МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

РУКОВОДСТВО

ПО МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

П 28-74
ВНИИГ

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

РУКОВОДСТВО

ПО МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

П 28-74
ВНИИГ



«ЭНЕРГИЯ»
Ленинградское отделение
1975

УДК 624.131.65 : 626/627

Данное руководство является практическим пособием по определению характеристик, необходимых для оценки водопроницаемости и фильтрационной прочности скальных оснований гидротехнических сооружений, исключая определение характеристик устойчивости пород к выщелачиванию (химической суффозии).

Так как фильтрационная прочность скального массива почти целиком зависит от сопротивляемости размыву (суффозии) заполнителя находящихся в массиве трещин, карстовых пустот или глинистых прослоек, особое внимание в Руководстве уделено методам определения суффозионных свойств зернистых материалов для разных условий воздействия на них фильтрационного потока. В связи с этим рассмотрены некоторые рекомендации по расчету гидравлических характеристик потока воды в трещинах и материале зон тектонического дробления и перетирания вмещающих скальных пород.

Основой для составления Руководства послужили исследования и разработки, проводившиеся во ВНИИГе имени Б. Е. Веденеева с 1965 г. Вместе с тем широко использовались работы других организаций.

Руководство составлено заведующим лабораторией фильтрационных исследований ВНИИГа канд. техн. наук В. Н. Жиленковым и предназначено для научных сотрудников, изыскателей и инженеров, работа которых в области исследований и проектирования напорных гидротехнических сооружений связана с определением или прогнозированием фильтрационно-суффозионных свойств скальных грунтов.

Р 30314-185
051(01)-75

© Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ), 1975

ВВЕДЕНИЕ

Для правильного выбора конструкции и расположения противофильтрационных и дренажных устройств в основании напорного гидротехнического сооружения или, другими словами, для рационального проектирования его подземного контура, надо заранее знать исходные данные, характеризующие водопроницаемость и фильтрационную прочность основания. С этой целью предварительно выполняют исследования фильтрационно-суффозионных свойств грунтов, слагающих толщу основания сооружения. Такие исследования исключительно важны при проектировании высоких плотин, возводимых в сейсмически активных горных районах, где для регулирования неравномерного стока рек приходится создавать водохранилища большой емкости. Кроме того, за последнее время все более четко вырисовывается тенденция к использованию для возведения плотин створов с относительно неблагоприятными инженерно-геологическими условиями.

Эти обстоятельства вынуждают делать дополнительные затраты на осуществление мероприятий, снижающих интенсивность фильтрации под плотиной. Однако ситуация нередко осложняется тем, что необходимость в подобных мероприятиях не всегда может быть подтверждена соответствующим расчетом, так как для этого надо знать количественные характеристики водопроницаемости и фильтрационной прочности массива основания (например, предельно допустимую величину градиента напора).

На сегодня сравнительно легко и с достаточной точностью могут быть определены фильтрационно-суффозионные свойства зернистых (мягких) грунтов. Оценка же фильтрационно-суффозионных свойств скальных грунтов (хотя они чаще всего служат основаниями высоких плотин) вызывает большие затруднения в связи с отсутствием четко разработанной методики определения этих свойств. Например, закономерности движения воды в щелях с шероховатыми стенками в общем виде впервые были установлены Г. М. Ломизе и опубликованы в 1951 г. в его работе «Фильтрация в трещиноватых породах». К сожалению, практическое использование предложенных Г. М. Ломизе формул оказалось весьма затруднительным вследствие неопределенности входящей в эти формулы величины абсолютной шероховатости стенок трещин в скальном массиве.

Попытки найти более удобные для расчетов зависимости были предприняты лишь через полтора десятилетия после выхода в свет работы Г. М. Ломизе, когда возросшие темпы гидростроительства вновь заставили обратиться к разработке теоретических основ и практических способов определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных массивов.

Одним из наиболее важных вопросов при решении данной проблемы является вопрос о критериях суффозионной устойчивости заполнителя трещин и пустот в массиве, с чем также связан выбор методики испытаний массива на фильтрационную прочность.

Состояние проблемы и ее практическая значимость предопределили круг вопросов, решение которых было намечено в 1965 г. программой первоочередных исследований, выполнявшихся в фильтрационной лаборатории ВНИИГа им. Б. Е. Веденеева в течение последующих шести лет.

Главная цель этих исследований заключалась в разработке для проектировщиков, изыскателей и других специалистов в области гидротехнического строительства методического руководства — пособия по определению фильтрационно-суффозионных свойств скального грунта. Все предлагаемые в Руководстве для экспериментальных исследований установки и приборы сконструированы и изготовлены во ВНИИГе им. Б. Е. Веденеева. В работе так же широко использовались труды других организаций и отдельных лиц.

В частности, имеющиеся в данном Руководстве рекомендации по определению в натурных условиях водопроницаемости скальных массивов взяты из работы Н. Н. Веригина «Методы определения фильтрационных свойств горных пород». Однако Руководство в целом не претендует на исчерпывающую полноту, и в дальнейшем в него должны быть включены рекомендации по определению фильтрационной прочности многолетне-мерзлых скальных массивов и неустойчивых к химической суффозии (выщелачиванию) пород в основании сооружений.

В соответствии с упомянутыми выше задачами большое внимание при составлении Руководства уделялось расчетным и экспериментальным методам оценки суффозионной устойчивости заполнителя трещин, пустот и глинистых прослоек в скальных массивах. Вместе с тем в Руководство включены зависимости по определению характеристик фильтрационного потока в трещинах и в зернистом материале (заполнителе) зон тектонического дробления и перетирания скальных пород. Рекомендована формула для расчета водопроницаемости глинистых прослоек.

Таким образом, предлагаемое Руководство является развитием главы СНиП по проектированию оснований гидротехнических сооружений в части определения перечисленных в ней характеристик скальных оснований гидротехнических сооружений.

Министерство Энергетики и Электрификации СССР	РУКОВОДСТВО ПО МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	П 28-74 ВНИИГ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Область применения Руководства

1.1. Настоящим Руководством определяются исходные положения методики расчетов и исследований, связанных с оценкой фильтрационной прочности и водопроницаемости трещиноватых скальных оснований напорных гидротехнических сооружений, исключая расчеты устойчивости пород к химической суффозии (выщелачиванию).

1.2. В Руководстве даны рекомендации по определению водопроницаемости терригенного зернистого материала, заполняющего трещины, продуктов тектонического дробления вмещающих пород и глинистых прослоек.

1.3. Особое внимание в Руководстве уделено методам оценки суффозионных свойств зернистых материалов в различных условиях воздействия на них фильтрационного потока, поскольку фильтрационная прочность скального массива почти целиком определяется сопротивляемостью размыву (суффозии) заполнителя трещин или глинистых прослоек.

Некоторые понятия, определения и условные обозначения

1.4. Понятия и определения:

Грунтовая вода — вода, заполняющая пустоты (поры, трещины или каверны) в грунте.

Фильтрация — просачивание жидкости сквозь пустоты (поры) какого-либо тела, т. е. движение жидкости в пористом теле.

Внесено Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидротехники им. Б. Е. Веденеева	Утверждено ВНИИГом им. Б. Е. Веденеева № 24 от 30 декабря 1974 г. по согласованию с Главниипроектом Минэнерго СССР	Срок введения III квартал 1975 г.

Фильтрационный поток — поток фильтрующейся жидкости.

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

Действительная скорость фильтрации — средняя скорость движения жидкости в самих пустотах (порах) тела, вмещающего фильтрационный поток.

