83                                               | 18,0                                 | 5—7                             | 2,7                     | 0,5                          | $(1,35 \div 1,7) \cdot 10^{-3}$               | 9,3                                  | —                                        | Размыв произошел в виде двух воронок                                               |
| 104     | 1,92                                               | 17,0                                 | 5—7                             | 2,6                     | 0,5                          | —                                             | >40                                  | 0,13                                     | До замачивания была приложена вертикальная нагрузка. Щель оказалась не проницаемой |
| 105     | 1,81                                               | 15,5                                 | 5—7                             | 2,7                     | 1,0                          | $(3,5 \div 7,7) \cdot 10^{-3}$                | 4                                    | —                                        | Размыв произошел в виде воронки                                                    |
| 109     | 1,66                                               | 18,0                                 | 5—7                             | 3,0                     | 0,5                          | $(1,75 \div 10) \cdot 10^{-3}$                | 9,3                                  | —                                        | То же                                                                              |
| 110     | 1,82                                               | 17,0                                 | 5—7                             | 2,8                     | 1,0                          | —                                             | >40                                  | 0,13                                     | Опыт проводился при вертикальной нагрузке. Щель не фильтровала.                    |
| 111     | 1,83                                               | 18,0                                 | 0—20 <sup>1</sup>               | 4,7                     | 1,0                          | —                                             | >30                                  | 0,13                                     | Под влиянием вертикальной нагрузки щель закрылась. Фильтрации не было              |
| 112     | 1,87                                               | 17,0                                 | 0—20                            | 3,6                     | 2,0                          | $1,3 \cdot 10^{-1} \div 1,0 \cdot 10^{-3}$    | >44                                  | 0,05                                     | Размыва не наблюдалось при градиенте напора, равном 44                             |
| 113     | 1,84                                               | 16,7                                 | 0—20                            | 3,7                     | 2,5                          | $1 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-2}$        | >35                                  | 0,05                                     | Размыва не наблюдалось при градиенте напора, равном 35                             |
| 114     | 1,78                                               | 18,0                                 | 0—40 <sup>1</sup>               | 4,8                     | 2,0                          | $5 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2}$        | >25                                  | 0,16                                     | Размыва не наблюдалось при градиенте напора свыше 25                               |
| 115     | 1,60                                               | 16,0                                 | 0—40                            | 6,5                     | 1,0                          | $0,2 \div 1,0$                                | >26                                  | —                                        | Размыва образца не было при градиентах напора до 26                                |

<sup>1</sup> Отсевы карьерного галечникового грунта с участка строительства Нурекской плотины.



ся тем, что во время замачивания и фильтрации происходит размокание суглинка, сопровождающееся отслаиванием и выпадением в щель частиц, которые заполняют (кольматируют) щель. По мере возрастания градиента напора эти частицы уплотняются под действием фильтрационных сил, вследствие чего проницаемость щели уменьшается.

Как показали опыты (см. табл. 8), существует некоторое предельное значение раскрытия щели, при котором материал разрушения ее стенок не выносится фильтрационным потоком наружу (независимо от размеров пор подстилающего образец слоя фильтра). Для образцов суглинка с объемным весом  $1,7 \div 1,8 \text{ г/см}^3$  и начальной влажностью  $15,5 \div 18,5\%$  это предельное, с точки зрения фильтрационной прочности образца, раскрытие щели можно оценить величиной порядка  $1,0 \text{ мм}$ . Структура частиц заполнителя в такой щели оказывается способной противостоять фильтрационным силам при градиентах напора от 4 до 10. В одном из опытов (опыт № 100) критический градиент напора, при котором начался размыв суглинка в щели с раскрытием  $0,5 \text{ мм}$ , достигал 48,4. Вместе с тем было установлено, что трещины с раскрытием около  $1 \text{ мм}$ , создаваемые в образцах суглинка после их замачивания (водонасыщения), не уплотняются во время фильтрации. Это, в частности, подтвердилось результатами опыта № 115, которые показаны на рис. 24 в виде графиков изменения во времени расхода и градиентов фильтрации через трещину с раскрытием в  $1 \text{ мм}$ , созданную в образце суглинка после его водонасыщения. Из рассмотрения этих графиков видно, что при постепенном повышении напора расход фильтрации возрастал до тех пор, пока не начался размыв суглинка в трещине, после чего, вследствие кольматажа пор фильтра выносимыми из трещины частицами суглинка, величина расхода резко уменьшилась (примерно в девять раз). Несмотря на дальнейшее повышение среднего градиента напора в слое фильтра до 24, расход продолжал оставаться на одном уровне. Следовательно, частицы суглинка, кольматирующие поры песчано-гравийного фильтра, полученного путем отсева частиц менее  $40 \text{ мм}$  из карьерного грунта, оказываются устойчивыми при наличии в слое фильтра весьма высоких градиентов напора, достигающих в зоне выхода потока из щели значений порядка  $100 \div 120$ .

В опытах № 111–114, в которых в качестве материала фильтра использовался отсев карьерного галечника, также не наблюдалось выноса частиц суглинка через слой фильтра при средних градиентах напора от 25 до 44<sup>1</sup>. Таким образом, во всех случаях, когда материал подстилающего слоя (фильтра) способен задерживать частицы грунта, выносимые фильтраци-

<sup>1</sup> Зерновой состав материала обратного фильтра в опытах характеризуется графиком на рис. 24.



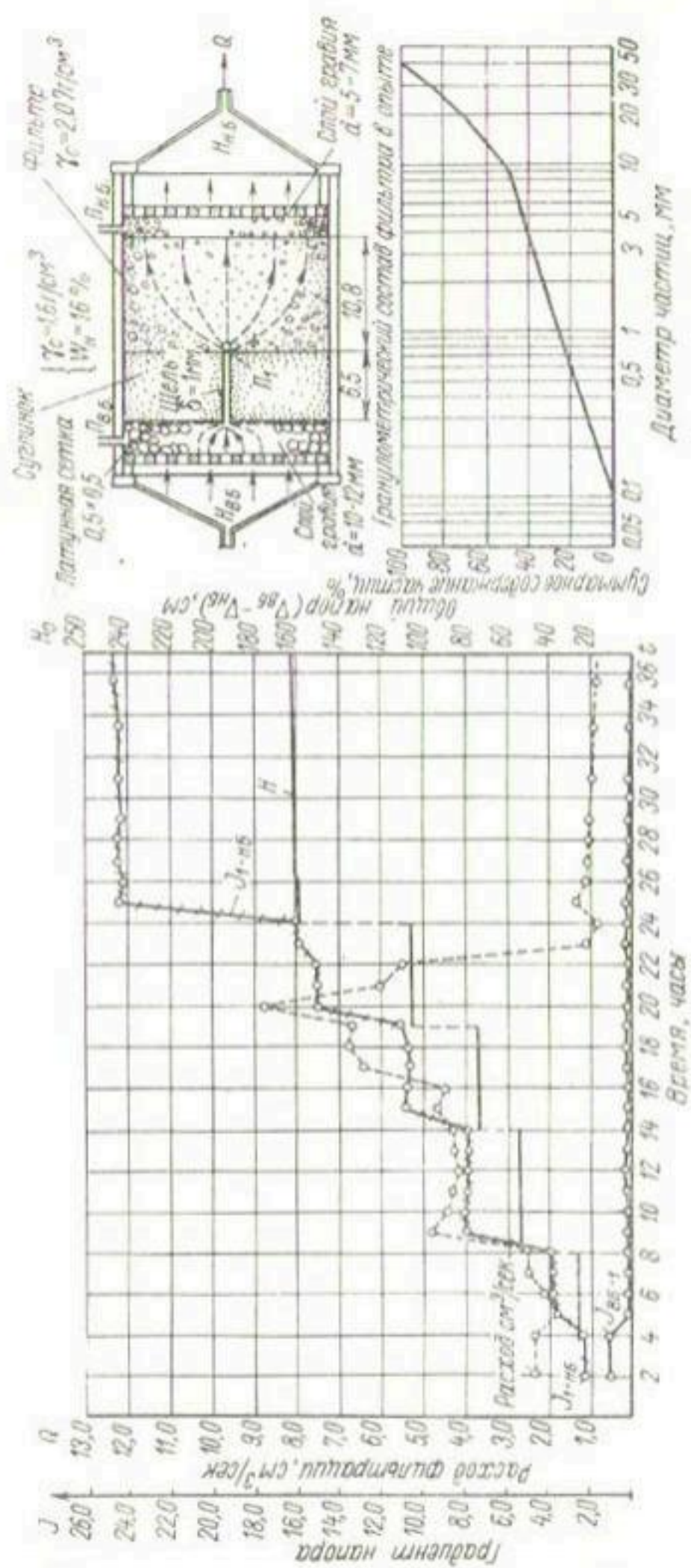


Рис. 24. Схема и результаты опыта № 115 по определению фильтрационной прочности образца суглинка при наличии в нем сквозной щели с раскрытием 1.0 мм, созданной после водонасыщения образца

Толщина образца суглинка 6,5 см; толщина слоя фильтра 10,8 см.



онным потоком из щели, происходит надежная „закупорка“ ее устья и средний градиент напора может при этом достигать очень больших значений без существенного увеличения установившегося расхода фильтрации и размыва суглинка.

Для выяснения характера изменения напора при фильтрации воды в щели был поставлен специальный опыт, в котором внутрь щели с раскрытием, равным 2 мм, были введены на разную глубину очень тонкие металлические трубки, присоединенные к пьезометрам. По показаниям пьезометров удалось установить, что при незначительных расходах фильтрации напор по глубине щели практически не изменялся. Основная потеря напора наблюдалась в месте выхода фильтрационного потока из щели в подстилающий гравийный слой. Следовательно, образующиеся в неводонасыщенном суглинке сквозные трещины (щели) с раскрытием свыше одного миллиметра, при сравнительно небольших внешних нагрузках, не способны „самоуплотняться“. В таких случаях размыв ядра (или экрана) плотины можно предотвратить либо путем устройства со стороны его низовой грани фильтра, способного задерживать выносимые из трещины частицы грунта, либо путем кольматажа самих трещин однородным мелкозернистым материалом, например песком, укладываемым на верховую грань. Эти способы повышения фильтрационной прочности каменно-земляных плотин являются вполне рациональными и надежными<sup>1</sup>.

Обратимся к установлению критериев, определяющих применимость того или иного способа.

Известно, что разрушение глинистого грунта при размыве происходит в виде отрыва от основной его массы комочков (агрегатов), имеющих значительно большие размеры по сравнению с отдельными частицами, входящими в состав грунта. В связи с этим исходным критерием для первого способа будет соотношение между размерами комочков грунта, выносимых потоком из трещины, и диаметрами пор фильтра, удовлетворяющее так называемому „условию кольматируемости“ фильтра, т. е. условию непроходимости комочков через поры.

Очевидно, в данном случае вопрос заключается в определении размеров комочков, что можно сделать только с помощью специальных исследований, основанных на эксперименте. Эти, никем ранее не выполнявшиеся исследования, подразделяются на два этапа. В первом — воспроизводится явление размыва грунта и осуществляется улавливание его частиц и комочков, отрывааемых и выносимых потоком из трещины (щели), а во втором — устанавливаются их количество и размеры.

<sup>1</sup> Существует еще один конструктивный способ предотвращения размыва ядра или экрана, заключающийся в устройстве малопроницаемых фильтров, при которых скорость протекания воды по трещинам будет ниже размывающей.



Рассмотрим каждый из перечисленных этапов более подробно. На рис. 25 показана схема одного из опытов, во многом сходных с теми, о которых говорилось выше. Здесь также в цилиндре прибора Дарси помещался образец уплотненного суглинка, подстилаемый слоем гравия крупностью 10–11 мм. После окончания замачивания в суглинке прорезалась вертикальная сквозная щель с раскрытием 2–3 мм, затем на него укладывалась латунная сетка (для предотвращения закупорки

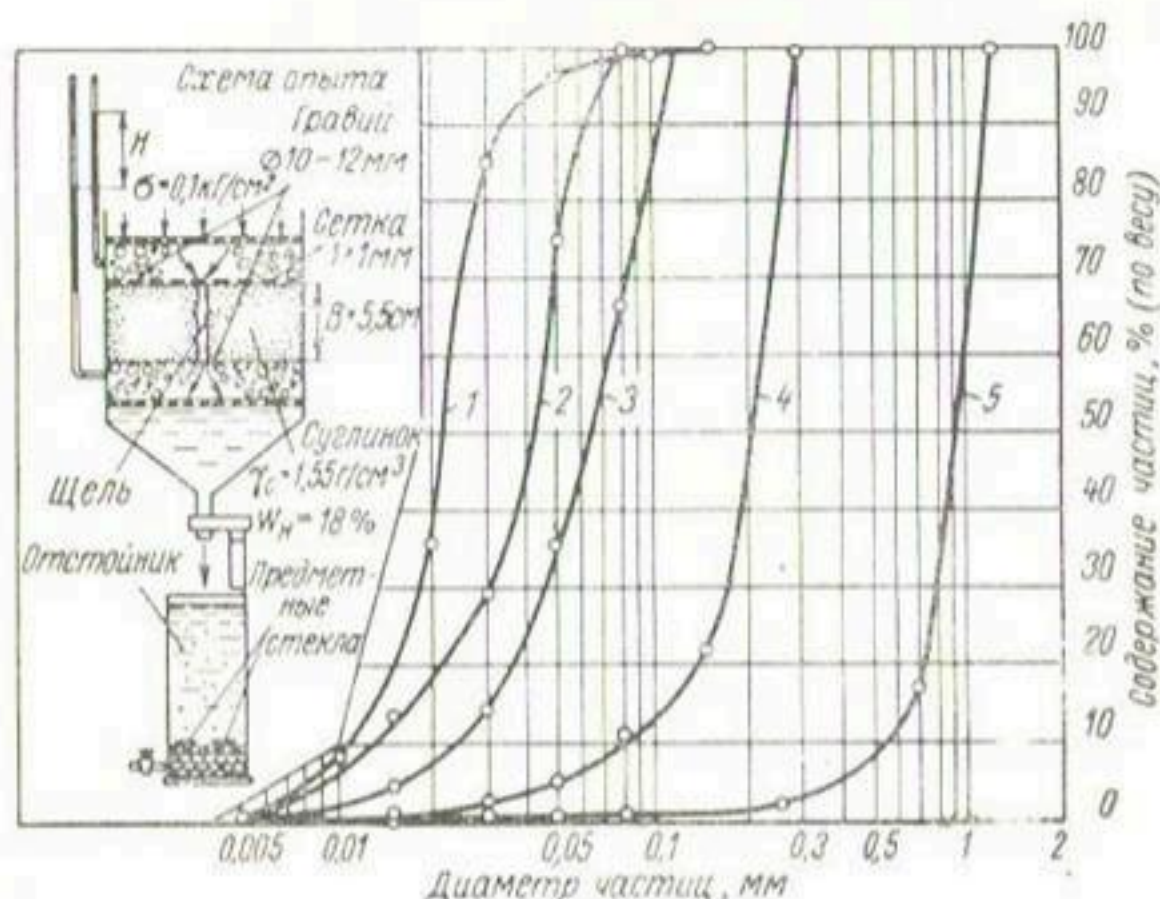


Рис. 25. Схема и результаты опытов по определению крупности частиц лессовидного суглинка, отрывающихся при его размыве внутри щели

1—размываемый суглинок; 2, 3, 4, 5—сuspензии, образующиеся во время размыва суглинка, соответственно, при градиентах потока  $I = \frac{H}{B} = 0,5; 2,5; 3 \text{ и } 6,2$ .

щели гравийными частицами) и распределительный слой, через который передавалась на суглинок сжимающая нагрузка интенсивностью около  $0,1 \text{ кг/см}^2$ . После завершения этих подготовительных операций через щель пропускалась с определенным напором вода, производящая размыв (эрозию) стенок щели.