Ламинарная фильтрация — фильтрация, при которой потери напора фильтрующейся жидкости пропорциональны первой степени ее скорости.

Коэффициент фильтрации — коэффициент пропорциональности между скоростью ламинарной фильтрации жидкости в данном пористом теле и градиентом ее напора.

Расход фильтрации приведенный — расчетная величина расхода жидкости, фильтрующейся через данное пористое тело, коэффициент фильтрации которого условно принят равным единице.

Напор приведенный — напор в данной точке области фильтрации, отнесенный к общему напору. Величина безразмерная.

Линия тока — путь (траектория) частицы жидкости при установившемся ее движении; при неустановившемся движении — линия внутри потока, во всех точках которой векторы скорости течения в данный момент касательны к этой линии.

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

Поверхность равного напора — геометрическое место точек, в которых пьезометрический напор фильтрующейся жидкости одинаков.

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

Заполнитель трещины — материал, находящийся внутри трещины. Заполнитель чаще всего является продуктом тектонического дробления или перетирания, вмещающих трещины скальных пород. В некоторых случаях трещина заполняется материалом, приносимым поверхностными водами (терригенный заполнитель) или грунтовыми водами извне (иногда в виде раствора).

Мелкозем — совокупность содержащихся в грунте мелкозернистых фракций с размерами частиц меньше одного миллиметра.

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

Суффозия может сопровождаться выносом оторвавшихся частиц и агрегатов за пределы толщи грунта (скального массива) основания.

Контактный выпор — местное нарушение фильтрационной прочности грунта или заполнителя трещины, по своему характеру относящееся к механической суффозии, происходящее в виде выдавливания под действием фильтрационных сил отдельных масс грунта (заполнителя) в поры обратного фильтра, каверны или в полые трещины.

Контактный размыв — поверхностный размыв (эрозия) грунта или заполнителя трещины фильтрационным потоком, протекающим вдоль размываемой поверхности по более проницаемому пласту или слою в толще основания сооружения. Контактный размыв также является одним из видов механической суффозии.

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

Фильтрационная прочность грунта — способность грунта сопротивляться разрушающему воздействию фильтрационного потока, которое может иметь вид внутреннего размыва (внутренней суффозии), поверхностного размыва (эрозии) или выпора целых масс грунта.

Фильтрационную прочность грунта обычно характеризуют наибольшей, допустимой в данных условиях, интенсивностью фильтрационного потока (чаще всего градиентом напора или скоростью фильтрации), при которой не возникает сколь-либо опасных деформаций грунта, также резкого изменения его водопроницаемости.

Трещиноватость — совокупность трещин в массиве горных пород разных размеров и разного происхождения, обычно сообщающихся между собой.

Трещины — разрывы сплошности горной породы. По происхождению различают трещины: тектонические, отдельности, выветривания, гравитационные, напластования и т. п. По степени раскрытия выделяют трещины: закрытые и открытые. Встречаются трещины, которые целиком или частично заполнены твердым или рыхлым материалом различного минералогического состава.

Раскрытие трещины — расстояние между ее стенками в данном сечении, перпендикулярном направлению простирания трещины (что также справедливо для клиновидных трещин).

Оперяющие трещины — трещины, сопровождающие тектонические разрывные нарушения (сбросы) в скальном массиве. Располагаются по обе стороны от плоскости разрыва, примыкая к ней. Оперяющие трещины часто соприкасаются с рыхлыми продуктами тектонического разрушения скального массива, например, милонитовым заполнителем.

Трещины разгрузки — трещины, опоясывающие контур каньона, расположенные в наружном поясе скального массива, более или менее параллельно его свободной поверхности.

Мощность тектонической зоны — общая ширина полосы тектонически измененной раздробленной породы в массиве.

1.5. Общие классификации некоторых инженерно-геологических характеристик скальных оснований гидротехнических сооружений (по рекомендации СНиПа).

По сложению скальные основания рекомендуется делить на:

— массивные, крупноблочные, слабо расчлененные, плохо поддающиеся избирательному выветриванию;

— блочные, с четко выраженным расчленением массива на отдельности, ограниченные поверхностями ослабления;

— слоистые, с преобладающей одной системой трещин, анизотропные;

— плитчатые, сильно расчлененные.

По степени и характеру нарушений сплошности рекомендуется делить скальные массивы оснований на четыре группы:

Скальные массивы	Модуль трещиноватости (густота трещин)
Слаботрещиноватые	$<1{,}5$
Среднетрещиноватые	$1{,}5 \div 5$
Сильнотрещиноватые	$5 \div 30$
Весьма сильнотрещиноватые	>30

По своему характеру нарушения сплошности массива делятся на шесть категорий:

I. *Разломы первого порядка.* Мощность зоны дробления — сотни метров (иногда до 1 км и более), протяженность — десятки и сотни километров.

II. *Разломы второго порядка.* Мощность — десятки метров (до 100—200 *м*), протяженность — десятки и сотни километров.

III. *Разломы третьего и последующих порядков.* Мощность — метры и десятки метров, протяженность — сотни метров и километры.

IV. *Крупные трещины.* Раскрытие — десятки сантиметров, иногда до 1 *м* и более, протяженность — десятки и сотни метров.

V. *Трещины.* Раскрытие — от 0,5 *мм* до 1—2 *см,* протяженность — десятки метров.

VI. *Мелкие трещины.* Раскрытие — менее 0,5 *мм,* протяженность — метры и сантиметры.

По водопроницаемости скальные основания рекомендуется делить на:

— сильноводопроницаемые с удельным водопоглощением $q>10$ *л/мин·м* и коэффициентом фильтрации $k>10$ *м/сут*;

—водопроницаемые с $q=0{,}1 \div 10$ *л/мин·м* и $k=0{,}1 \div 10$ *м/сут.*;

— слабоводопроницаемые с $q = 0{,}01$—$0{,}1$ *л/мин·м* и $k = 0{,}01 \div 0{,}1$ *м/сут.*;

— практически водонепроницаемые с $q<0{,}01$ *л/мин·м* и $k<0{,}01$ *м/сут.*

1.6. Принятые буквенные обозначения.

A и B — гидравлические параметры шероховатости стенок трещины, имеющие размерность длины;

δ — раскрытие трещины;

g — ускорение свободного падения;

ν — кинематический коэффициент вязкости воды;

H, h — напор;

J — градиент напора;

H_0 — напор воды внутри скважины;

r_0 — радиус скважины;

R — радиус влияния (расстояние до контура разгрузки) скважины;

v — средняя скорость течения жидкости в трещине или скорость фильтрации;

v_0 — средняя скорость движения воды в порах грунта (заполнителя трещин);

$c=\frac{\delta^3}{12(1+A/\delta)}$ — проницаемость трещины;

$J_к$, $v_к$ — критические градиент напора и скорость фильтрации, при которых начинается турбулизация потока;

$v_р$, $v_{ор}$ — скорость фильтрации и скорость движения воды в порах грунта или материала обратного фильтра, при которой начинается контактный размыв;

$\gamma_в$ — удельный вес воды;

$P/\gamma_в$ — пьезометрический напор;

z — геометрический напор;

k — коэффициент фильтрации;

$\varkappa_1$ — коэффициент развития профиля поверхности стенки трещины, равный отношению длины профилограммы — линии перпендикулярного сечения стенки — к длине проекции профилограммы в плоскости сечения;

$\varkappa_2$ — коэффициент развития поверхности стенки трещины, который равен отношению площади шероховатой поверхности стенки к площади ее проекции на параллельную плоскость;