От предыдущих описываемые опыты отличались тем, что вытекающая из прибора суспензия (смесь воды и частиц грунта) отдельными порциями направлялась в заполненный водой цилиндрический сосуд (отстойник), на дно которого заранее были уложены слой гравия и поверх него решетка с предметными стеклами. По окончании осаждения частиц суглинка отстойник медленно опорожнялся через сливной кран. Как



только уровень воды опускался ниже решетки, она вместе с предметными стеклами извлекалась из отстойника. Такой порядок действий затем неоднократно повторялся при других значениях напора и скоростях протекания воды через щель. На этом заканчивался первый этап исследований, в результате которых были получены образцы размытого суглинка в виде его частиц и комочков осевших тонким слоем на предметных стеклах (рис. 26).



Рис. 26. Фотография частиц и комков суглинка, вымытых из щели при градиенте напора, равном 6,2. Увеличено в 3,5 раза.

Заключительным этапом исследований являлось установление количественного и весового распределения по размерам (диаметрам) частиц и комочков суглинка. Для этого подсчитывалось с помощью микроскопа их число в нескольких произвольно ориентированных на поверхности стекол полосах, ограниченных в поперечном направлении шириной шкалы окуляра, что соответствовало 0,85 и 0,35 мм в натуре (при 20- и 5-кратных увеличениях). Подсчет частиц производился по восьми интервалам изменения диаметра, в пределах от 0,01 до 2 мм.

Тщательное изучение суглинка под микроскопом показало отсутствие в нем комочков диаметром менее 0,02 мм, в связи с чем суммарный вес отдельных частиц и комочков вычислялся по формуле

$$P_z = \frac{\pi}{6} \left( \Delta \sum_{0,01}^{0,02} N_{d_i} d_i^3 + \gamma_k \sum_{0,02}^2 N_{d_i} d_i^3 \right), \quad (32)$$

где  $\Delta$  и  $\gamma_k$  — величины объемного веса отдельных частиц и комочков суглинка, соответственно равные 2,7 и 2 г/см<sup>3</sup> (при пористости комочков  $n_k = 0,25$ );

$N_{d_i}$  — количество частиц или комочков диаметром  $d_i$ .



Далее, по формуле

$$P_i = \frac{\gamma_{ik} N_{d_i} d_i^3}{P_\Sigma} 100\% \quad (33)$$

определялось весовое содержание (в процентах) комочков, а также частиц в каждом интервале изменения их диаметра. В итоге были получены суммарные кривые „гранулометрического“ состава образцов размытого суглинка, которые показаны на рис. 25.

Из рассмотрения кривых видно, как по мере нарастания интенсивности размыва (вследствие увеличения градиента напора) возрастает крупность отрываемых потоком комочков (агрегатов) суглинка. Это особенно заметно при увеличении градиента свыше трех. На основе сопоставления диаметров комочков подвергнутого размыву суглинка, меньше которых содержится в нем по весу 50%, со средним диаметром отдельных его частиц, можно сделать очень важный вывод: в самом начале размыва ядра, когда раскрытие сквозной трещины мало, отношение между указанными диаметрами будет порядка десяти<sup>1</sup>. И в этом случае при оценке кольматируемости пор фильтра надо выбирать для расчетов соответствующие размеры комочков суглинка, выносимых потоком из трещины. Так, например, выбирая (с запасом) по графику 3 (рис. 25) расчетный диаметр  $d_p = d_{50} = 0,065$  мм, из условия непроходимости комочков суглинка, находим допустимый диаметр сквозных пор обратного фильтра  $D_0^{\text{доп}} = 2d_p = 0,13$  мм.

Даже при вполне надежных фильтрах появление сквозных трещин в ядре (или экране) плотины делает тяжелыми условия ее работы вследствие резкого увеличения градиентов в слоях фильтра, „гасящих“ весь напор воды. В таких случаях технически более совершенным является способ обеспечения фильтрационной прочности плотины, основанный на выявленном нами эффекте заполнения (кольматажа) самих трещин на всем их протяжении частицами однородного несвязного мелкозернистого материала, например песка. За счет этого происходит самовосстановление водоупорных свойств ядра (или экрана) плотины.

Сущность процесса кольматажа трещин и такая важная его характеристика, как зависимость длины заполняемого песком участка трещины от градиента напора и шероховатости стенок, оставались невыясненными. Здесь можно констатировать полное отсутствие научно обоснованных методов расчета кольматажа трещин. В связи с этим для успешного разрешения

<sup>1</sup> Показанная на рис. 25 кривая зернового состава лессовидного суглинка Лангарского месторождения получена в результате седиментационного его анализа методом непрерывного взвешивания (метод Фигуровского), без применения диспергирующих добавок.



поставленного вопроса о целесообразности устройства на верховой грани ядра (или экрана) плотины песчаного слоя необходимо кроме изучения явлений трещинообразования определить условия, при которых происходит заполнение трещин песком.

С этой целью вначале рассмотрим указанный вопрос с теоретической точки зрения. Представим себе, что в ядре плотины, вдоль сечения  $n-n$ , расположенного на глубине  $h_1$  под уровнем верхнего бьефа, возникла вертикальная сквозная трещина с раскрытием, равным  $\delta$  (рис. 27). Очевидно, что при

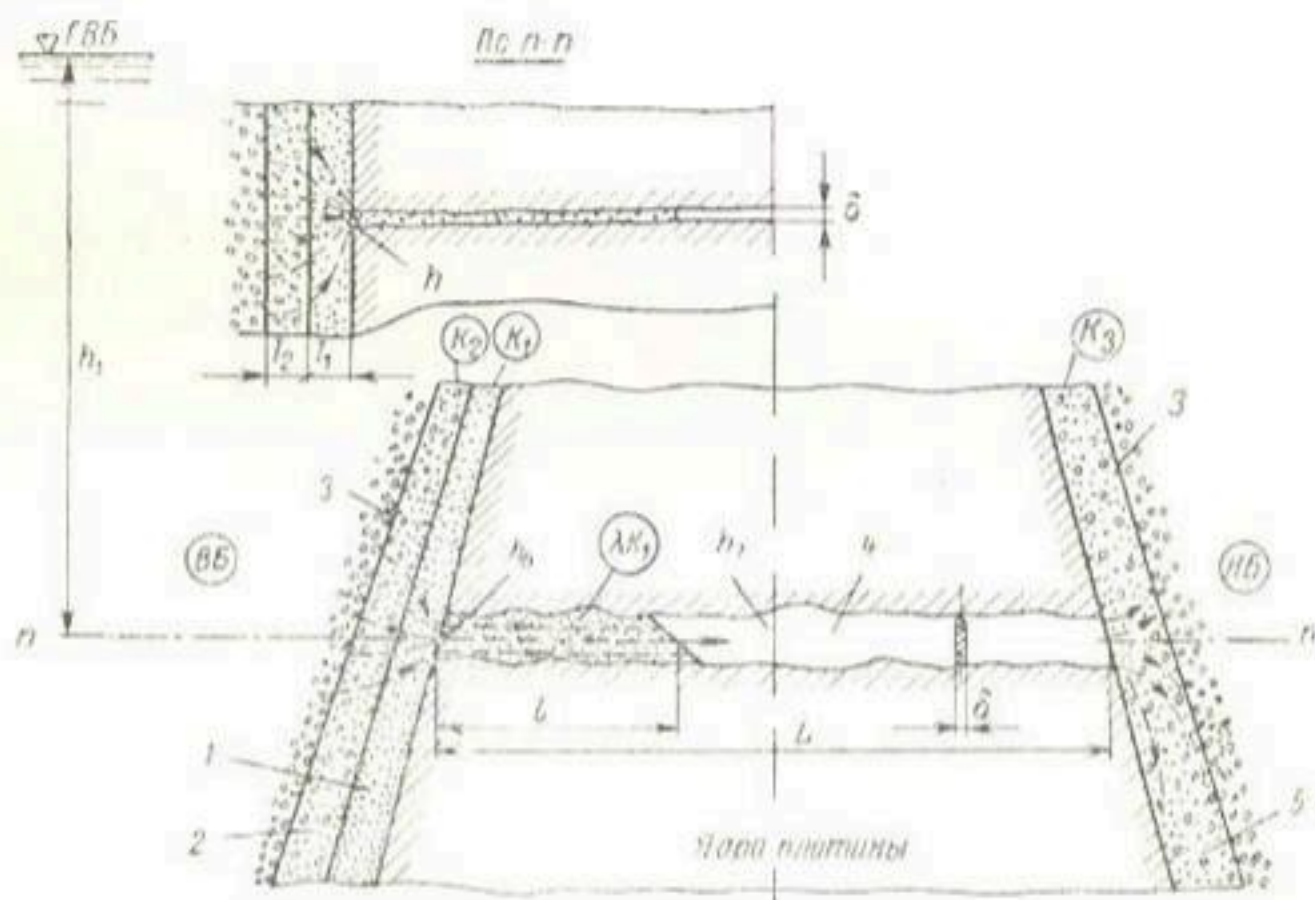


Рис. 27. Расчетная схема кольматажа песком сквозных трещин в ядре плотины

1—первый песчаный слой обратного фильтра на верховой грани ядра; 2—песчано-гравийный слой фильтра; 3—упорные призмы плотины; 4—сквозная трещина; 5—обратный фильтр на низовой грани ядра.

наличии на верховой грани ядра песчаного фильтра данная трещина будет заполняться песком, „затягиваемым“ в трещину фильтрационным потоком.

Глубина проникновения песка в трещину  $l_{\text{макс}}$ , являющаяся единственной интересующей нас в данном случае величиной, может быть определена из отношения

$$l_{\text{макс}} = \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{т}}}{I_{\text{п}}}, \quad (34)$$

где  $h_{\text{в}}$  — величина напора в устье трещины;

$h_{\text{т}}$  — величина напора внутри незаполненного песком участка трещины;



$I_{II}$  — критический градиент напора, при котором начинается перемещение песка в трещине.

В связи с тем, что из трех перечисленных величин, входящих в формулу (28), величина  $I_{II}$  должна определяться из опыта, обратимся к отысканию остальных двух:  $h_v$  и  $h_T$ .

Если толщины первого и второго слоев фильтра на верхней грани ядра равны  $T_1$  и  $T_2$ , а коэффициенты фильтрации этих слоев, соответственно,  $k_1$  и  $k_2$ , то, согласно [33], приток воды к трещине (которая в данном случае рассматривается как дрена, лежащая на водоупоре под дном водотока) можно подсчитать по формуле

$$q = k_1 \frac{H}{\Phi} = k_1 \frac{H}{0,733 \lg \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{8} \frac{\delta}{T} \right)}, \quad (35)$$

где  $H$  — действующий напор, равный разности напоров верхнего бьефа и в рассматриваемом горизонтальном сечении устья трещины, т. е.  $H = h_1 - h_v$ ;

$\Phi$  — фильтрационное сопротивление, определяемое по формуле  $\Phi = 0,733 \lg \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{8} \frac{\delta}{T} \right)$ ;

$T = T_1 + T_2 \frac{k_1}{k_2}$  — расчетная толщина фильтра, приведенная к проницаемости первого его слоя.

Легко убедиться в том, что приток воды к трещине также можно подсчитать (с запасом около 10%) по формуле для случая осе-радиальной фильтрации:

$$q = k_1 \frac{\pi H}{\ln \frac{2T}{\delta}}. \quad (36)$$

Как видно из формулы (36), при данном напоре величина притока воды к трещине в основном определяется водопроницаемостью слоев обратного фильтра и мало зависит от раскрытия трещины, так как  $\delta$  входит под знак логарифма. Из этого следует, что при наличии трещинообразования в ядре защитная роль обратного фильтра заключается также в ограничении интенсивности фильтрации по трещинам.

Далее из формулы (36) находим

$$h_v = h_1 - q \frac{\ln \frac{2T}{\delta}}{\pi k_1}. \quad (37)$$



Пренебрегая потерями напора в незаполненной песком части трещины, также можем определить

$$h_r = q \frac{\ln \frac{2T_3}{\delta}}{\pi k_3}, \quad (38)$$

где  $T_3$  — толщина слоя фильтра на низовой грани ядра;  
 $k_3$  — коэффициент фильтрации данного слоя.

Подставляя значения  $h_n$  и  $h_r$  в формулу (34), получим

$$l_{\max} = \frac{1}{I_n} \left[ h_1 - \frac{q}{\pi} \left( \frac{\ln \frac{2T}{\delta}}{k_1} + \frac{\ln \frac{2T_3}{\delta}}{k_3} \right) \right] = \frac{h_1 - a^* q}{I_n}, \quad (39)$$

где

$$a^* = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\ln \frac{2T}{\delta}}{k_1} + \frac{\ln \frac{2T_3}{\delta}}{k_3} \right).$$

Примем во внимание, что скорость фильтрации в заполненной песком трещине

$$v = \lambda k_1 I_l = \frac{q}{\delta}, \quad (40)$$

где  $\lambda$  — коэффициент, учитывающий более высокую проницаемость рыхлого заполнителя трещины по сравнению с проницаемостью песка в фильтре;

$I_l$  — величина градиента напора в пределах заполненного песком участка трещины.

Тогда, выразив величину

$$q = \lambda k_1 \delta I_l \quad (41)$$

и подставив ее в формулу (39), найдем

$$l_{\max} = \frac{h_1}{I_n} - \frac{\lambda k_1 \delta}{\pi} \left( \frac{\ln \frac{2T}{\delta}}{k_1} + \frac{\ln \frac{2T_3}{\delta}}{k_3} \right) = \frac{h_1}{I_n} - \lambda k_1 \delta a^*. \quad (42)$$

Учитывая, что в рассматриваемом случае (для Нурекской плотины)  $k_1 \approx k_2 = k_3$  и  $T = T_3$ , формулу (42) можно упростить и представить в виде

$$l_{\max} = \frac{h_1}{I_n} - \frac{\lambda \delta}{\pi} \ln \left( \frac{2T}{\delta} \right)^2. \quad (43)$$

Оценивая величину второго члена в правой части формулы (43), учитывающего потери напора в слоях фильтра, находим,



что она пренебрежимо мала по сравнению с первым членом, в связи с чем

$$l_{\text{макс}} \approx h_1 / I_{\text{н}}. \quad (44)$$

Из формул (43) и (44) следует весьма важный вывод: глубина проникновения песка по сквозным трещинам в ядре Нурекской плотины (в том случае, если такие трещины возникнут) практически не зависит от их раскрытия, толщины и проницаемости фильтров<sup>1</sup>.