Γ_δ — параметр трещиноватости массива, характеризующий густоту трещин, численно равный количеству трещин с данным раскрытием δ, приходящемуся на единицу длины перпендикулярного к простиранию трещин сечения;

$q_r=\frac{Q}{TH_0}$ — величина удельного приведенного водопоглощения скважины;

$\eta_c=\frac{c_\sigma}{c_0}$ — относительное изменение проницаемости трещиноватого скального массива в результате действия

сжимающей нагрузки в направлении, перпендикулярном простиранию трещин;

σ — напряжение (интенсивность действующей нагрузки);

$E_п$ — модуль деформации скальной породы в монолите;

$E_с$ — модуль деформации скального массива;

δ_0 — величина начального раскрытия трещин в массиве при разгруженном его состоянии;

k_0 — коэффициент фильтрации ненагруженного массива;

d_i — диаметр частиц, соответствующий обеспеченности, равной i, по кривой зернового состава грунта;

d_0 — гидравлически эквивалентный диаметр пор, примерно равный осредненному поперечнику поровых каналов в местах их сужений;

$\eta_x=\frac{d_{60}}{d_{10}}$ — коэффициент разнозернистости (по Хазену);

$\eta_к$ — параметр неоднородности (по В. Н. Кондратьеву);

φ — поправочный коэффициент, учитывающий форму сечения порового канала;

$\Delta_м$ — удельный вес частиц мелкозернистых фракций ($d<1$ *мм*) грунта (заполнителя трещин);

$\Delta_к$ — удельный вес крупных частиц грунта (заполнителя);

γ — объемная масса сухого грунта;

n — пористость грунта в долях единицы;

$\varepsilon_м$ — коэффициент пористости мелкозема;

$\varepsilon_т$ — коэффициент пористости мелкозема на границе его текучести;

$W_п$ — число пластичности мелкозема;

$W_т$ — влажность мелкозема на границе его текучести;

$p_м$ — относительное весовое содержание частиц мелкозема в грунте (по кривой зернового состава);

$p_к$ — относительное весовое содержание крупных частиц в грунте.

2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ ПО ТРЕЩИНАМ. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ФИЛЬТРАЦИИ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ

Движение воды в трещинах с параллельными стенками

2.1. Зависимости между градиентом напора и средней скоростью движения воды (также любой ньютоновской жидкости) в трещине с параллельными стенками для ламинарного и турбулентного режимов фильтрации можно представить в виде:

$$v_л=\frac{g\delta^2}{12\nu(1+A/\delta)}J; \qquad (1)$$

$$v_т = 10\sqrt{\frac{g\delta}{1+\frac{B}{\delta}}J}, \qquad (2)$$

где входящие в знаменатели формул двучлены $1+\frac{A}{\delta}$ и $\sqrt{1+\frac{B}{\delta}}$ характеризуют влияние шероховатости стенок трещины и показывают, во сколько раз уменьшается в этой трещине скорость течения жидкости относительно скорости ее течения в щели с таким же раскрытием, но абсолютно гладкими стенками; влияние шероховатости стенок на проницаемость трещин заметно возрастает при $\delta<1$ *см*.

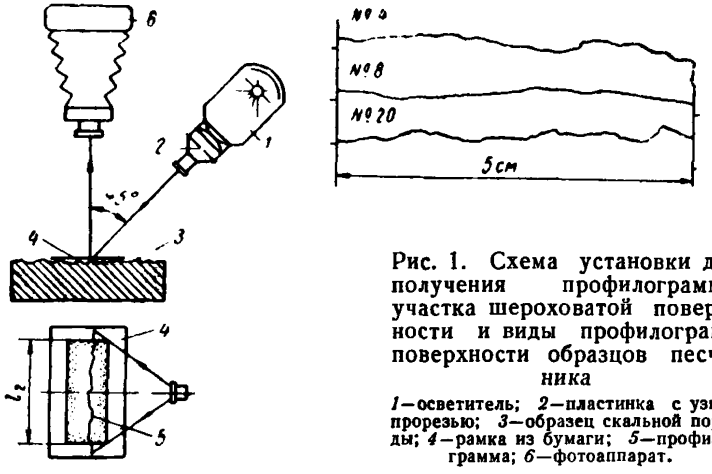


Рис. 1. Схема установки для получения профилограммы участка шероховатой поверхности и виды профилограмм поверхности образцов песчаника

1—осветитель; *2*—пластинка с узкой прорезью; *3*—образец скальной породы; *4*—рамка из бумаги; *5*—профилограмма; *6*—фотоаппарат.

2.2. В качестве характеристики шероховатости стенок трещины следует выбирать коэффициент развития их поверхности $\varkappa_2$. Этот коэффициент отражает физическую сущность взаимодействия жидкости со стенками вмещающей ее трещины и с его помощью наиболее отчетливо выявляется влияние шероховатости на проницаемость трещин.

2.3. Коэффициент $\varkappa_2=\varkappa_1^2$ можно определить путем обработки профилограмм сечений наиболее типичных участков поверхности стенок трещины. Обработка состоит в измерении длины l_1 профилограмм и вычислении значений коэффициента $\varkappa_1$ развития профиля на каждом участке длиной l_2, т. е. $\varkappa_1=l_1/l_2$, а также в измерении высоты и густоты макровыступов шероховатости В качестве примера эти данные для песчано-цементного камня, нурекского песчаника и бетона приведены в таблице Приложения *I*.

2.4. Для получения профилограммы предлагается метод «светового сечения» шероховатой поверхности. Суть этого метода становится ясной из рассмотрения рис. 1. В кадровый канал

осветителя, (удобнее всего взять обычный фотоувеличитель) закладывается пластинка с узкой прорезью (щелью) шириной 0,1—0,2 *мм*. Через эту щель проходит очень тонкий плоский пучок света — «световой нож», освещающий под углом в 45° шероховатую поверхность образца скальной породы вместе с лежащей на ней рамкой из бумаги, которая имеет строго определенную длину внутреннего выреза.[1] Образовавшуюся при таком освещении «профилограмму» фотографируют сверху фотоаппаратом и затем с полученных негативов делают увеличенные отпечатки. Масштаб профилограмм определяют по известному в натуре расстоянию l_2 между световыми «рисками» на рамке, которые также фиксируются на снимке.

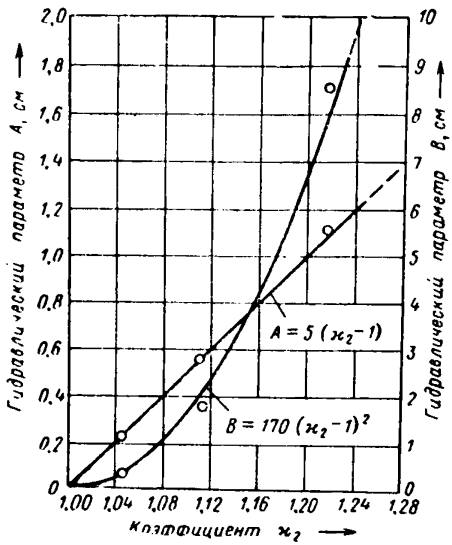


Рис. 2. Изменение гидравлических параметров шероховатости стенок трещины в зависимости от коэффициента развития их поверхности.

2.5 С увеличением коэффициента развития поверхности стенок $\varkappa_2$ гидравлические параметры шероховатости A и B возрастают (рис. 2).