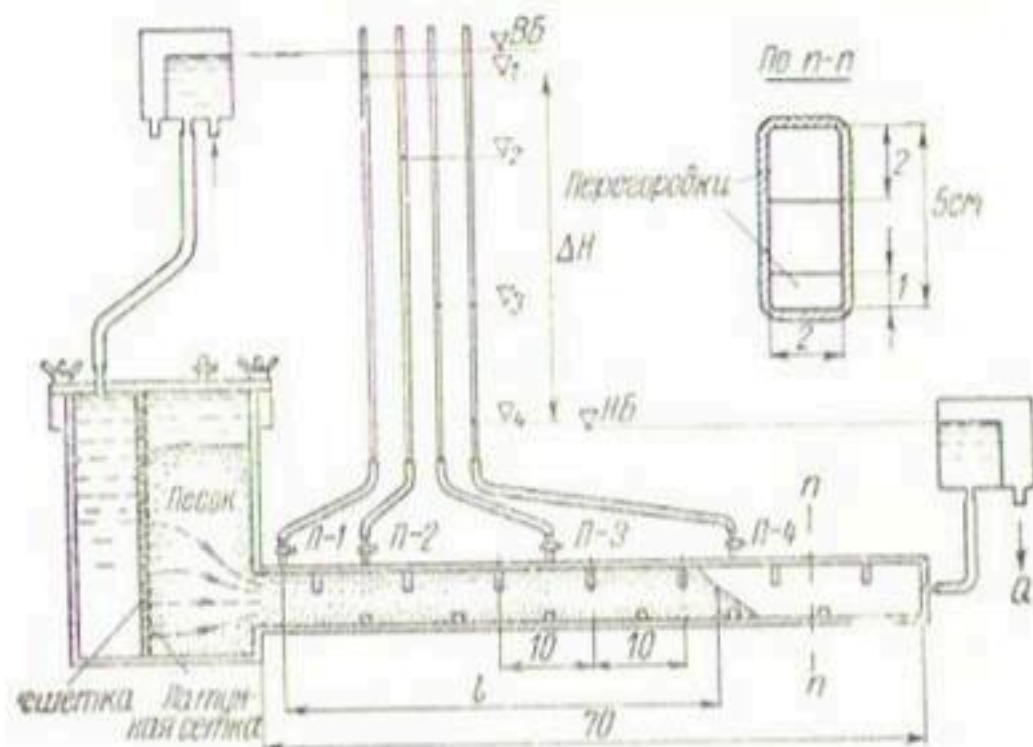


Рис. 28. Схема установки для экспериментального изучения кольматажа сквозных трещин песком.

Определение критического градиента напора, а также выяснение характера перемещения песка в трещине производилось на специальной экспериментальной установке, моделирующей процесс заполнения песком трещин в ядре плотины. Основной деталью этой установки (см. рис. 28) является горизонтальная прозрачная трубка сечением  $2 \times 5$  см, на верхней и нижней стенках которой имеются небольшие перегородки (ребра), имитирующие извилистость трещины в вертикальной плоскости. Одним концом трубка присоединена к напорному баку с песком. Под действием фильтрационных сил, возникающих вследствие повышения давления воды в баке, песок проникает внутрь трубки на расстояние

$$l = H \approx I_{\text{н}},$$

<sup>1</sup> Этот вывод основывается на предположении, что критический градиент напора  $I_{\text{н}}$ , соответствующий началу перемещения песка в трещине, также не зависит от указанных параметров. Это подтверждается экспериментами, описанными ниже.



где  $H^*$  — разность пьезометрических напоров во входном сечении трубки и в сечении, расположенном на границе заполненного песком участка длиной  $l$  (рис. 28);  $I_n$  — критический градиент напора на данном участке трубки, соответствующий началу движения песка при повышении давления воды в бачке.

Методические опыты, проведенные по указанной схеме в цилиндрических трубках без перегородок, показали (см. табл. 9), что крупность песка, а также диаметр трубок практически не влияет на величину  $I_n$ .

Таблица 9

| Диаметр трубки $d_T=20$ мм; абсолютная шероховатость внутренней поверхности $\epsilon=0,4$ мм |          |       |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|------|
| Крупность однородного песка $d$ , мм                                                          | 0,25—0,5 | 0,5—1 | 1—2  |
| Величина критического градиента напора $I_n$ . . . . .                                        | 0,7      | 0,6   | 0,61 |

В результате этих опытов был выяснен характер процесса заполнения песком трубок, не имеющих внутри перегородок. Оказалось, что основная масса песка в трубке остается неподвижной. Перемещение песка происходит в виде струйки по очень узкому „фильтрационному ходу“ в самой верхней части трубки. Увеличение шероховатости внутренней поверхности трубок и даже расположенная вдоль этой поверхности спираль из проволоки диаметром 2 мм не повлияли на характер заполнения трубок песком<sup>1</sup>. Именно в связи с этим в верхней части трубки были устроены перегородки, которые „перерезали“ сосредоточенный ход движения песка и приблизили условия проведения опыта к условиям натуры.

Опыты, проводившиеся с песком крупностью 0,1÷0,25, 0,25÷1,0 и 1÷2 мм, показали, что перегородки не меняют по существу характера проникновения песка внутрь трубки. Так же, как и в предыдущих опытах, перемещение песка осуществлялось по сосредоточенному „фильтрационному ходу“, расположенному в верхней части трубки. При этом, если трубка во время опыта имела горизонтальное положение, перед перегородками (по ходу потока) возникали незаполненные песком зоны (каверны), которые исчезали при наклоне трубки в сторону нижнего бьефа. Во всех случаях за перегородками наблюдались явления сосредоточенного выноса песка в виде грифонов, интенсивность которых уменьшалась по мере снижения среднего градиента напора в пределах заполненного

<sup>1</sup> Следует, однако, отметить, что наличие спирали внутри трубки обусловило заметное повышение критического градиента напора до 0,83.



песком участка трубки. В целом, наклон трубки в ту или другую сторону в продольном направлении приводит к некоторому увеличению градиента напора  $I_n$ , соответствующего началу перемещения песка в трубке. Это можно видеть из рассмотрения табл. 10.

Таблица 10

| Крупность песка $d$ , мм                                             | 0,1—0,25 | 0,25—1,0 | 1—2  |
|----------------------------------------------------------------------|----------|----------|------|
| Величина градиента $I_n$ при горизонтальном положении трубки . . .   | 0,61     | 0,50     | 0,46 |
| Величина градиента $I_n$ при наклоне трубки 1:4 в сторону НБ . . .   | 0,82     | —        | 0,7  |
| Величина градиента $I_n$ при наклоне трубки 1:3,6 в сторону ВБ . . . | —        | 0,52     | —    |

Таким образом, как показывают опыты, сквозные трещины в ядре Нурекской плотины (в случае их возникновения) будут целиком заполняться (кольматироваться) песком из первого слоя фильтра, расположенного на верховой грани ядра, поскольку средний градиент напора в ядре в два-три раза превосходит критическую его величину  $I_n$ , полученную в опытах. При этом толщина слоя должна быть рассчитана исходя из возможности заполнения песком трещин без нарушения сплошности фильтра в целом.

Основываясь на результатах выполненных исследований по установлению фильтрационной прочности суглинистого ядра плотины при наличии в нем сквозных трещин, можно сделать следующие выводы.

1. Мелкие трещины с раскрытиями до 1 мм, возникшие в ядре до наполнения водохранилища, способны затем „самоуплотняться“ во время замачивания суглинка. Трещины, возникшие в ядре после его водонасыщения, „самоуплотняться“ не могут.

2. Соответствующими конструктивными мероприятиями, например, устройством на низовой грани ядра (или экрана) плотины специально подобранных фильтров, задерживающих частицы суглинка, вымываемые потоком из образовавшихся сквозных трещин, можно полностью предотвратить размыв ядра. С этой точки зрения требованиям надежной защиты ядра Нурекской плотины вполне удовлетворяют фильтры, выполненные из песчано-гравийного материала крупностью до 50 мм, получаемого путем рассева местного аллювиального грунта. В данном случае отношение максимального диаметра пор фильтра к диаметру  $d_{70}$  частиц суглинка, вымываемых из трещины, примерно равно единице.

3. Предложен способ повышения фильтрационной прочности плотины, отличающийся тем, что со стороны верховой



границы ядра или экрана устраивается переходный слой из мелкозернистого однородного материала (песка), способного полностью кольматировать поперечные трещины, возникающие в ядре (экране) по какой-либо причине, например вследствие землетрясения. Экспериментальным путем установлено, что при сравнительно небольших градиентах фильтрационного потока, порядка 0,5—0,8, песок вовлекается потоком в трещину, в связи с чем может происходить „самовосстановление“ водопорных свойств плотины.

Данное конструктивное мероприятие позволяет резко снизить, а в ряде случаев целиком устранить сосредоточенную фильтрацию по сквозным трещинам благодаря самопроизвольному их тампонированию маловодопроницаемым материалом (песком).

#### **§ 14. Изучение сопротивляемости суглинка контактному размыву по трещинам в скальном основании плотины**

Одним из наиболее сложных и трудно разрешимых вопросов проектирования высокой каменно-земляной плотины, расположенной на скальном основании, является обеспечение надежной защиты ее водопорного элемента от размыва потоком обходной фильтрации по открытым трещинам в основании и береговых склонах. Этот поток представляет серьезную опасность для сооружения, особенно при неблагоприятных геологических условиях и наличии сейсмичности в районе створа плотины.

Широкое распространение получили способы защиты от размыва, заключающиеся в уменьшении интенсивности обходной фильтрации в зоне примыкания ядра или экрана к основанию либо путем уплотнения открытых трещин, каверн и т. п. в толще пород основания с помощью инъекции цементирующих или тампонирующих растворов, либо путем увеличения подземного контура за счет увеличения толщины водопорного элемента. В ряде случаев считают также целесообразным устройство покрытия поверхностей основания и береговых склонов слоем бетона или торкрета. Все эти способы весьма трудоемки и требуют больших материальных затрат. Кроме того, они не могут полностью гарантировать отсутствие размыва при нарушении сплошности основания плотины во время ее эксплуатации, которое может возникнуть, например, вследствие землетрясения.

В связи с этим проверка суффозионной устойчивости материала ядра или экрана при воздействии потока обходной фильтрации является одним из главных принципов проектирования высоких каменно-земляных плотин.



Вопрос, который необходимо решить в данном случае, сводится к определению значений размывающих скоростей фильтрации по трещинам. К сожалению, в настоящее время он совершенно не изучен и здесь, по-видимому, трудно использовать результаты исследований процессов размыва связных грунтов, слагающих русло открытых потоков, так как условия размыва в том и другом случае существенно различны. Например, при размыве грунта по трещинам в скальном основании сила тяжести оказывается неблагоприятной, поскольку она способствует отрыву частиц. Вместе с тем неодинаковы гидродинамические характеристики (распределение скоростей по сечению, интенсивность пульсаций давления и т. п.) руслового потока и потока в трещине, следовательно, неодинаково силовое воздействие этих потоков на размываемый грунт. И все же можно предположить, что существуют общие отличительные особенности явлений размыва в рассматриваемых случаях. Поэтому обратимся вначале к краткому обзору состояния изученности вопроса о размыве связных грунтов.

Согласно имеющимся в литературе сведениям, сопротивляемость связного грунта размыву обусловлена существованием между его частицами сцепления, величина которого зависит от различного сочетания параметров (гранулометрического и минералогического состава, плотности, влажности и т. п.), характеризующих физико-механические свойства грунта. Данное обстоятельство в значительной мере затрудняло изучение явлений размыва связных грунтов, вследствие чего, как отмечал Лаурсен [35], „... очень мало было известно о сопротивлении глин размыву“.

Основные закономерности процесса размыва глинистых грунтов были выяснены сравнительно недавно в результате исследований, выполненных в ГрузНИИГиМе под руководством Ц. Е. Мирцхулавы [28, 36]. Эти исследования, рассмотрением которых мы ограничим обзор состояния вопроса, выявили отсутствие четкой связи между размывающими скоростями и объемным весом грунтов, различных по составу и структуре. Вместе с тем, они показали, что сопротивляемость размыву водонасыщенного глинистого грунта возрастает пропорционально его сцеплению, определяемому методом пенетрации. Величина сцепления поверхностного слоя ложа водотока в данном случае „интегрально отражает обширный комплекс физико-технических показателей сопротивляемости связных грунтов размыву“ [28]. В результате тщательных наблюдений за процессом размыва связных грунтов природного сложения было отмечено резкое изменение сопротивляемости размыву и характера самого размыва в зависимости от начальной влажности грунта. Так, сопротивляемость размыву грунтов в состоянии, близком к воздушно-сыхому, ничтожна по сравнению с сопротивляемостью грунтов в состоянии полного водонасыщения.



Было также отмечено, что процесс размыва грунтов характеризуется несколькими этапами. В начальном этапе происходит смыв потоком частиц или агрегатов, связь которых с основным массивом грунта нарушена. После этого образуется шероховатая поверхность, определяемая формой более крупных и водоустойчивых структурных отдельностей. При дальнейшем возрастании скорости течения потока начинается подмыв агрегатов (отдельностей) со стороны, обращенной против течения, вследствие чего постепенно увеличиваются пульсирующие лобовое и подъемное усилие потока, а затем происходит срыв подмытых агрегатов. Оказалось, что вообще с увеличением интенсивности пульсаций размывающая способность потока (при тех же средних по сечению скоростях) резко повышается. И, наоборот, силовое воздействие потока на размываемый грунт снижается при наличии в потоке взвесей, демпфирующих пульсацию скорости. Это, по-видимому, объясняется тем, что предел выносливости глинистых грунтов при динамических нагрузках в пять—шесть раз меньше предела сцепления при статической разрывающей нагрузке [28].

Опытами и натурными наблюдениями установлено, что размывающие скорости потока в открытых суглинистых руслах в среднем равны  $100 \text{ см/сек}$ , а в глинистых —  $150 \text{ см/сек}$ .

Сопротивляемость ядра или экрана каменно-земляной плотины размыву потоком в трещинах основания нельзя определить известным способом — путем испытания грунта в гидравлическом лотке, так как в нем отсутствуют характерные условия течения воды в трещинах. Вместе с тем, устойчивость размываемого по трещине грунта существенным образом зависит от соотношения между диаметром его частиц (комочков) и раскрытием трещины, а также от ряда других факторов, например шероховатости стенок трещины.

Для определения этого важнейшего показателя фильтрационной прочности плотины нами был разработан способ, который может быть осуществлен с помощью показанного на рис. 29, б прибора. Сущность предложенного способа заключается в следующем.

Испытуемый грунт 1 помещают в верхний отсек двухлопастной коробки 2 (рис. 29, а), а в нижнем отсеке располагают образец скальной породы 3, имеющий продольную сквозную трещину 4. Уложенный грунт уплотняют с помощью поршня 5, воспринимающего необходимое для уплотнения усилие от нагрузочного устройства 6, например гидравлического домкрата. Затем через трещину пропускают поток воды, постепенно увеличивая его скорость до тех пор, пока не начнется размыв грунта. Градиенты потока определяют по показаниям пьезометров 7, присоединенных к отверстиям 8, выходящим в трещину.



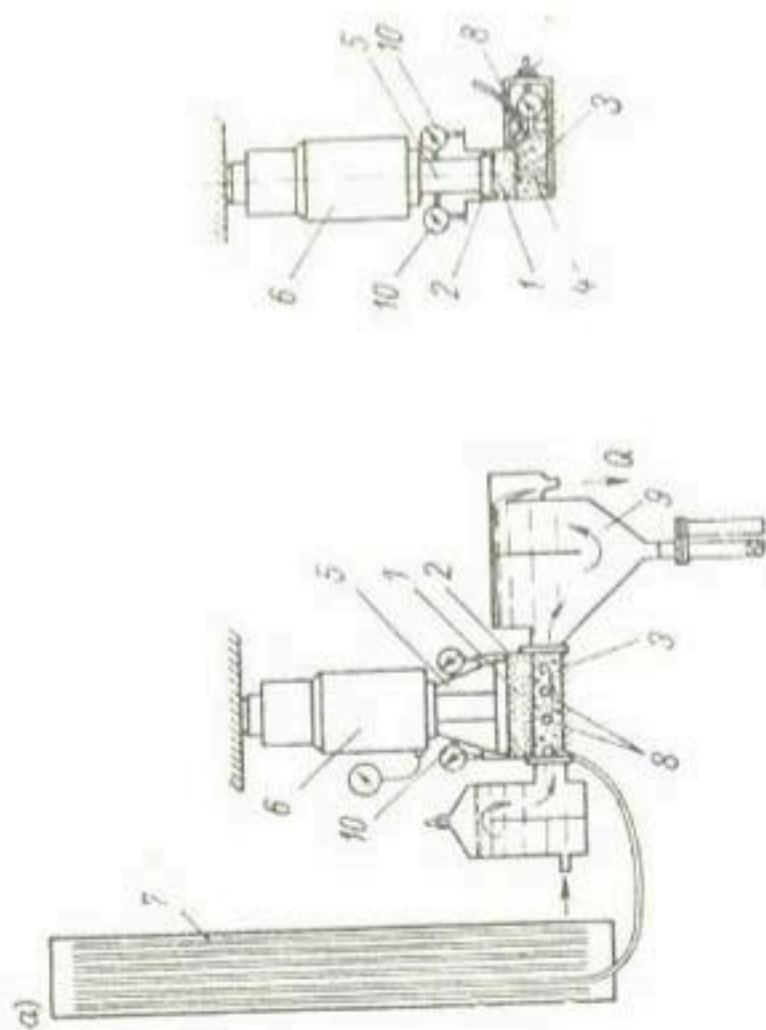


Рис. 29. а—схема и б—внешний вид прибора для определения сопротивляемости грунта разрыву потоком обходной фильтрации по открытым с поверхности трещинам в основании сооружения.