Связь между этими параметрами и коэффициентом $\varkappa_2$ выражается эмпирическими формулами:

$$\left.\begin{aligned} A &= 5\,(\varkappa_2 - 1)\ см; \\ B &= 170\,(\varkappa_2 - 1)^2\ см, \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

откуда следует, что $B = 6{,}8\,A^2$.

В табл. 1 предложена классификация шероховатости стенок трещин, основанная на величине отношения проницаемости трещин с абсолютно гладкими и шероховатыми стенками.

2.6. При увеличении градиента напора сверх так называемого «критического» его значения ламинарная фильтрация через тре-

[1] В зависимости от масштаба съемки и необходимости выявить те или иные детали шероховатости, длина выреза в рамке может выбираться в широких пределах, чаще всего от 5 до 10 *см*.

Таблица 1

Категории шероховатости	Характеристика шероховатой поверхности стенок трещин	Коэффициент развития поверхности стенок трещин, $\varkappa_a$	Гидравлические параметры шероховатости, *см*		Для каких трещин наиболее характерна эта шероховатость
			A	*B*	
I	Практически гладкие стенки	$<1{,}004$	$<0{,}02$	$<0{,}003$	Трещины, шероховатость стенок которых почти полностью сглажена тектоническими подвижками блоков массива
II	Малая шероховатость	$1{,}004 \div 1{,}02$	$0{,}02 \div 0{,}10$	$0{,}003 \div 0{,}068$	
III	Пониженная шероховатость	$1{,}02 \div 1{,}05$	$0{,}10 \div 0{,}25$	$0{,}068 \div 0{,}42$	Трещины в песчаниках, слабых известняках и т. п.
IV	Средняя шероховатость	$1{,}05 \div 1{,}10$	$0{,}25 \div 0{,}50$	$0{,}42 \div 1{,}7$	Трещины в массивах мелкокристаллических скальных пород
V	Повышенная шероховатость	$1{,}10 \div 1{,}20$	$0{,}50 \div 1{,}0$	$1{,}7 \div 6{,}8$	Трещины в массивах крупнокристаллических пород
VI	Высокая шероховатость	$>1{,}20$	$>1{,}0$	$>6{,}8$	Трещины в бетонных конструкциях

щину сравнительно быстро сменяется турбулентной (см. графики на рис. 3).

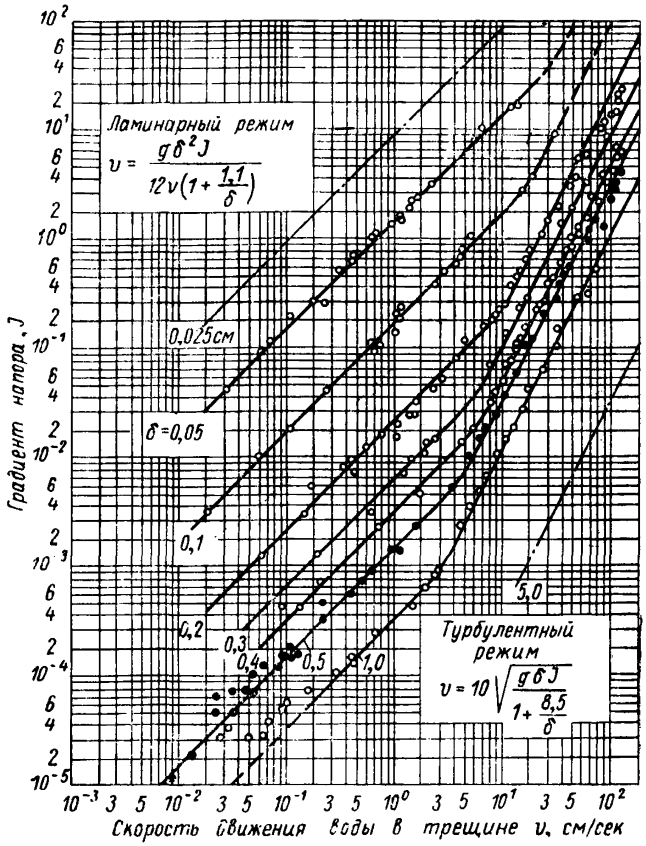


Рис. 3. Графики изменения скорости течения воды через трещины в скальном массиве ($A = 1,1$ и $B = 8,5$ *см*) в зависимости от градиента напора (при T=20°С).

а) Общее выражение «критического» градиента напора можно получить, приравняв соответствующие значения «критической» скорости по формулам (1) и (2):

$$J_к = 1,44 \cdot 10^4 \frac{\nu^2 \xi^2}{g\delta^3\psi}, \qquad (4)$$

где $\xi = 1 + \frac{A}{\delta}$ и $\psi = 1 + \frac{B}{\delta}$.

Следовательно, критический градиент возрастает пропорционально квадрату вязкости фильтрующейся через трещину жидкости.

б) Из преобразованного выражения (4):

$$J_к = 1{,}44 \cdot 10^4 \frac{\nu^2 (\delta + A)^2}{g\delta^4 (\delta + B)}, \qquad (4')$$

видно, что при увеличении раскрытия весьма тонких трещин, для которых A и $B \gg \delta$, «критический» градиент очень быстро уменьшается, обратно пропорционально четвертой степени раскрытия трещины.

в) Если принять $g = 980$ *см/сек*^{2} и $\nu = 0{,}0131$ *см*^{2}*/сек* ($t = 10°$ С), то в этом случае

$$J_к \approx \frac{2{,}5 \cdot 10^{-3}}{\delta^4} \frac{A^2}{B}. \qquad (5)$$

«Критическое» число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_к = \frac{v_к \delta}{2\nu} = \frac{g\delta^3}{24\nu^2 \xi} J_к. \qquad (6)$$

Или, имея в виду выражение $J_к$,

$$\mathrm{Re}_к = 600 \frac{\xi}{\gamma} = 600 \frac{\delta + A}{\delta + 6{,}8A^2}. \qquad (7)$$

Таким образом, «критическое» число Рейнольдса не зависит от вязкости фильтрующейся жидкости и также практически мало зависит от раскрытия трещины. С уменьшением раскрытия, например, от 1 до 0,025 *см*, т. е. в 40 раз это число для трещин с параметром $A = 1{,}1$ *см* снижается всего лишь в 1,67 раза — от 130 до 81,5.[1] С увеличением же шероховатости стенок трещины $\mathrm{Re}_к$ может снизиться более, чем на порядок.

Фильтрация в клиновидных трещинах

2.7. Градиент пьезометрического напора при ламинарном движении жидкости в клиновидной трещине с шероховатыми стенками (рис. 4)

$$J_{кл} = \frac{1 + \chi}{12\chi^2} \left[6 + \frac{4A}{\delta_1} \left(1 + \frac{1}{\chi^2 + \chi} \right) + \frac{1 - \chi}{L\nu} \delta_1 q_{кл} \right] J^{\circ}_{1_л}, \qquad (8)$$

где $\chi = \frac{\delta_2}{\delta_1}$.

[1] Вместе с тем «критический» градиент напора изменяется почти на шесть порядков.