Интенсивность размыва грунта определяют по выносу его частиц в отстойник 9 и по осадке грунта, регистрируемой индикаторами 10.

Данный способ был успешно применен при проведении описываемых ниже экспериментальных исследований фильтрационной прочности суглинистого ядра Нурекской плотины. В качестве образца трещиноватой скальной породы в первых опытах был выбран цементно-песчаный камень, который по своим

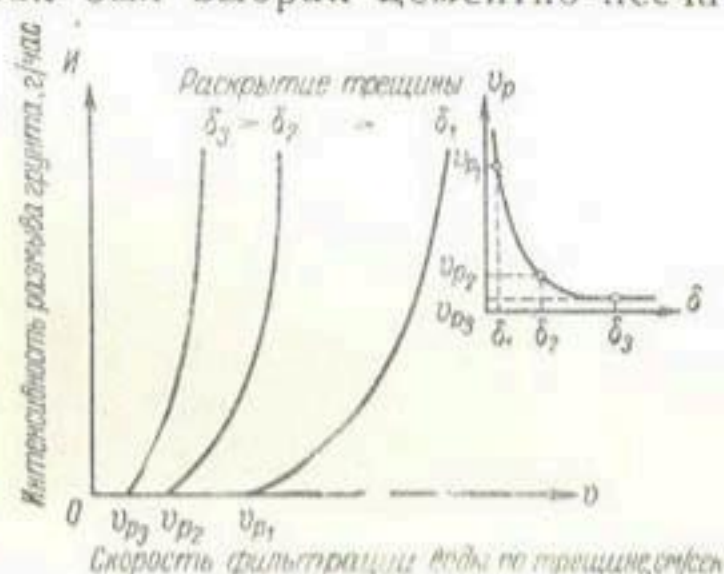


Рис. 30. Схематическая последовательность определения зависимости между размывающей скоростью потока в трещине и величиной ее раскрытия.

физико-механическим свойствам, и прежде всего по характеру шероховатости поверхности излома, почти полностью совпадает с песчаником в основании плотины<sup>1</sup>. Позднее уже использовался образец, выпиленный из нурекского песчаника.

После того как образец из цементно-песчаного камня, имеющий размеры  $186 \times 120 \times 60$  мм, приобретал достаточную прочность (около  $0,3 \div 0,5 R_{пр}$ ), в нем создавалась продольная трещина путем раскалывания с помощью гид-

равлического пресса, в котором образец помещался между двумя трехгранными стальными призмами, расположенными в направлении трещины.

В большинстве опытов испытывался суглинок с естественной комковатой структурой и начальной влажностью, близкой к оптимальной ( $16 \div 18\%$ ). После уплотнения в приборе нагрузкой интенсивностью от 10 до  $30 \text{ кг/см}^2$  (соответствующей, примерно, тем давлениям, какие будут в ядре Нурекской плотины на глубине от 50 до 150 м), суглинок замачивался со стороны трещины<sup>2</sup>. Затем через трещину, при выбранном ее раскрытии, пропускался поток воды с постепенно увеличивающейся скоростью. В это же время с помощью пьезометров определялось изменение напора в направлении движения потока, а с помощью индикаторов фиксировалась осадка слоя суглинка. Обычно, после достижения некоторого значения скорости, начинался размыв (эрозия) суглинка, частицы которого

<sup>1</sup> Исходный состав цементно-песчаной смеси был следующим: портландский цемент марки „300“ — 1 часть; кварцевый песок крупностью  $0,1-0,5 \text{ мм}$  — 3 части; водоцементное отношение  $B/C=0,5$ .

<sup>2</sup> Чтобы избежать разрушения суглинка вследствие его размокания во время замачивания, начальное раскрытие трещины устанавливалось не более  $1 \text{ мм}$  или, при большем раскрытии, верхняя часть трещины уплотнялась тампоном, который извлекался после окончания замачивания.



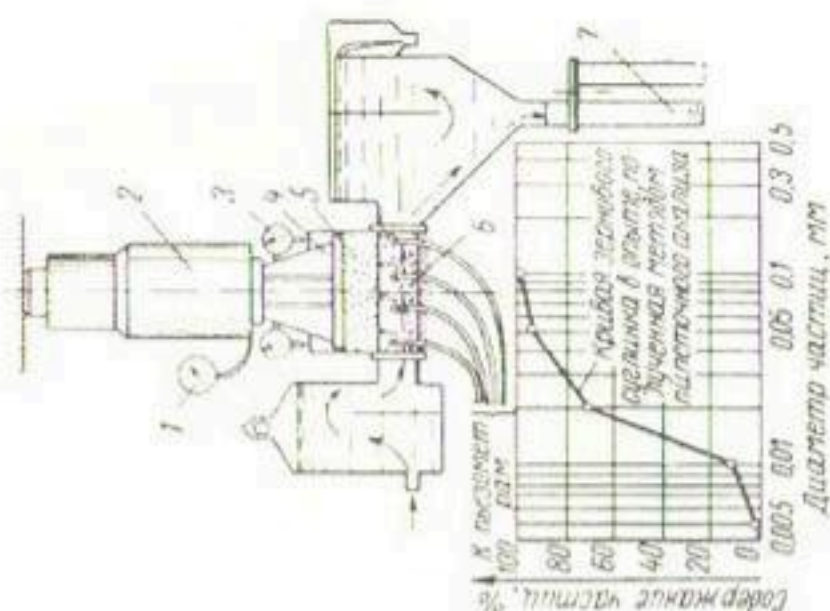
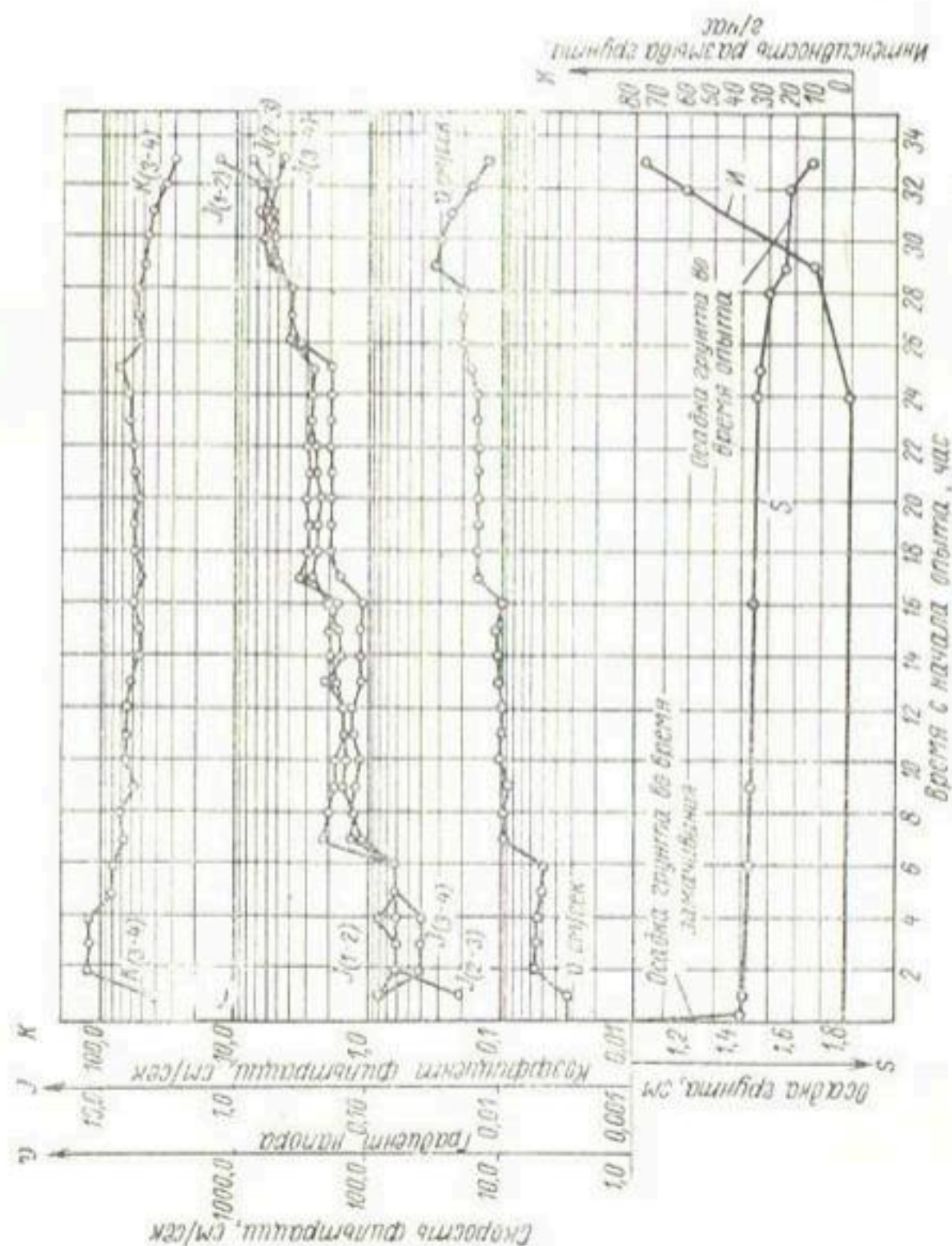


Рис. 31. Графики изменения фильтрационно-суффозионных характеристик при контактом размые суглинка по трещине в образце из песчано-цементного камня

1—манометр; 2—домкрат; 3—индикатор; 4—поршень; 5—дессовый суглинок; 6—образец из песчано-цементного камня с продольной щелью  $b = 2$  мм; 7—песколовка;  $\gamma_{с.н} = 1,886$  г/см<sup>3</sup>;  $W_n = 15,69\%$ ;  $W_k = 18,5\%$ .









при этом выносились потоком в отстойник и там улавливались в пескосборнике. Интенсивность размыва  $I$  определялась, как отношение весового количества уловленных частиц к отрезку времени, в течение которого, при постоянной скорости потока  $v$ , был присоединен к отстойнику пескосборник.

В результате дальнейшего повышения напора, устанавливалась зависимость интенсивности размыва суглинка от скорости потока в трещине с раскрытием, равным  $\delta$ . Таким образом, изменяя в опытах величину  $\delta$ , можно получить графики указанной зависимости  $I = f(v)$  для различных  $\delta = \text{const}$ . В каждом из этих графиков точка пересечения кривой нарастания интенсивности с осью скоростей определяет величину скорости  $v_p$ , соответствующей началу размыва суглинка по трещине с заданным раскрытием  $\delta$ . Используя найденные таким путем значения  $v_p$ , можно затем получить зависимость между размывающей скоростью и раскрытием трещины  $v_p = f(\delta)$ , которая и будет являться характеристикой сопротивляемости суглинка ядра плотины размыву по трещинам в основании (рис. 30).

Заметим, что когда суглинок находится в приборе под постоянным обжатием внешним давлением, объективным критерием интенсивности его размыва может также служить график уменьшения толщины слоя суглинка, получаемый в результате регистрации осадки поршня.

В качестве примера на рис. 31 и 32 показаны графики изменения фильтрационно-суффозионных характеристик процессов размыва суглинка в двух из девятнадцати опытов, проводившихся в соответствии с разработанной нами методикой. В одном из этих опытов (рис. 31) размыв суглинка производился по трещине с раскрытием  $\delta = 2$  мм в образце из песчано-цементного камня, а в другом (рис. 32)—по трещине с тем же раскрытием, но имеющей гладкие стенки, выполненные из органического стекла. Из рассмотрения графиков совершенно отчетливо можно видеть, при каких скоростях и градиентах фильтрации воды в трещинах происходил размыв суглинка. Так, в данных опытах размыв начался, когда скорость движения воды по трещине с шероховатыми стенками достигла 15 см/сек, а по трещине с гладкими стенками — 22 см/сек. Дальнейшее постепенное увеличение скорости вызывало нарастание интенсивности размыва суглинка, на основании чего, в соответствии с описанной методикой, были определены величины размывающих скоростей при различных раскрытиях трещин с шероховатыми и гладкими стенками. Значения размывающих скоростей, вместе с другими гидравлическими характеристиками, приведены в табл. 11.

Следует обратить внимание на то, что при известной скорости фильтрации все остальные характеристики могут быть полу-



Гидравлические характеристики фильтрационного потока в трещинах, соответствующие началу размыва суглинка (при  $\sigma \geq 15 \text{ кг/см}^2$ )

| Раскрытие трещины $\delta$ , см    | Размывающая скорость фильтрации $v_p$ , см/сек | Число Рейнольдса $Re = \frac{v\delta}{\nu}$ | Коэффициент сопротивления $f = \frac{g\delta}{v^2} l$ | Градиент фильтрации $I_p$ | Режим фильтрации |
|------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|------------------|
| 1. Трещины с шероховатыми стенками |                                                |                                             |                                                       |                           |                  |
| 0,05                               | 90                                             | 225                                         | 0,38                                                  | 63                        | Турбулентный     |
| 0,1                                | 28,5                                           | 143                                         | 0,26                                                  | 2,14                      | "                |
| 0,2                                | 13,5                                           | 135                                         | 0,15                                                  | 0,14                      | "                |
| 0,3                                | 5,5                                            | 82                                          | 0,21                                                  | 0,022                     | "                |
| 2. Трещины с гладкими стенками     |                                                |                                             |                                                       |                           |                  |
| 0,05                               | 150                                            | 374                                         | 0,018                                                 | 8,37                      | Турбулентный     |
| 0,1                                | 58                                             | 290                                         | 0,023                                                 | 0,79                      | "                |
| 0,2                                | 20,8                                           | 208                                         | 0,031                                                 | 0,068                     | "                |
| 0,3                                | 10                                             | 150                                         | 0,041                                                 | 0,014                     | "                |

чены с помощью графиков (рис. 33 и 34), выражающих основные закономерности движения воды в одиночных трещинах. Эти закономерности установлены в результате обширных гидравлических исследований, проводившихся одновременно с изучением размыва суглинка.

Найденное таким путем соотношение между размывающим (критическим) градиентом фильтрации и раскрытием трещины —  $I_p = f(\delta)$  — графически изображено на рис. 35. Из рассмотрения рисунка видно, что по мере уменьшения раскрытия до значения  $2 \div 1 \text{ мм}$  величина градиента нарастает сравнительно медленно, а затем, при дальнейшем уменьшении раскрытия, происходит резкий подъем кривой зависимости  $I_p = f(\delta)$ . Таким образом, эта зависимость дает ясное представление о том, какие трещины в основании плотины потенциально опасны с точки зрения возможного размыва ядра. Так, исходя из оценки градиентов обходной фильтрации, не превышающих значений, равных  $2 \div 3$ , следует считать допустимыми трещины в основании с раскрытиями  $\delta < 1 \text{ мм}$ . Нетрудно заметить, что для трещин с раскрытиями  $\delta > 1 \text{ мм}$  размывающие скорости примерно на порядок меньше тех же скоростей в открытых руслах [28], в чем обнаруживается некоторое сходство условий размыва по трещинам и порам в зернистых материалах (см. § 12). В этих случаях величины размывающих скоростей оказываются одного порядка (несколько см/сек) <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Согласно установленным зависимостям (см. графики на рис. 33 и 34), размыв суглинка потоком в трещинах с шероховатыми стенками также начинается при возникновении турбулизации потока.



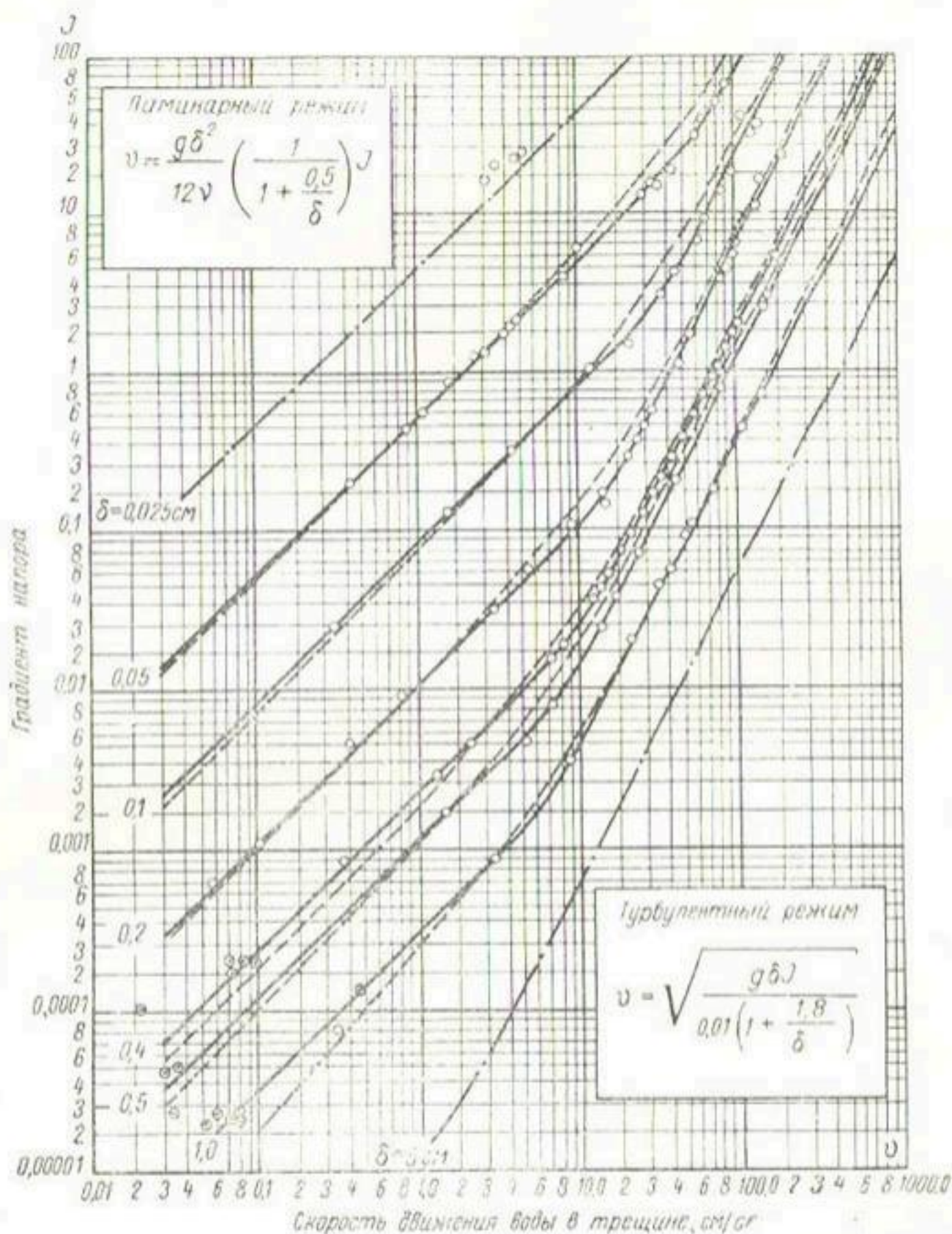


Рис. 33. Графики зависимостей между скоростями и градиентами фильтрации воды в трещинах с шероховатыми стенками (образец из песчано-цементного камня).



Во время проведения исследований удалось заметить любопытное явление, заключающееся в том, что при снижении интенсивности внешней нагрузки, начиная примерно с  $15 \text{ кг/см}^2$ , устойчивый размыв суглинка наблюдался при значительно больших скоростях фильтрации, иногда превышавших 100

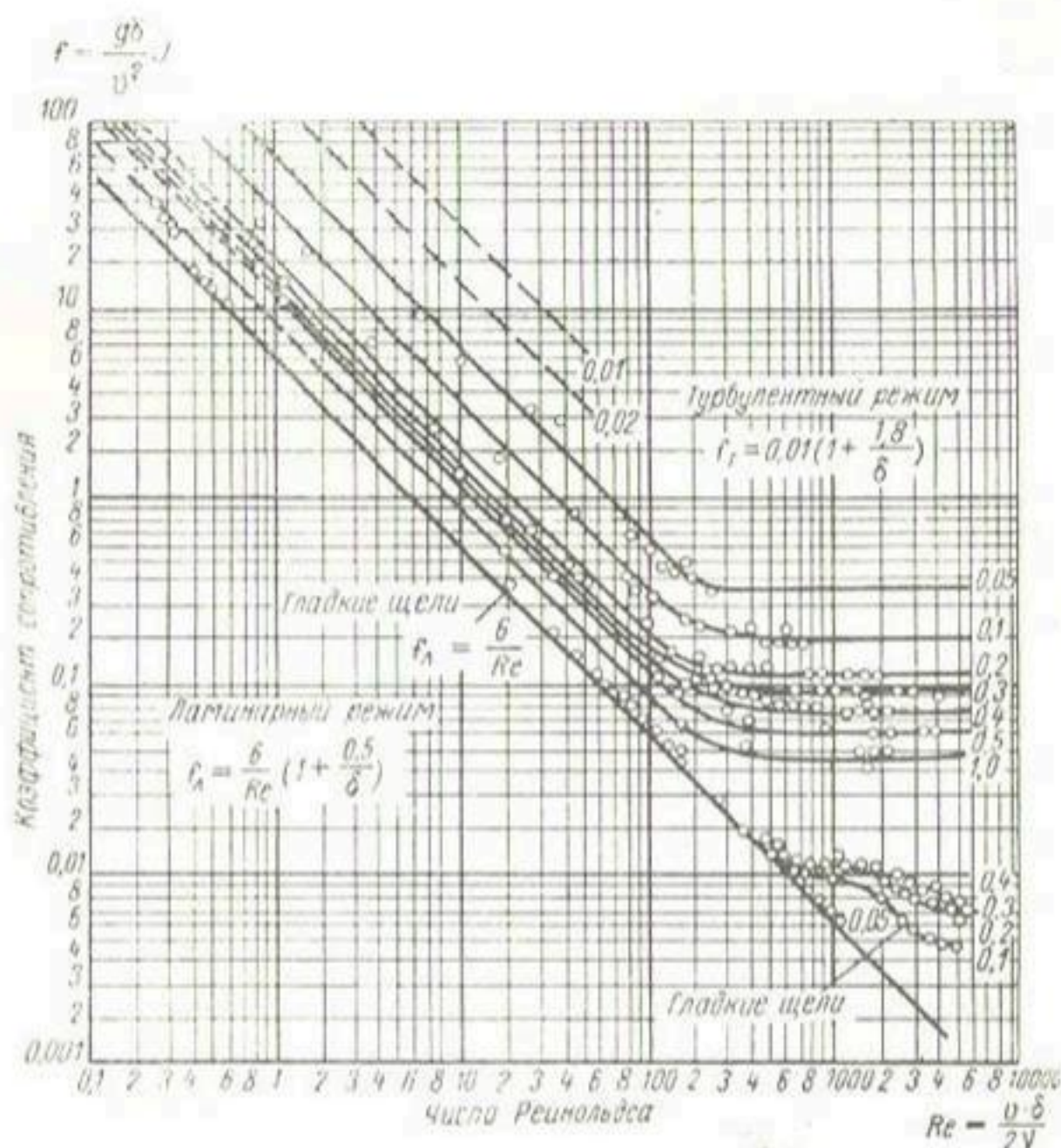


Рис. 34. Графики зависимостей  $f$  от  $Re$ , полученные в результате экспериментального изучения закономерностей фильтрации воды в трещинах.

200 см/сек. Это подтверждается приведенными в табл. 12 результатами опытов № 165—168, а также результатами ранее выполненных опытов (табл. 13), в которых уплотнение суглинка производилось трамбованием, а размыв осуществлялся потоком в трещине с гладкими стенками и раскрытием 1,5 мм.

Как оказалось, повышение размывающей скорости в данных случаях происходит вследствие образования над трещиной продольной каверны с устойчивым сводиком, выдерживающим относительно небольшое внешнее давление. По мере увеличе-



ния поперечного сечения каверны, скорость течения воды в ней быстро затухает, так как поступление и отток воды ограничены пропускной способностью трещины, начальная половина длины которой является „контуром питания“, а другая — „контуром стока“. Одновременно с этим уменьшается интенсивность пульсаций, существенно снижающих сопротивляемость суглинка размыву. Опытами также было установлено, что в случае образования каверны размывающая скорость потока в трещине (но не градиент!) зависит от объемного веса и начальной влажности суглинка. Последнее обстоятельство отражает упомянутую выше закономерность [36], согласно которой сопротивление грунта размыву пропорционально его сцеплению.

В результате анализа выполненных исследований приходим к выводу, что фильтрационная прочность каменно-земляной плотины, ядро или экран которой возведены из однородных мелкозернистых грунтов, оказывается недостаточной при сохранении или последующем возникновении в основании крупных открытых трещин, так как по этим трещинам может происходить размыв (эрозия) грунта. В этом отношении обычные каменно-земляные плотины имеют весьма существенный конструктивный недостаток, устранение которого с помощью известных способов часто приводит к значительному увеличению стоимости сооружения.

Указанный недостаток может быть устранен за счет укладки в месте примыкания плотины к основанию защитного (переходного) слоя из естественной или искусственной разнородной грунтовой смеси, получаемой путем перемешивания грунта с гравийными добавками. Защитное свойство такого слоя состоит в том, что контактный размыв грунтовой смеси обходным фильтрационным потоком, например по открытой трещине в основании, очень быстро прекращается вследствие самопроизвольного образования в месте размыва „обратного фильтра“ из относительно крупных частиц, которые не могут быть смыты потоком благодаря их геометрической непроходимости через трещину.

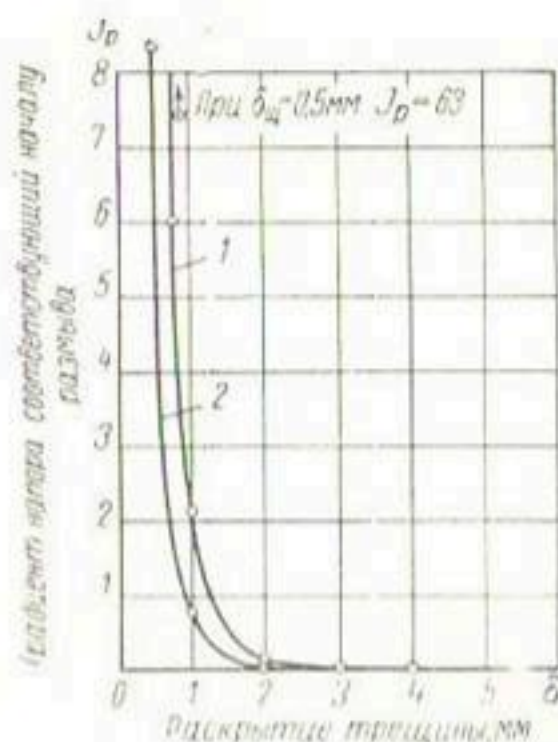


Рис. 35. График изменения градиента напора, соответствующего началу размыва суглинка, в зависимости от раскрытия трещины (по данным опытов, воспроизводивших условия размыва при давлении на суглинок свыше  $15 \text{ кг/см}^2$ )

1 — трещина с шероховатыми стенками;  
2 — трещина с гладкими стенками.

приводит к значительному



Результаты опытов по определению сопротивляемости уплотненного трамбованием суглинка размыву по трещине с гладкими стенками, при отсутствии внешнего давления

| № опыта | Объемный вес суглинка $\gamma_{с.н.}$<br>$г/см^3$ | Начальная влажность суглинка $W_{н.}$<br>% | Раскрытие трещины $\delta$ ,<br>см               | Скорость фильтрации при устойчивом размыве $v_p$ ,<br>см/сек | Градиент напора $I_p$ |
|---------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 119     | 1,70                                              | 20                                         | 0,3                                              | 161                                                          | 0,4                   |
| 120     | 1,67                                              | 20                                         | 0,15                                             | 200                                                          | 1,5                   |
| 121     | 1,75                                              | 21                                         | 0,15                                             | 283                                                          | 0,7                   |
| 123     | 1,85                                              | 19                                         | 0,15                                             | 288                                                          | 1,8                   |
| 124     | 1,76                                              | 18                                         | 0,15                                             | 111                                                          | 0,5                   |
| 125     | 1,83                                              | 19                                         | 0,15                                             | 234                                                          | 1,5                   |
| 126     | 1,84                                              | 17                                         | 0,15                                             | 350                                                          | 3,8                   |
| 127     | 1,62                                              | 18                                         | 0,15                                             | 76                                                           | 1,0                   |
| 128     | 1,65                                              | 17                                         | 0,15                                             | 102                                                          | 0,6                   |
| 129     | 1,53                                              | 10                                         | Во время замачивания образец суглинка разрушился |                                                              |                       |
| 130     | 1,58                                              | 11                                         | 0,15                                             | <70                                                          | <0,7                  |
| 131     | 1,58                                              | 10                                         | 0,15                                             | <16                                                          | <0,1                  |
| 132     | 1,78                                              | 18                                         | 0,15                                             | 151                                                          | 0,9                   |
| 133     | 1,57                                              | 10                                         | 0,15                                             | 28                                                           | 0,1                   |
| 134     | 1,78                                              | 25                                         | 0,15                                             | 393                                                          | 4,4                   |
| 135     | 1,58                                              | 25                                         | 0,15                                             | 240                                                          | 1,7                   |
| 137     | 1,50                                              | 26                                         | 0,15                                             | 174                                                          | 1,1                   |
| 138     | 1,50                                              | 18                                         | 0,15                                             | 114                                                          | 0,64                  |
| 139     | 1,25                                              | 10                                         | 0,15                                             | 20                                                           | 0,08                  |
| 140     | 1,64                                              | 10                                         | 0,15                                             | 49                                                           | 0,14                  |
| 141     | 1,34                                              | 17                                         | 0,15                                             | 50                                                           | 0,14                  |
| 142     | 1,81                                              | 11                                         | 0,15                                             | 103                                                          | 0,4                   |
| 143     | 1,58                                              | 18                                         | 0,45                                             | 56                                                           | 0,1                   |

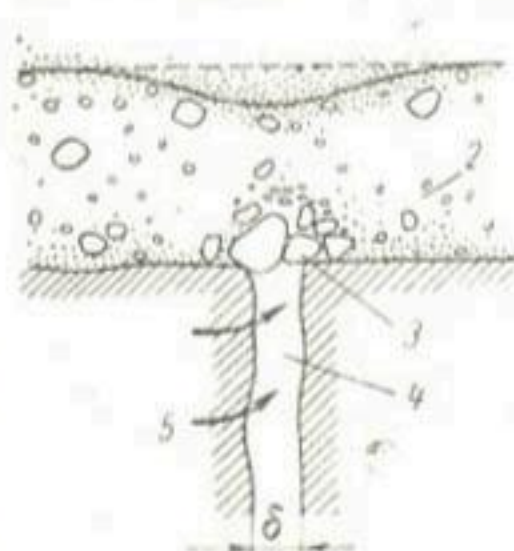


Рис. 36. Схема образования фильтра в устье открытой с поверхности трещины в основании

1—грунт тела плотный; 2—защитный слой из разнозернистой грунтовой смеси; 3—«обратный фильтр» из крупных гранулированных частиц; 4—открытая с поверхности трещина в скальном массиве основания; 5—поток обходной фильтрации по трещине.