Удельный (на единицу длины вдоль живого сечения трещины) расход ламинарной фильтрации

$$q_{кл} = \frac{\frac{J_{кл}}{J^{\circ}_{1_л}} - \left[\frac{1+\chi}{2\chi^2} + \frac{A}{3\delta_1}\frac{1+\chi}{\chi^2}\left(1+\frac{1}{\chi^2+\chi}\right)\right]}{\frac{(1-\chi)^2\delta_1}{12\chi^2 L\nu}} = \frac{\frac{J_{кл}}{J^{\circ}_{1_л}} - f}{\beta}\frac{L\nu}{\delta_1}, \qquad (9)$$

где $\beta = \frac{(1-\chi)^2}{12\chi^2}$;

$J^{\circ}_{1_л} = \frac{12\nu}{g\delta_1^3} q_{кл}$ — градиент напора в трещине с постоянным раскрытием δ_1 и абсолютно гладкими стенками при протекании через нее жидкости с расходом, равным $q_{кл}$;

$f = \frac{1+\chi}{12\chi^2}\left[6 + \frac{4A}{\delta_1}\left(1+\frac{1}{\chi^2+\chi}\right)\right]$.

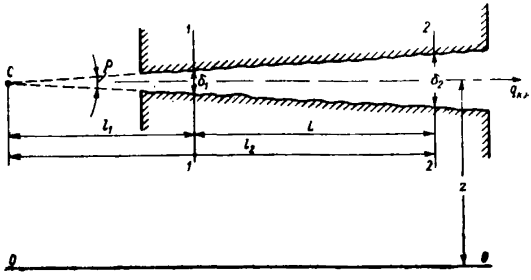


Рис. 4. Расчетная схема клиновидной трещины.

2.8. Градиент суммарных потерь напора при турбулентном движении жидкости в клиновидной трещине:

$$J_{кт} = \frac{1+\chi}{2\chi^2}\left[1 + \frac{2B}{3\delta_1}\left(1+\frac{1}{\chi+\chi^2}\right) + 100\frac{\delta_1}{L}(1-\chi)\right] J^{\circ}_{1_т}. \qquad (10)$$

Расход турбулентной фильтрации через клиновидную трещину

$$q_{кт} = 10\sqrt{\frac{g\delta_1^3}{b} J_{кт}}, \qquad (11)$$

где $b = \frac{1+\chi}{2\chi^2}\left[1 + \frac{2B}{3\delta_1}\left(1+\frac{1}{\chi+\chi^2}\right) + 100\frac{\delta_1}{L}(1-\chi)\right]$.

2.9. Дополнительные или более точные сведения об условиях движения воды в трещинах (например, данные об интенсивности пульсаций гидродинамического давления) могут быть получены путем проведения соответствующих экспериментов на установке типа «Фитрон» (рис. 5), с помощью которой легко воспроизводить контролируемые обстоятельства движения воды при изменении в широком диапазоне ее напора и раскрытия трещины.

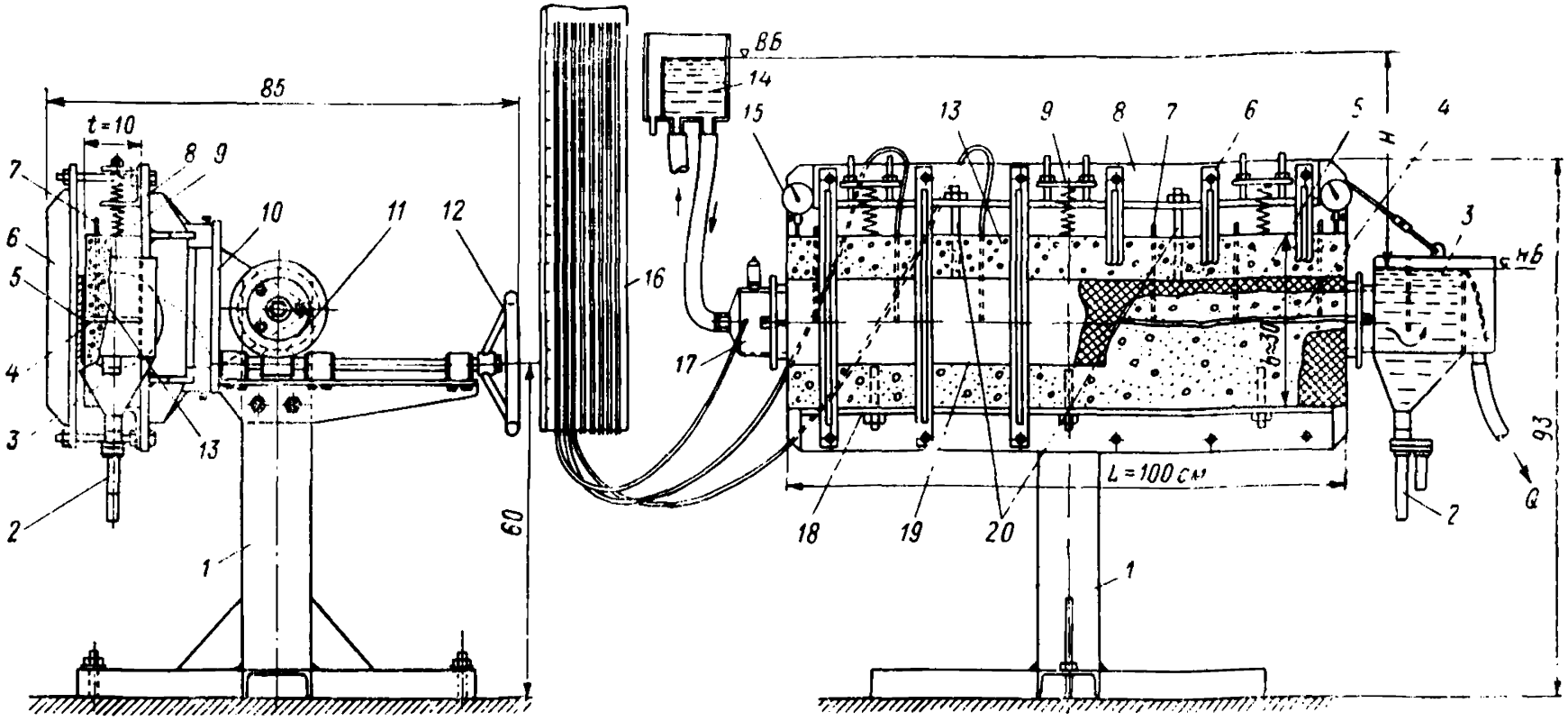


Рис. 5. Схема установки „Фитрон-1" для экспериментального изучения условий движения воды в трещинах

1—опорная стойка с крестовиной; *2*—пескосборник револьверного типа; *3*—водосливный бачок-отстойник; *4*—трещина; *5*—прокладка из губчатой резины между образцом и нащельником; *6*—струбцины для прижатия нащельника; *7*—штуцеры пьезометрических каналов, входящих в трещину; *8*—съемный стол с герметизирующим резиновым уплотнением; *9*—нагрузочные пружины; *10*—платформа; *11*—червячный механизм (редуктор) с ручным приводом-штурвалом для поворота платформы; *12*—штурвал; *13*—бетонный образец с продольной трещиной (щелью); *14*—бачок регулятор напора воды в верхнем бьефе; *15*—индикаторы перемещения подвижной половины образца; *16*—пьезометры; *17*—водоподводящий бачок; *18*—кронштейн для крепления неподвижной половины образца; *19*—планка-нащельник; *20*—анкерные тяги регулирования раскрытия трещины.