На рис. 36 представлена схема образования фильтра, полностью экранирующего сооружение от дальнейшего воздействия на него потока обходной фильтрации.

Высокая эффективность и надежность защиты плотины от размыва с помощью предлагаемого конструктивного элемента подтверждена результатами экспериментов, проводившихся с целью изучения явлений контактного размыва глинистых грунтов потоком воды в трещине с раскрытиями от 0,5 до 3 мм при градиентах напора в 5—10 раз превышавших средние градиенты обходной фильтрации, которые обычно наблюдаются в натурных условиях.



На рис. 37 показаны графики изменения фильтрационно-суффозионных характеристик в одном из опытов по изучению контактного размыва щебенистого суглинка по трещине с раскрытиями от 1 до 3 мм. Из совместного рассмотрения этих графиков видно, что размыв грунта в трещине с раскрытием 2 мм начался при скорости фильтрации около 25 см/сек, а затем полностью прекратился, несмотря на постепенное возрастание скорости фильтрации до 100 см/сек. При увеличенном до 3 мм раскрытии трещины вновь начавшийся при скорости около 30 см/сек размыв грунта также быстро закончился, хотя скорость фильтрации к концу опыта достигла 100 см/сек. Обусловленная размывом максимальная осадка грунта оказалась при этом равной 0,7 см. Подобные опыты, в которых испытывались глинистые грунты, содержащие гравийно-щебенистые включения, наглядно показали высокую эффективность и надежность предлагаемого способа защиты от размыва грунтовых водоупорных элементов плотин. В результате этих опытов также было установлено, что вполне надежный фильтр, предохраняющий защитный слой от дальнейшего размыва по открытым трещинам с раскрытиями  $\delta \leq 5$  мм, достаточно быстро образуется, если в грунтовой смеси содержится не менее 10% одинаково распределенных по крупности гравийных включений, среди которых должны быть частицы с размерами, превышающими  $\delta$ . Также необходимо, чтобы процентное содержание этих частиц численно было бы не ниже четырех—пятикратной величины  $\delta$ , выраженной в миллиметрах, а минимальный размер гравийных частиц не должен превышать 2—3 мм (исходя из условия недопустимости размыва по контакту с фильтром).

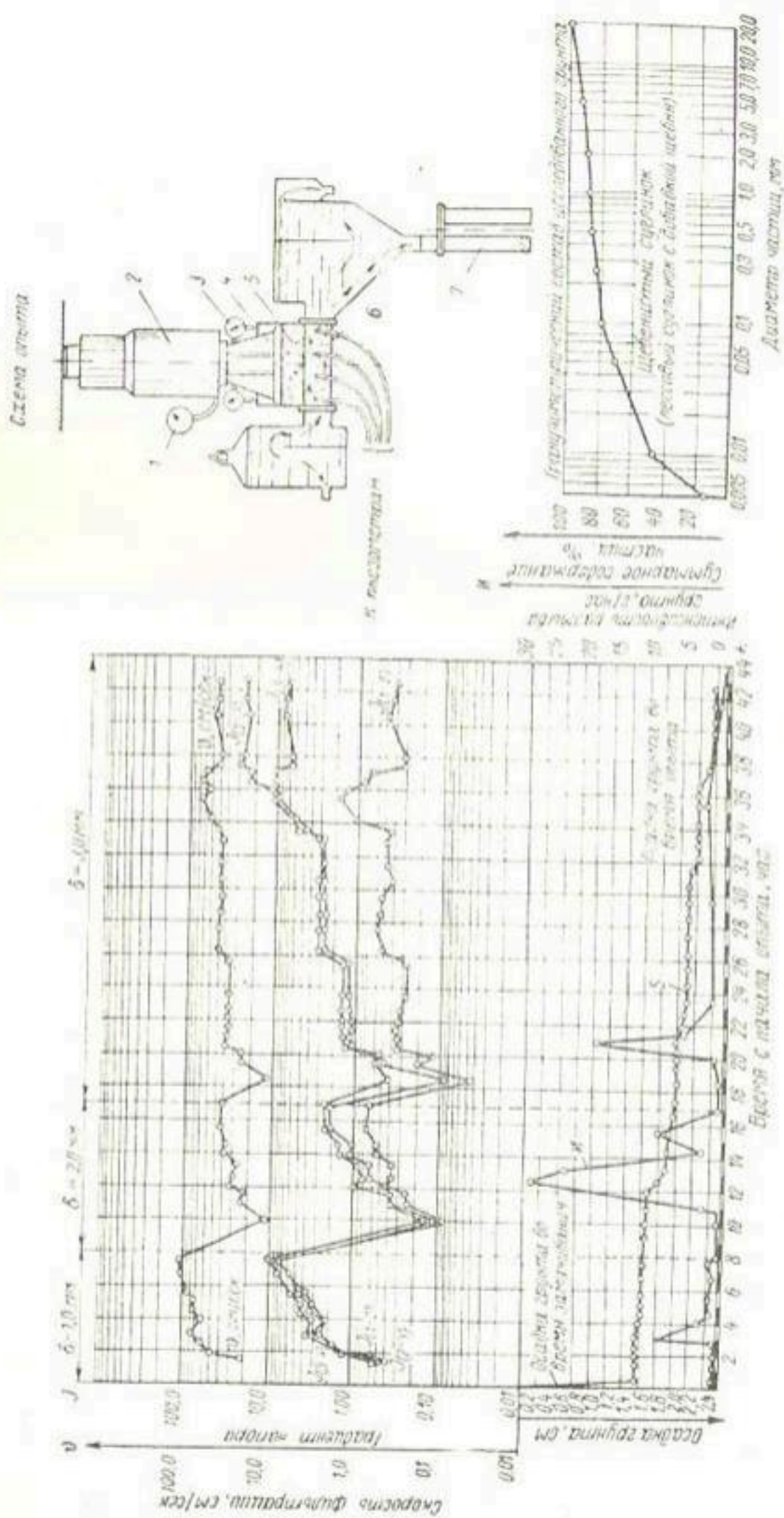
Обобщая результаты рассмотренных экспериментальных исследований, в которых воспроизводились различные условия воздействия на ядро плотины потока по трещинам в основании, можно прийти к следующим выводам.

А. Ядро плотины выполнено однородным из лессовидного суглинка.

1. Для данного варианта характерно различие процессов возможного размыва ядра в сопряжении его с основанием в зависимости от интенсивности внешней нагрузки (давления), обуславливающей „прижатие“ ядра к поверхности основания. Так, при давлении свыше  $15 \text{ кг/см}^2$  оказывается невозможным образование над трещиной сводиков и размыв суглинка, как правило, происходит при скоростях фильтрации в 5—10 раз меньших, чем в том случае, когда в процессе размыва образуются сводики и возникают каверны.

2. В первом случае, при давлении в суглинке ядра свыше  $15 \text{ кг/см}^2$ , допустимыми с точки зрения отсутствия его размыва следует считать выходящие на поверхность основания трещины с раскрытиями, не превышающими одного миллиметра,







причем потенциально опасными являются трещины с раскрытиями свыше 1 мм, имеющие при этом значительную (несколько десятков метров) протяженность и выходящие в нижний бьеф.

Во втором случае, при давлении меньше  $15 \text{ кг/см}^2$ , допустимыми являются аналогичные трещины, но с раскрытиями до трех миллиметров.

Б. Ядро плотины выполнено разнородным, с устройством защитного слоя из супесчано-щебенистого грунта.

3. Конструктивным приемом, предотвращающим возможность размыва ядра плотины фильтрационным потоком в открытых трещинах основания, является устройство защитного слоя из разнозернистой грунтовой смеси, например супесчано-щебенистого грунта. Поверхностный размыв такого грунта очень быстро прекращается вследствие самопроизвольной закупорки устьев трещин относительно крупными частицами, которые содержатся в смеси и не могут быть смыты потоком благодаря их геометрической непроходимости через трещину. В связи с этим образующийся в местах размыва защитного слоя „обратный фильтр“ полностью экранирует сооружение от дальнейшего воздействия на него потока обходной фильтрации. Толщина защитного слоя должна назначаться в пределах 2—3 м.

Очевидно, в этом случае может отпасть необходимость в устройстве площадной цементации основания по всей поверхности примыкания к нему ядра плотины, так как уплотнению должны подвергаться лишь те зоны, в которых имеются трещины с раскрытиями свыше 5 мм.

4. Вполне надежный „фильтр“, предохраняющий защитный слой от размыва по трещинам с раскрытиями  $\delta < 5 \text{ мм}$ , достаточно быстро образуется, если в грунтовой смеси имеются одинаково распределенные по крупности гравийные (щебенистые) включения, процентное содержание которых численно должно быть не ниже 4—5-кратной величины  $\delta$ , выраженной в миллиметрах, и среди них также должны быть частицы с размерами от 2—3 мм до  $2\delta$ .

Здесь минимальный размер частиц, равный 2—3 мм, назначается, исходя из условия недопустимости размыва по контакту с образующимся слоем фильтра.

В заключение остановимся на одном весьма интересном и заслуживающем внимания обстоятельстве, выясненном при дальнейшем широком изучении рассматриваемого в данном параграфе вопроса. Как показали опыты, размыв суглинистых грунтов всегда происходит только при турбулентном режиме фильтрации по трещинам. В связи с этим „критический“ градиент напора  $I_{кр}$ , при котором возникает турбулизация потока



в трещинах, может быть определен по следующей установленной опытами зависимости

$$I_{кр} = \exp \left( \frac{16,1}{6\sqrt{\delta_0}} - 23 \right), \quad (45)$$

где  $\delta_0$  — величина раскрытия трещины, отнесенная к 1 см.

Для трещин с раскрытием  $\delta > 0,1$  см эта зависимость с достаточной точностью выражается более простой формулой

$$I_{кр} = \frac{0,001}{\delta_0^2}. \quad (45')$$

## Глава третья

### О НЕКОТОРЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ВЫБОРУ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ (ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ) КАМЕННО-ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

#### § 15. Об устойчивости материала обратного фильтра при продольном размыве

Необходимость проверки фильтрационной устойчивости переходного слоя при продольном размыве на контакте с боковыми призмами плотины обусловлена тем, что во время строительства или эксплуатации плотины переходной слой подвергается размывающему воздействию потока воды, стекающего вдоль его поверхности. В первом случае поток возникает, когда отсыпaeмый в боковые призмы каменный материал, с целью более плотной его укладки, интенсивно поливается водой, во втором случае этот поток появляется вследствие фильтрации в берегах, в обход сооружения. Расходы воды, стекающей по склонам ущелья, оказываются иногда достаточно большими, что подтверждает необходимость проверки фильтрационной устойчивости переходного слоя, защищающего ядро плотины, при продольном размыве.

Скорость движения потока на поверхности переходного слоя зависит от крупности каменного материала боковых призм плотины и градиента напора, равного  $\sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона поверхности слоя к горизонту. Так как каменный материал боковых призм обычно выбирается достаточно крупнозернистым, скорость потока оказывается весьма большой, порядка десятков сантиметров и даже метров в секунду. Вследствие этого продольный поток имеет значительную размывающую способность.

Все те требования, которые предъявляются к материалу переходного слоя, чаще всего вынуждают подбирать его состав из мелкозернистых песчано-гравелистых фракций, которые



легко могут быть смыты потоком через поры боковых призм плотины, что приведет к нарушению сплошности переходного слоя (обратного фильтра). Однако при наличии в материале фильтра некоторого количества крупных фракций, способных удерживаться в порах призм, размыв будет быстро уменьшаться во времени и по достижении определенной глубины прекратится совсем. Указанное уменьшение размыва происходит вследствие постепенного образования вдоль поверхности контакта „защитного слоя“, состоящего из относительно крупных частиц. Таким образом, чтобы размыв фильтра не превзошел допустимых пределов, можно пойти по пути увеличения содержания в нем крупных фракций, способных удерживаться в порах призм.

В том случае, когда известен гранулометрический состав материалов фильтра и призм (кривые I и II на рис. 38), нетрудно установить максимальный диаметр  $d_p$  частиц фильтра, которые могут быть вынесены потоком через поры призм (если, кроме того, известна скорость потока, определяемая исходя из величины фильтрационного градиента  $I = \sin \alpha$ ).

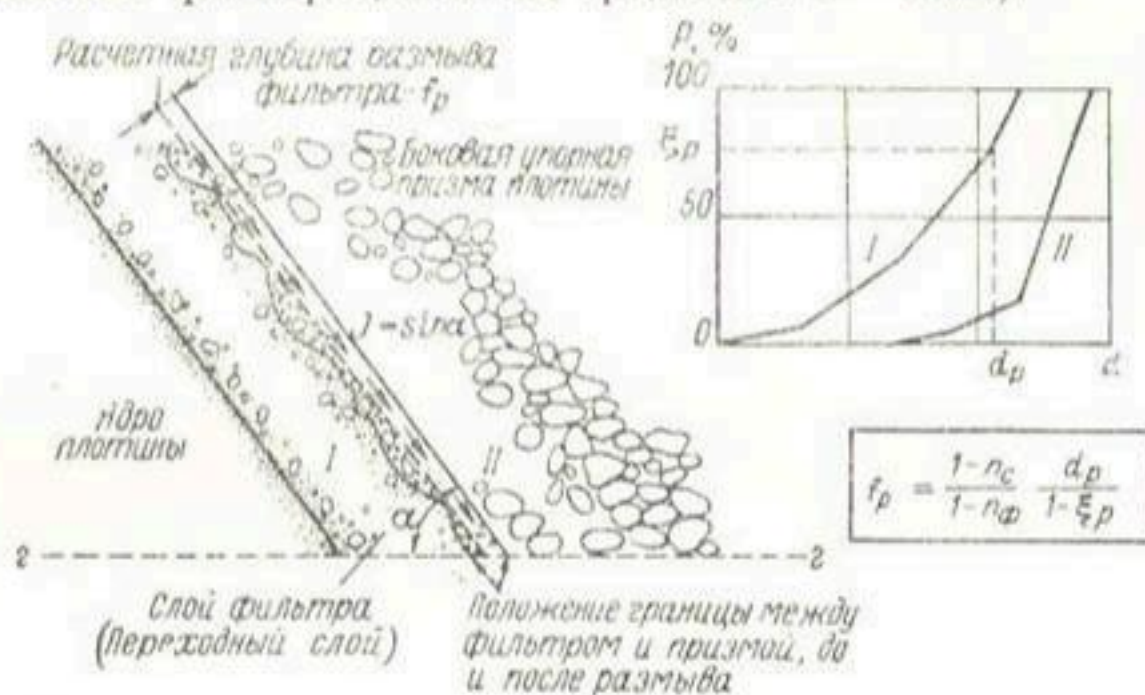


Рис. 38. Схема поверхностного размыва обратного фильтра вдоль контакта с боковой призмой плотины.