Расчет фильтрации в трещине методом нагнетания в нее воды из скважины

2.10. Зависимость (1) позволяет с большой точностью определить раскрытие отдельных трещин в скальном основании. Для получения исходных данных можно воспользоваться методом нагнетания воды в скважину, которой «подсекается» заранее вы-

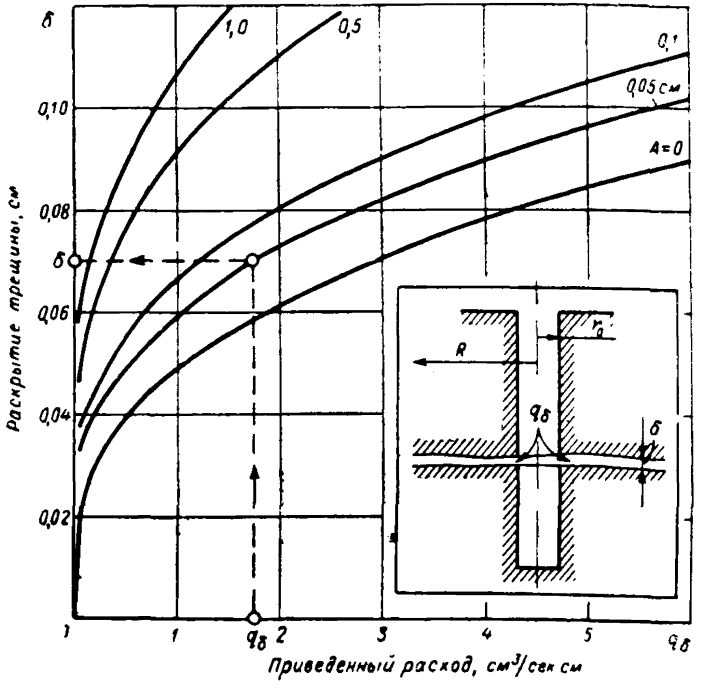


Рис. 6. Изменение, в зависимости от раскрытия трещины, приведенного расхода воды, нагнетаемой из скважины в эту трещину (при r_0=5 *см*, R=500 *см* и ν=0,013 $см^2$/*сек*).

бранная трещина. При этом расход воды, поглощаемый трещиной, равен

$$Q = \frac{2\pi g c \delta}{\nu \ln \frac{R}{r_0}} H_0 = \frac{\pi g \delta^4 H_0}{6\nu (\delta + A) \ln \frac{R}{r_0}}, \qquad (12)$$

откуда видно, что приведенный расход фильтрации в трещине $q_\delta = \frac{Q}{H_0}$, очень сильно зависит от ее раскрытия и, вместе с тем, изменение расстояния до контура стока мало влияет на величину расхода, так как R входит под знак логарифма. Следовательно, величина расхода q_δ позволяет судить о раскрытии трещины.

2.11. Определение величины δ с помощью формулы (12) производится путем подбора. Для этого лучше воспользоваться графиками зависимостей $\delta(q_\delta)$ при разных A[1]. Подобные графики для $\nu=0{,}013$ *см²/сек* ($t=10°$ С), $r_0=5$ *см* и $R=500$ *см* приведены на рис. 6. При вычислении δ методом подбора удобнее пользоваться формулой

$$\delta = \sqrt[3]{\xi q_\delta \frac{6\nu}{\pi g} \ln \frac{R}{r_0}}, \tag{13}$$

которая при указанных выше параметрах будет иметь вид

$$\delta = 0{,}05 \sqrt[3]{\xi q_\delta}. \tag{13'}$$

2.12. Приведенным водопоглощениям (из расчета на одну трещину) в диапазоне от 0,001 до 100 *л/мин* (т. е. от $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ до 17 *см³/сек·см*) соответствует диапазон раскрытий трещин примерно от 0,05 до 2 *мм*. Эти данные основаны на предположении о ламинарном течении воды в трещине, что должно быть проверено в каждом конкретном случае.

Условия возникновения турбулизации осерадиального потока в трещине

2.13. При определенном превышении давления или расхода нагнетаемой воды может возникнуть турбулизация потока в зоне вокруг скважины. Скорость течения с расходом Q_δ на удалении r от оси скважины согласно (1) равна

$$v_r = \frac{g\delta^2}{12\nu\left(1+\frac{A}{\delta}\right)} J_r = \frac{Q_\delta}{2\pi r\delta}. \tag{14}$$

Градиент напора на этом удалении

$$J_r = \frac{6\nu(\delta + A)}{\pi g r \delta^4} Q_\delta, \tag{15}$$

приравнивая его к критическому значению (4), получаем радиус зоны турбулизации потока в трещине

$$r_т = \frac{Q_\delta}{2{,}4 \cdot 10^3 \pi \nu} \frac{\delta + B}{\delta + A} = \frac{Q_\delta}{7{,}53 \cdot 10^3 \nu} \frac{\delta + 6{,}8A^2}{\delta + A}. \tag{16}$$

Как видно из этого выражения, радиус зоны турбулентного осерадиального течения практически не зависит от раскрытия трещины. При достаточно малых $\delta \ll A$

$$r_т = \frac{6{,}8A}{7{,}53 \cdot 10^3 \nu} Q_\delta = 9{,}0 \cdot 10^{-4} \frac{A}{\nu} Q_\delta, \tag{17}$$

Если $r_т \leqslant r_0$, то это означает отсутствие турбулизации потока в трещине при нагнетании в нее воды из скважины диаметром $2r_0$.

---

[1] Гидравлический параметр шероховатости стенок трещин A для большинства скальных пород изменяется в пределах от 0,05 до 0,2 *см*.

Следовательно, при определении раскрытия трещины указанным способом величина расхода Q_δ не должна превышать

$$Q_{\delta_{\text{макс}}} = 1{,}1 \cdot 10^3 \frac{\nu}{A} r_0. \qquad (18)$$

Так, для $r_0 = 5$ *см*, $\nu = 0{,}013$ *см²/сек* и $A = 1{,}1$ *см*, $Q_{\delta\text{макс}} = 65$ *см³/сек* $= 3{,}9$ *л/мин*.

Расчетный метод определения водопроницаемости скального массива с четко выраженной системой трещин

2.14. Для оценки расчетным путем расхода фильтрации через скальный массив необходимо знать, как распределяются в выбранном сечении массива трещины в зависимости от величины их раскрытия, т. е. предварительно надо определить параметр трещиноватости массива Γ_δ, характеризующий густоту трещин.

2.15. В общем случае удельный расход фильтрации через единичную трещину с раскрытием δ равен

$$q_\delta = \lambda \frac{a\xi}{2b\psi}\left(\sqrt{1 + 4\frac{b\psi}{a^2\xi^2}\delta^3 J \frac{\sin\eta}{\lambda}} - 1\right), \qquad (19)$$

где λ — коэффициент извилистости трещины;

$$a = \frac{12\nu}{g}; \quad b = \frac{0{,}01}{g};$$

η — угол между направлением простирания трещины и поверхностью равного напора фильтрационного потока.

Расход воды, протекающей при том же градиенте J через единицу поверхности сечения пласта

$$Q = \sum_{\delta_{\text{мин}}}^{\delta_{\text{макс}}} q_\delta \Gamma_\delta, \qquad (20)$$

где $\delta_{\text{мин}}$ и $\delta_{\text{макс}}$ — предельные значения раскрытий трещин в пласте.

3. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ТРЕЩИН И ГЛИНИСТЫХ ПРОСЛОЕК В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ

Оценка водопроницаемости несвязного зернистого заполнителя — материала тектонического дробления вмещающей породы

3.1. Характер фильтрации в скальном основании зависит не только от количества, раскрытия и направленности имеющихся в нем полых трещин, но также (а иногда и в большей степени) — от наличия крупных трещин и отдельных зон, выполненных зернистым материалом тектонического дробления вмещающей породы. Такие трещины (зоны), обладая большой водопроводимостью, могут оказывать существенное влияние на распределение напора под сооружением, в связи с чем часто возникает необ-

ходимость в предварительной оценке водопроницаемости (коэффициента фильтрации) заполнителя этих трещин, для чего:

а) по зерновому составу и пористости заполнителя вычисляют гидравлически эквивалентный диаметр его поровых каналов

$$d_0 = 0{,}22\eta_к d_{50}, \tag{21}$$

по которому можно судить о суффозионной устойчивости частиц заполнителя. При этом $\eta_к$ — параметр неоднородности заполнителя (грунта) по В. Н. Кондратьеву определяют следующим образом: на кривой зернового состава грунта (рис. 7) отмечают две точки (d_{10} и d_{60}) и через них проводят прямую, по которой на-

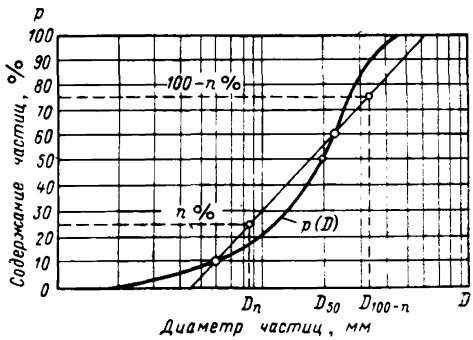


Рис. 7. Вспомогательное графическое построение при определении расчетного диаметра d_0 пор зернистого материала.

ходят диаметры частиц d_n и d_{100-n}, соответствующие точкам на прямой, имеющим ординаты $p=n$ и $p=100—n$. Численное значение $\eta_к$ равно отношению этих диаметров, т. е.

$$\eta_к = \frac{d_n}{d_{100-n}}. \tag{22}$$

3.2. Коэффициент ламинарной фильтрации несвязного (зернистого материала) заполнителя трещин

$$k_л = \frac{\varphi n g}{37\nu} d_0^2. \tag{23}$$

Для материала грунта с хорошо окатанными частицами $\varphi=0{,}95$; для материала грунта с плохо окатанными частицами $\varphi=0{,}70$; для материала грунта с угловатыми частицами $\varphi=0{,}35$.

Если диаметр $d_0>0{,}1$ *см* в формулу (23) необходимо ввести поправку, учитывающую инерционное сопротивление движению воды в извилистых поровых каналах. Тогда

$$k_л = \frac{\varphi n g d_0^2}{37\nu\left(1+0{,}01\varphi\frac{vd_0}{n\nu}\right)} = \frac{\varphi n g d_0^2}{37\nu(1+0{,}01\varphi\,\mathrm{Re}_0)}. \tag{24}$$

Скорость ламинарной фильтрации в таком крупнопористом материале (грунте)

$$v_л = \sqrt{\frac{n^2 g d_0}{0{,}36} J + 2600\left(\frac{\nu n}{\varphi d_0}\right)^2} - 51\frac{\nu n}{\varphi d_0}. \tag{25}$$

3.3. Если опытным путем заранее установлена величина коэффициента фильтрации $k_л$ при скорости $v_л$, то гидравлически эквивалентный диаметр поровых каналов

$$d_0 = 0{,}18\frac{k_л v_л}{n^2 g}\left(1 + \sqrt{1 + 1130\frac{n^3 \nu g}{\varphi k_л v_л^2}}\right), \tag{26}$$

но, так как

$$k_л = \frac{v_л}{J},$$

$$d_0 = 0{,}18\frac{v_л^2}{n^2 g J}\left(1 + \sqrt{1 + 1130\frac{n^3 \nu g}{\varphi v_л^3} J}\right). \tag{27}$$

3.4. Ламинарная фильтрация в зернистом заполнителе (грунте) переходит в турбулентную, когда градиент напора достигает критического значения

$$J_к = \frac{1{,}1 \cdot 10^3}{g d_0^3}\left(\frac{\varkappa\nu}{\varphi}\right)^2\left(\frac{1 + 0{,}29\varkappa^2}{1 - 0{,}29\varkappa^2}\right)^2, \tag{28}$$

где безразмерный коэффициент

$$\varkappa = 1{,}5\sqrt[4]{\frac{d_0}{1\ см}}. \tag{29}$$

Соответственно, критическая скорость фильтрации

$$v_к = \frac{30 n \nu \varkappa^2}{(1 - 0{,}29\varkappa^2)\, d_0}, \tag{30}$$

и критическое число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_{0к} = \frac{v_к d_0}{n\nu} = 30\frac{\varkappa^2}{\varphi(1 - 0{,}29\varkappa^2)}. \tag{31}$$

Из формул (30) и (31) следует, что при увеличении гидравлически эквивалентного диаметра пор заполнителя (грунта) d_0 критическая скорость фильтрации изменяется очень незначительно, в пределах от 3 до 1 *см/сек*, в то время как критическое число Рейнольдса возрастает примерно в одинаковой степени, что и d_0.

Коэффициент турбулентной фильтрации зернистого материала

$$k_т = \frac{v_т}{\sqrt{J}} = 0{,}9 n \varkappa \sqrt{g d_0}. \tag{32}$$

Изменение коэффициента турбулентной фильтрации монозернистого грунта показано на графике рис. 8.

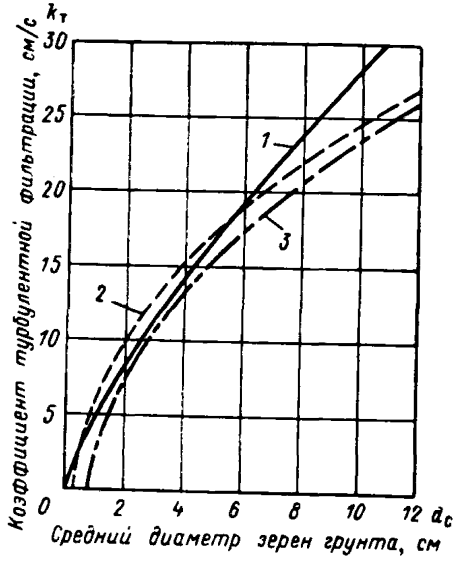


Рис. 8. Изменение коэффициента турбулентной фильтрации монозернистого материала (n==0,4) в зависимости от крупности его частиц

1—рассчитанное по формуле (32) для материала с окатанными частицами; *2* и *3*—по формуле С. В. Избаша $k_т=c_ф n\sqrt{d}$ для зернистого материала с окатанными ($c_ф^ш=20-5/d$) и неокатанными ($c_ф^к=20-14/d$) частицами.

Оценка водопроницаемости глинистых прослоек в скальных массивах

3.5. Во многих случаях заполнитель тектонических трещин в скальных массивах представлен смесью глинистого материала и обломков вмещающих пород. Глинистый материал в таком заполнителе является продуктом дробления и последующего перетирания пород при одновременном воздействии водной среды. Сильно измельченный заполнитель, получивший характерное название «глинка трения» встречается довольно часто. Кроме того, в скальных массивах карбонатных пород (известняках, доломитах и т. п.) встречаются иногда глинистые прослойки осадочного происхождения.

Такие пропластки или прослойки, выполненные малопроницаемым глинистым материалом, являются естественными водоупорами или экранами внутри массива и могут оказать существенное влияние на его фильтрационные свойства, что следует учитывать при прогнозировании характера фильтрации в основании сооружения.