В результате опытов [23], проводившихся с искусственно отсеянными песками, были получены соотношения между диаметром пор (отверстий)  $D_0$  и диаметром частиц  $d$ , при которых просыпания песка через эти поры не наблюдалось. Это соотношение равно в среднем 3,76. Оно оказалось действительным и в условиях нисходящего фильтрационного потока при градиентах напора около 2—3. Как известно, при рыхлой укладке шаровых частиц однородного грунта диаметр его пор  $D_0 = D/2,42$ , в связи с чем „непросыпаемость“ более мелкого грунта сквозь крупный будет иметь место, если диаметры  $d$  и  $D$  частиц смежных слоев однородных грунтов будут связаны



соотношением  $D/d \leq 2,42 \times 3,76 \approx 9$ , или  $D_0/d = 3,7$ . Согласно исследованиям А. Н. Патрашева и Г. Х. Праведного [27] критерием „непросыпаемости“ является в два раза меньшая величина отношения  $D_0/d = 1,8$ , исходя из которой получаем  $D/d = 2,42 \times 1,8 = 4,35$ . Кроме того, в работе [27] отмечается более важное для рассматриваемого случая обстоятельство, а именно, что перемещение частиц внутри пор рыхло уложенного однородного грунта возможно при условии, если максимальный диаметр частиц в 1,3 раза меньше диаметра пор, т. е. при  $D/d_{\text{макс}} \geq 2,42 \times 1,3 = 3,14$ .

Весьма существенное различие между указанными величинами отношений  $D/d$ , соответствующих „непросыпаемости“ и „непроходимости“ частиц внутри пор, заставило нас обратиться к постановке серии опытов с целью определения минимальной величины отношения  $D/d$ , при которой, в условиях нисходящего фильтрационного потока, не происходит перемещения частиц внутри пор грунта. В результате этих опытов, проводившихся с однородным рыхло уложенным галечниковым грунтом крупностью 20–30; 40–50 и 50–70 мм, было установлено, что частицы гравия диаметром  $d \geq 0,20D$  задерживаются в порах галечникового грунта. Считая диаметр пор однородного грунта  $D_0 = D/2,4$ , получаем условие непроходимости для одиночных движущихся в порах грунта частиц диаметром

$$d_p \geq 0,5D_0. \quad (46)$$

Для оценки интересующей нас средней глубины размыва фильтра необходимо также определить диаметр частиц „защитного слоя“, образование которого предотвращает дальнейший размыв<sup>1</sup>. При этом следует иметь в виду, что защита фильтра от последующего размыва обеспечивается с момента образования монослоя из одного ряда частиц диаметром  $> d_p$ . Суммарный вес этих частиц на единице площади монослоя будет равен

$$P_m = \gamma_m d_p = \Delta (1 - n_m) d_p,$$

где  $\gamma_m$  — объемный вес материала монослоя;

$\Delta$  — объемный вес материала частиц в плотном теле (удельный вес частиц);

$n_m$  — пористость монослоя.

Обозначив через  $\xi$  относительную величину суммарного весового содержания в материале фильтра частиц с размерами  $< d_p$  (рис. 38), можем написать отношение

<sup>1</sup> В данном случае средняя глубина размыва принимается равной среднему расстоянию установившейся границы размыва от первоначальной поверхности контакта между обратным фильтром и переходным слоем (рис. 38).



$$1 - \xi_p = \frac{P_m}{P_\phi} = \frac{1 - n_m d_p}{1 - n_\phi f_p},$$

где  $n_\phi$  — пористость материала фильтра;  
 $P_\phi$  — вес материала фильтра в объеме, равном произведению средней глубины размыва  $f_p$  (которой соответствует образование монослоя) на единицу поверхности контакта между фильтром и боковой призмой, т. е.

$$P_\phi = \delta (1 - n_\phi) f_p.$$

Из этого отношения видно, что средняя глубина размыва

$$f_p = \frac{1 - n_m}{1 - n_\phi} \frac{d_p}{1 - \xi_p}. \quad (47)$$

Для разнотернистого материала фильтра можно принять (с достаточной для практических расчетов точностью)

$$n_m = 0,3 \div 0,4 \quad \text{и} \quad n_\phi = 0,2;$$

тогда

$$f_p \approx 0,8 \frac{d_p}{1 - \xi_p}. \quad (48)$$

Справедливость приведенных выше рассуждений, так же как и полученных на их основе формул (47) и (48), легко проверить с помощью эксперимента. С этой целью были поставлены опыты, в которых осуществлялся контактный размыв песчано-гравийных грунтов, намеченных к использованию в качестве материала фильтра для Нурекской плотины. Опыты проводились в фильтрационном лотке, имеющем размеры  $60 \times 30 \times 20$  см. В нижней части лотка (примерно  $2/3$  его высоты) укладывался исследуемый песчано-гравийный грунт а поверх него — однородный галечник крупностью до 40—50 мм. Лоток закрывался крышкой и ставился в положение, при котором плоскость контакта между грунтами оказывалась наклоненной к горизонту под углом около  $60-70^\circ$ <sup>1</sup>. Затем через слой галечника, вдоль поверхности контакта, в течение длительного времени пропускался поток воды, производивший размыв слоя фильтра. В ходе всего опыта велось визуальное наблюдение за процессом размыва. При этом было замечено, что интенсивный смыв мелких частиц происходил в первые несколько минут с момента начала опыта (пуска воды через слой галечника). По прошествии некоторого времени размыв прекращался совсем вследствие образования „защитного слоя“ в зоне поверхности контакта. В табл. 14 приведены данные,

<sup>1</sup> Заметим, что угол наклона граней ядра Нурекской плотины равен  $76^\circ$



характеризующие гранулометрический состав грунтов, которые были использованы в качестве материалов фильтра и призмы.

Во всех опытах наблюдалось весьма характерное очертание границы между защитным слоем и призмой в виде сильно изломанной линии, что обусловлено неравномерным распределением фракций песчано-галечникового грунта в пределах относительно малых его объемов. Получаемая в результате опытов глубина размыва фильтра определялась по суммарной осадке верхнего галечникового слоя после окончания опыта при горизонтальном положении лотка.

Кроме опытов в лотке были проведены аналогичные опыты в вертикальном фильтрационно-суффозионном приборе диаметром 30 см.

Отличие этих опытов от предыдущих заключалось в том, что поверхность контакта между фильтром и призмой (слоем галечника) была вертикальной. Данные по всем опытам, а также соответствующие расчетные глубины размыва приведены в табл. 14. Из сопоставления расчетных величин с фактическими видно, что с помощью формулы (48) можно достаточно точно оценить глубину поверхностного размыва фильтра.

Определим по формуле (48) расчетную глубину размыва песчано-гравийного грунта, рекомендованного нами в качестве материала фильтра Нурекской плотины (см. табл. 14, данные по опытам № 201, 202, 203 и 205). При отсыпке боковых призм плотины из карьерного галечника, имеющего размеры частиц  $D_{50} = 50$  мм,  $D_{\max} = 400$  мм и пористость  $n = 0,25$ , средний диаметр его пор по В. Н. Кондратьеву [22] будет равен 3,3 мм. Тогда, следуя приведенному выше порядку расчета, находим диаметр частиц фильтра  $d_p = D_n/2 = 1,7$  мм и соответствующую этому диаметру величину  $\xi_p = 0,38$ . Подставляя значения  $d_p$  и  $\xi_p$  в формулу (48), определяем среднюю глубину поверхностного размыва фильтра указанного состава:  $f_p = 0,2$  см.

Выполненные расчеты для случая, когда призма плотины отсыпана из более крупного каменного материала ( $D_{50} = 110$  мм), показали, что возможная глубина размыва песчано-гравийного фильтра также оказывается небольшой — около 5 см при  $d_{\max} = 20$  мм и 1,4 см — при  $d_{\max} = 40$  мм.

Таким образом, с точки зрения устойчивости при поверхностном размыве, наиболее подходящими в качестве материала фильтра являются разнотернистые песчано-гравийные грунты.

Как показали дополнительные экспериментальные исследования, глубина поверхностного размыва разнотернистых связ-

ных грунтов, при одном и том же отношении  $\frac{d_p}{1 - \xi_p}$ , оказывается в несколько (3–5) раз большей. Объясняется это наличием сцепления между частицами грунта, существенно изменяющего условия размыва. В данных случаях размыв про-



| №<br>опы-<br>та | Материал обратного фильтра,<br>(диаметры частиц, мм) |          |          |          |            | Материал<br>призмы             |          | Угол на-<br>клона<br>плоско-<br>сти кон-<br>такта к<br>горизон-<br>ту, град | Величина<br>удельно-<br>го расхо-<br>да воды<br>на кон-<br>такте,<br>см <sup>2</sup> /сек | Средняя<br>глубина<br>размыва<br>фильтра<br>в опыте<br>$f$ , см | Расчет-<br>ный диа-<br>метр ча-<br>стиц<br>фильтра<br>$D_0$<br>$d_p = \frac{D_0}{2}$ ,<br>мм | Относи-<br>тельное<br>содержа-<br>ние в<br>фильтре<br>частиц<br>диамет-<br>ром $< d_p$ ,<br>$\xi_p$ | Расчет-<br>ная глу-<br>бина раз-<br>мыва<br>фильтра<br>(по фор-<br>муле) $f_p$ ,<br>см |
|-----------------|------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------------|--------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                 | $d_{10}$                                             | $d_{17}$ | $d_{40}$ | $d_{60}$ | $d_{\max}$ | $\eta = \frac{d_{40}}{d_{10}}$ | $D_{50}$ | $D_0$                                                                       |                                                                                           |                                                                 |                                                                                              |                                                                                                     |                                                                                        |

I. Результаты экспериментальных исследований устойчивости песчано-гравийного материала обратного фильтра при поверхностном размыве

|     |       |      |      |    |    |    |     |    |      |     |     |      |     |
|-----|-------|------|------|----|----|----|-----|----|------|-----|-----|------|-----|
| 201 | 0,25  | 0,09 | 11   | 40 | 44 | 35 | 9,1 | 52 | 8,6  | 0,8 | 4,6 | 0,44 | 0,7 |
| 202 | 0,25  | 0,09 | 11   | 40 | 44 | 35 | 9,1 | 52 | 9,6  | 1   | 4,6 | 0,44 | 0,7 |
| 203 | 0,25  | 0,09 | 11   | 40 | 44 | 35 | 9,1 | 52 | 10   | 1   | 4,6 | 0,44 | 0,7 |
| 204 | 0,065 | 0,09 | 1,25 | 20 | 19 | 50 | 15  | 60 | 7,2  | 2,5 | 7,5 | 0,86 | 4,3 |
| 205 | 0,25  | 0,5  | 11   | 40 | 44 | 50 | 15  | 70 | 12   | 1,7 | 7,5 | 0,53 | 1,3 |
| 206 | 0,065 | 0,09 | 1,25 | 20 | 19 | 50 | 15  | 70 | 12   | 3   | 7,5 | 0,86 | 4,3 |
| 207 | 0,065 | 0,09 | 1,25 | 20 | 19 | 50 | 15  | 70 | 19   | 4   | 7,5 | 0,86 | 4,3 |
| 208 | 0,065 | 0,09 | 1,25 | 20 | 19 | 17 | 6   | 90 | 41,5 | 0,8 | 3   | 0,73 | 0,9 |

II. Результаты экспериментов по изучению контактного поверхностного размыва суглинисто-щебеночного грунта

|     |       |       |      |    |      |    |     |         |      |      |      |      |      |
|-----|-------|-------|------|----|------|----|-----|---------|------|------|------|------|------|
| 209 | 0,007 | 0,008 | 0,15 | 30 | 21,4 | 11 | 4,6 | Потолок | 16,8 | 2,60 | 2,3  | 0,78 | 0,84 |
| 210 | 0,007 | 0,008 | 0,15 | 30 | 21,4 | 6  | 2,5 | Потолок | 19,5 | 1,26 | 1,25 | 0,75 | 0,40 |
| 211 | 0,007 | 0,008 | 0,15 | 30 | 21,4 | 4  | 1,7 | Потолок | 22,7 | 0,78 | 0,85 | 0,73 | 0,25 |



исходит особенно интенсивно в тех местах, где возникают каверны, завихряющие поток, вследствие чего затрудняется образование защитного слоя.

Например, в результате так называемого „потолочного размыва“ грунтовых смесей, аналогичных по своему составу щебенистому суглинку Сафедобского месторождения (Нурекский гидроузел), было установлено (см. часть II табл. 14), что глубина размыва во всех опытах ровно в три раза превышала расчетную, вычисленную по формуле (48). Следовательно, для оценки глубины поверхностного размыва связных грунтов по формуле (48) в нее необходимо вводить множитель, численно равный  $3 \div 5$ .

## § 16. Об устойчивости материала обратного фильтра к разделению по фракциям (сегрегации)

В последнее время довольно явственно наметилась тенденция к использованию в качестве материала обратных фильтров карьерных грунтов с высокими коэффициентами разнотерности. Это дает существенную экономию времени и средств при строительстве сооружения, поскольку такие грунты заменяют искусственно приготовленный дорогостоящий щебень или гравий. Примером сооружения, в котором обратный фильтр (переходный слой) выполнен из разнотерных карьерных грунтов, является земляная русловая плотина Плявиньского гидроузла высотой 45 м [37].

В ней переходный слой служит для сопряжения ядра, намытого из мелкозернистых песков, с низовой упорной призмой, отсыпанной из галечниково-валунных грунтов, зерновой состав которых характеризуется кривыми 5 и 6 на графике рис. 39; состав карьерных песчано-гравийных грунтов переходного слоя плотины характеризуется кривыми 1—4. Как видно, коэффициент разнотерности этих песчано-гравийных грунтов примерно равен 50. Предварительные исследования и анализ результатов наблюдений за положением депрессионной поверхности в теле плотины показали, что переходный слой, выполненный из разнотерного грунта, обеспечивает надежную защиту ядра от размыва фильтрационным потоком.

В предыдущем параграфе отмечалось, что разнотерные грунты обладают чрезвычайно ценным свойством — высокой устойчивостью по отношению к поверхностному размыву. Вместе с тем эти грунты имеют также отрицательное свойство — способность деления на фракции. Такое деление часто называют сегрегацией. Среди факторов, обуславливающих сегрегацию, прежде всего следует отметить высокую разнотерность, неодинаковые весовые соотношения между



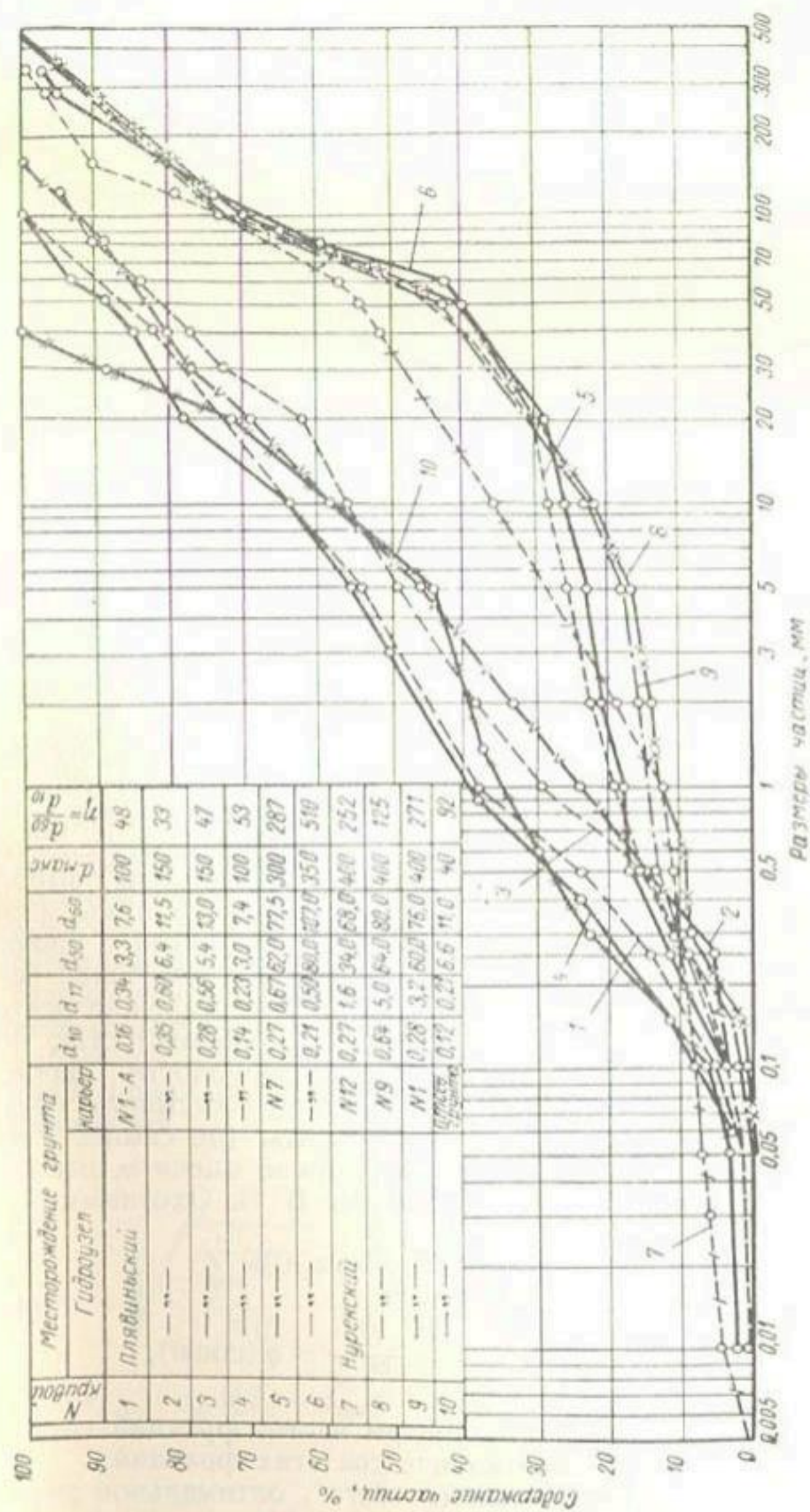


Рис. 39. Интегральные кривые механического состава разнозернистых карьерных грунтов.



отдельными фракциями, затем способы разработки грунтов в карьере, транспортировки и укладки их в сооружение. Вследствие сегрегации могут резко ухудшиться строительные качества грунта, так как при этом снижается его объемный вес, уменьшается фильтрационная прочность и повышается водопроницаемость.

В качестве иллюстрации к сказанному рассмотрим пример, характеризующий устойчивость двух различных грунтов по отношению к сегрегации. Выше упоминалось, что при возведении русловой плотины Плявиньского гидроузла использовались грунты (рис. 39) с коэффициентами разнотерности около 50 (карьер № 1-а) и 300—500 (карьер № 7). До начала разработки в карьере и после укладки грунтов в сооружение определялась их водопроницаемость методами налива в шурфы (по Болдыреву) и откачек и наливов в скважины. Затем, путем сравнения коэффициентов фильтрации, полученных в том и другом случаях (т. е. в карьере и сооружении), устанавливалось наличие сегрегации грунтов. Оказывалось, что при отсыпке автосамосвалами грунта из карьера № 1-а сегрегация практически отсутствовала, так как средние значения коэффициентов фильтрации грунта в карьере и уложенного в сооружение оказались одинаковыми и равными 10 м/сут (при одинаковом объемном весе около 2,1 г/см³). В то же время, грунт из карьера № 7 претерпевал при отсыпке заметную сегрегацию, вследствие которой его коэффициент фильтрации после укладки в сооружение увеличился в восемь раз, соответственно, с 10 до 83 м/сут. Наблюдения, проводившиеся при строительстве ряда плотин [38], а также специальные исследования, выполненные для обоснования проекта Асуанской плотины [39], показали, что при отсыпке разнотерного грунта с бровки откоса неизбежно происходит его сегрегация, тем более резкая, чем больше высота откоса. Это явление, прежде всего, объясняется неодинаковой относительной шероховатостью поверхности откоса для частиц различной крупности. Данное обстоятельство указывает на необходимость отсыпать грунт слоями, сбрасывая его с небольшой высоты (не выше 2 м).

Устойчивость грунта к сегрегации можно оценить, используя следующие критерии, предложенные В. В. Охотиным:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_3}{d_4} = \dots = \frac{d_n}{d_{n-1}} < 0,5 \\ \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \dots = \frac{P_n}{P_{n-1}} = q (\text{const}), \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

где  $d_1, d_2, \dots, d_n$  — средние диаметры частиц фракций грунта;  
 $P_1, P_2, \dots, P_n$  — весовые количества этих фракций;  
 $q$  — „коэффициент сбегания“, оптимальное значение которого равно 0,81.



Согласно выполненным расчетам грунты карьера № 1-а Плявиньского гидроузла (см. кривые 1—4 на рис. 39) имеют среднее значение „коэффициента сбега“, равное 0,82. Следовательно, эти грунты должны быть устойчивыми к сегрегации, что подтвердилось наблюдениями за их отсыпкой во время строительства плотины и результатами последующих фильтрационных испытаний. Вместе с тем интересно отметить, что столь же устойчивой к сегрегации оказалась песчано-гравийная смесь (см. кривую 10 на рис. 39), полученная путем рассева Нурекского карьерного галечника. При опытной отсыпке с автосамосвалов этой весьма разнотернистой смеси, имеющей коэффициент разнотернистости около 100, также не было замечено разделения фракций.

Таким образом, основным условием устойчивости разнотернистого грунта к сегрегации является одинаковое весовое соотношение между отдельными его фракциями, удовлетворяющее критериям (49). Однако, как показывает имеющийся опыт отсыпки таких грунтов, коэффициент их разнотернистости не должен превышать 100. Следует особо подчеркнуть, что при выполнении условий (49) одновременно удовлетворяются требования в отношении несупфозионности грунта, зерновой состав которого в этом случае также оказывается оптимальным.

Интересно в заключение отметить, что справедливость критериев В. В. Охотина в целом была подтверждена обширными исследованиями уплотняемости каменного материала, выполненными за последнее время в ВОДГЕО Н. П. Лушновым [40]. Как оказалось, многофракционные смеси каменного материала с достаточно широким непрерывным диапазоном изменения крупности фракций и одинаковым содержанием их по весу, обеспечивают наибольшую плотность укладки и обладают сравнительно высокой устойчивостью против сегрегации в процессе отсыпки смеси. Н. П. Лушнову удалось установить, что наибольшая плотность и, по-видимому, устойчивость к сегрегации, может быть достигнута при минимальном значении коэффициента

$$r = e^{-\lambda \frac{x^2}{\sigma}}, \quad (50)$$

где  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{\text{ср}})^2}{n(n-1)}}$  — средняя квадратичная ошибка дисперсии зернового состава смеси;  
 $n$  — число фракций в смеси;

$x^2 = (d_{\text{макс}} - d_{\text{ср}})(d_{\text{ср}} - d_{\text{мин}})$  — величина, характеризующая зерновой состав смеси в заданном диапазоне крупности от  $d_{\text{мин}}$  до  $d_{\text{макс}}$ ;  
 $\lambda$  — постоянный эмпирический коэффициент.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Рейфман, Опытная выбросовка лессовых грунтов для ядра высоконапорных земляных плотин, „Гидротехническое строительство“, 1964, № 8.
2. С. В. Астапов, Строение почвенных агрегатов, „Вестник с.-х. науки, мелиорации и гидротехники“, вып. 2, М., 1940.
3. С. Н. Рыжов, К определению порозности почвенных агрегатов, Труды ВНИИ удобрений, агротехники и агропочвоведения, вып. 18, 1937.
4. В. А. Добровольский, Изучение свойств лессовидных грунтов, Сб. „Строительство на лессовидных суглинках“, Стройиздат, М., 1936.
5. С. И. Мигин, В. М. Жукова, Увлажнение при уплотнении глинистых грунтов, „Гидротехническое строительство“, 1954, № 6.
6. Н. Я. Денисов, Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве, Госэнергоиздат, 1956.
7. С. М. Кривовяз, Уплотнение грунта в целях борьбы с фильтрацией из каналов, „Гидротехника и мелиорация“, 1953, № 3.
8. М. Н. Гольдштейн, Механические свойства грунтов, Стройиздат, 1952.
9. К. Терцаги, Строительная механика грунтов на основе их физических свойств, ОНТИ, 1933.
10. С. А. Роза, Результаты экспериментального изучения начального градиента в плотных глинах, Сборник трудов ВНИИГС, № 4, 1953.
11. А. И. Чураков, Фильтрация воды в глинистых грунтах, Сборник трудов МИСИ им. Куйбышева, № 24, 1958.
12. Б. В. Дерягин, Е. Обухов, Аномальные свойства тонких слоев жидкости, Коллоидный журнал, т. 1, вып. 5, 1935.
13. А. Надаи, Пластичность и разрушение твердых тел, Изд-во иностр. лит., 1954.
14. Б. В. Дерягин и М. М. Кусаков, Современные методы исследования физико-химических свойств почвы, Известия АН СССР, т. 4, вып. 3, 1948.
15. В. Н. Жиленков, К вопросу о начальном градиенте напора при фильтрации воды в бетоне, „Известия ВНИИГ“, т. 76, 1964.
16. Olsen Harald W., Darcys law in Kaolinite, „Trans. Amer. Geophys. Union“, 1965, 46, № 1.
17. М. Ю. Абелев, Некоторые особенности фильтрационных свойств сильносжимаемых глинистых грунтов, Сб. докладов по гидротехнике, вып. 5, Госэнергоиздат, 1963.
18. С. А. Роза, Осадки гидротехнических сооружений на глинах с малой влажностью, „Гидротехническое строительство“, 1950, № 9.
19. А. М. Васильев, Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов, Госстройиздат, 1953.
20. Adrian Donald Dean, Capillary—pressure-induced cavity formation during infiltration, „Trans. Amer. Geophys. Union“, 1965, 46, № 1.
21. В. Н. Жиленков, Об определении капиллярного давления воды в бетоне, „Инженерно-физический журнал“, т. 5, 12, 1962.



22. В. Н. Кондратьев, Фильтрация и механическая суффозия в несвязных грунтах, Крымиздат, 1958.
23. Р. Н. Давиденков, О проектировании некоторых элементов земляных плотин, „Известия ВНИИГ“, т. 27, 1940.
24. Г. Я. Булатов, Прочность глины на контакте с фильтром, Научно-информ. бюллетень ЛПИ № 6, Гидротехника, 1961.
25. А. К. Джитенов, Фильтрационная прочность супесчаных грунтов на контакте с материалом фильтра, Труды ВОДГЕО, вып. 6, 1964.
26. Н. А. Цытович, Определение сил сцепления связных грунтов по методу шариковой пробы, Доклады АН СССР, III, № 5, 1956.
27. А. Н. Патрашев, Г. Х. Праведный, Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений, „Энергия“, 1964.
28. Ц. Е. Мирцхулава, Размывающие и допускаемые (неразмывающие) скорости течения воды для связных грунтов, Труды ГрузНИИГиМа вып. 21, 1960.
29. Г. С. Селезнев, Классификация сейсмических деформаций плотин из местных материалов, „Инженерная сейсмология“, № 3-4, Душанбе—Ленинакан, 1965.
30. Ambraseys N. N., On the seismic Behaviour of Earth Dams, Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, Japan, 1960.
31. Д. М. Тартаковский, И. М. Васильев, К вопросу определения прочности земляных плотин по неравномерным деформациям, „Гидротехническое строительство“, 1966, № 8.
32. Tordal Mundal, „Rockfill dams: Brownle Gloping Core Dam“, Proc. Amer. I. C. E., Journal of Power Div., vol. 84, № PO4, 1958.
33. В. С. Истоминна, В. В. Буренкова, К вопросу о методе подбора материала переходных зон в плотинах из крупнообломочных материалов с ядром, Труды ВОДГЕО, вып. 11, 1965.
34. В. И. Аравин, С. Н. Нумеров, Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений, Госстройиздат, 1955.
35. Laursen E. M., The application of Sediment Transport Mechanics of Stable channel Design, J. of Hydraulics Div. ASCE, vol. 82, 1956.
36. Ц. Е. Мирцхулава, О зависимости сопротивления размыву связных грунтов от сцепления, Доклады АН СССР, 124, № 1, 1959.
37. В. Н. Жиленков, Исследования по подбору обратных фильтров дренажей русловой плотины Плявиньской ГЭС, Аннотации законченных в 1964 г. научно-исследовательских работ по гидротехнике, „Энергия“, 1965.
38. М. М. Гришин, О плотинах из крупнообломочных грунтов, Сб. трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева, № 46, 1964.
39. В. Н. Жиленков, О замыве песком наброски из несортированного камня при пионерной отсыпке его в воду, Сб. докладов по гидротехнике, вып. 4, Госэнергоиздат, 1962.
40. Н. П. Лушинов, Контроль зернового состава каменного материала каменно-набросных и каменно-земляных плотин, Труды ВОДГЕО, вып. 11 1965.



## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                               | Стр.       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Предисловие . . . . .                                                                                                                                                         | 3          |
| <b>Глава I. Исследование фильтрационных свойств суглинка . .</b>                                                                                                              | <b>5</b>   |
| § 1. Некоторые физико-механические характеристики суглинка . .                                                                                                                | 6          |
| § 2. Характерные особенности изучения фильтрационных свойств<br>связных грунтов . . . . .                                                                                     | 7          |
| § 3. Конструкции экспериментальных установок для изучения филь-<br>трационных свойств грунтов . . . . .                                                                       | 9          |
| § 4. Методика экспериментальных исследований водопроницаемости<br>лессового суглинка . . . . .                                                                                | 19         |
| § 5. Результаты исследований фильтрационных свойств лессового су-<br>глинка . . . . .                                                                                         | 23         |
| § 6. Расчетный метод определения водопроницаемости суглинка . .                                                                                                               | 32         |
| § 7. Результаты исследований начального градиента напора при<br>фильтрации воды в суглинке . . . . .                                                                          | 33         |
| <b>Глава II. Изучение сопротивляемости суглинка воздействию<br/>    фильтрационного потока . . . . .</b>                                                                      | <b>38</b>  |
| § 8. Изучение устойчивости суглинка при замачивании . . . . .                                                                                                                 | 39         |
| § 9. Определение капиллярного давления воды в суглинке . . . .                                                                                                                | 42         |
| § 10. Определение условий возникновения контактного выпора су-<br>глинка . . . . .                                                                                            | 45         |
| § 11. Определение сцепления суглинка методом поверхностной пе-<br>нетрации . . . . .                                                                                          | 53         |
| § 12. Сопротивляемость суглинка и некоторых других связных грун-<br>тов размыву продольным потоком в слое фильтра (контактный размыв)                                         | 56         |
| § 13. Экспериментальные исследования фильтрационной прочности<br>моделей ядра плотины при наличии в нем сквозных трещин . . . . .                                             | 66         |
| § 14. Изучение сопротивляемости суглинка контактному размыву<br>по трещинам в скальном основании плотины . . . . .                                                            | 84         |
| <b>Глава III. О некоторых дополнительных исследованиях<br/>    по выбору зернового состава обратных фильтров<br/>    (переходных слоев) каменно-земляных плотин . . . . .</b> | <b>102</b> |
| § 15. Об устойчивости обратного фильтра при продольном размыве                                                                                                                | 102        |
| § 16. Об устойчивости материала обратного фильтра к разделению<br>по фракциям (сегрегации) . . . . .                                                                          | 108        |
| <b>Л и т е р а т у р а . . . . .</b>                                                                                                                                          | <b>112</b> |