3.6. Для определения водопроницаемости глинистого материала заполнителя, в составе которого имеются «плавающие» в мелкоземе крупные частицы (дресва, щебень), надо вначале выяснить какова плотность (объемная масса) мелкозема.

Если мелкоземом целиком заполнено поровое пространство между крупными частицами, то его объемная масса

$$\gamma_м = \gamma_г \frac{p_м}{1 - \frac{\gamma_г p_к}{\Delta_к}}. \quad (33)$$

Верхний предельный размер частиц мелкозема $d'_м$ определяется исходя из обязательного условия, согласно которому более крупные частицы грунта должны «плавать» в мелкоземе, не образуя «скелета». Как правило, это условие автоматически выполняется, если суммарное весовое содержание мелкозема в грунте $p_м > 25\%$. В то же время предельный размер частиц мелкозема не должен превосходить одного миллиметра (чтобы мелкозем в любом случае имел характерные свойства, присущие глинистым грунтам).

После этого определяют коэффициент пористости мелкозема на границе его текучести, а затем вычисляют коэффициент фильтрации мелкозема по формуле:

$$k = 4 \cdot 10^{-11} \exp \frac{\varepsilon_м}{0{,}17\varepsilon_т - 0{,}048} \; см/сек, \quad (34)$$

где $\varepsilon_м$ и $\varepsilon_т$ — в долях единицы.

Графики зависимостей между коэффициентами пористости и фильтрации для различных глинистых грунтов показаны на рис. 9.

Оценка суффозионных свойств заполнителя трещин, карстовых полостей, материала прослоек и самой вмещающей породы в скальных массивах

3.7. Режим и условия формирования подземного потока в массиве основания гидротехнического сооружения резко изменяются после наполнения водохранилища. Поток не только приобретает значительно более высокие скорости и уклоны, но также распространяется в новые, ранее необводненные области массива, в связи с чем могут возникнуть условия для размыва (механической суффозии) заполнителя находящихся в нем трещин и карстовых полостей.

Вероятность суффозии должна учитываться при выборе той или иной конструкции противофильтрационных и дренажных устройств в основании сооружения.

Для прогнозирования вида и интенсивности суффозии заполнителя надо располагать данными, достаточно характеризующими систему трещина — заполнитель и, в первую очередь, необходимо выяснить:

а) морфологию вмещающей заполнитель трещины — ее размеры, шероховатость стенок, оперение полыми трещинами, а также ориентировку по отношению к направлению фильтрационного потока и главных напряжений в массиве;

б) генезис, зерновой и минералогический состав заполнителя и его физико-механические свойства (объемную массу, порис-

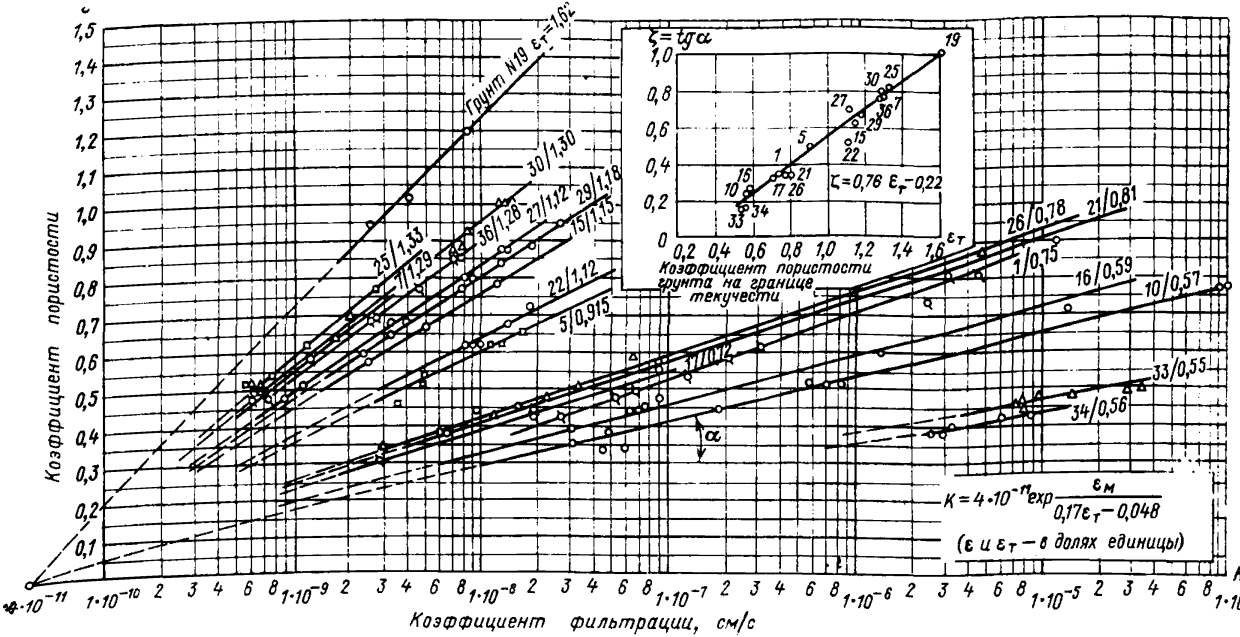


Рис. 9. Графики зависимостей между коэффициентами пористости и фильтрации глинистого мелкозема заполнителя трещин и глинистых грунтов. Дробными индексами обозначены лабораторные номера грунтов (в числителе) и величины коэффициентов $\varepsilon_т$ (в знаменателе).

тость, содержание растворимых солей, водопроницаемость, способность к набуханию при водонасыщении, механическую прочность, пределы пластичности мелкозема);

в) степень заполнения трещины.

Основные виды механической суффозии в скальных массивах

3.8. Механическая суффозия в трещиноватом скальном массиве может проявляться либо в форме эрозионного размыва фильтрационным потоком стенок трещин, либо в форме вымыва частиц зернистого материала зон дробления пород, заполнителя трещин и глинистых прослоек.

В первом случае, характерном для слабосцементированных полускальных пород, например, песчаников на глинистом или известковистом цементе, интенсивность фильтрации в процессе суффозии постоянно увеличивается, хотя несущая способность массива при этом снижается незначительно, так как в местах контактов между отдельными его блоками эрозия практически отсутствует.

Иначе обстоит дело при размыве заполнителя трещин, когда даже при небольшом увеличении интенсивности фильтрации может произойти значительное разуплотнение заполнителя, вследствие чего возрастает деформативность скального основания (или отдельных его участков), а его несущая способность может существенно понизиться.

Чтобы подойти к оценке фильтрационной прочности скального массива, необходимо вначале тщательно проанализировать гидрогеологические условия для каждой конкретной области массива и на основе этого сделать предположения о вероятности суффозии, которая может проявляться в одном или сразу в нескольких видах, поясняемых схемами на рис. 10, где представлены шесть видов механической суффозии:

I — вымыв частиц из заполнителя трещины фильтрационным потоком, направленным вкрест этой трещине;

II — вымыв частиц из заполнителя трещины продольным фильтрационным потоком;

III — поверхностный размыв заполнителя со стороны открытой щели между пластом заполнителя и стенкой вмещающей трещины;

IV — боковой размыв заполнителя или глинистого пропластка в устьях оперяющих его открытых трещин (случай контактного размыва заполнителя фильтрационным потоком в трещинном коллекторе);

V — контактный выпор (выдавливание) слабоуплотненного глинистого заполнителя из трещины, выходящей на открытую поверхность берегового склона, стенку скважины, штольни т. п.;

VI — эрозионный размыв стенок полых трещин в массиве.

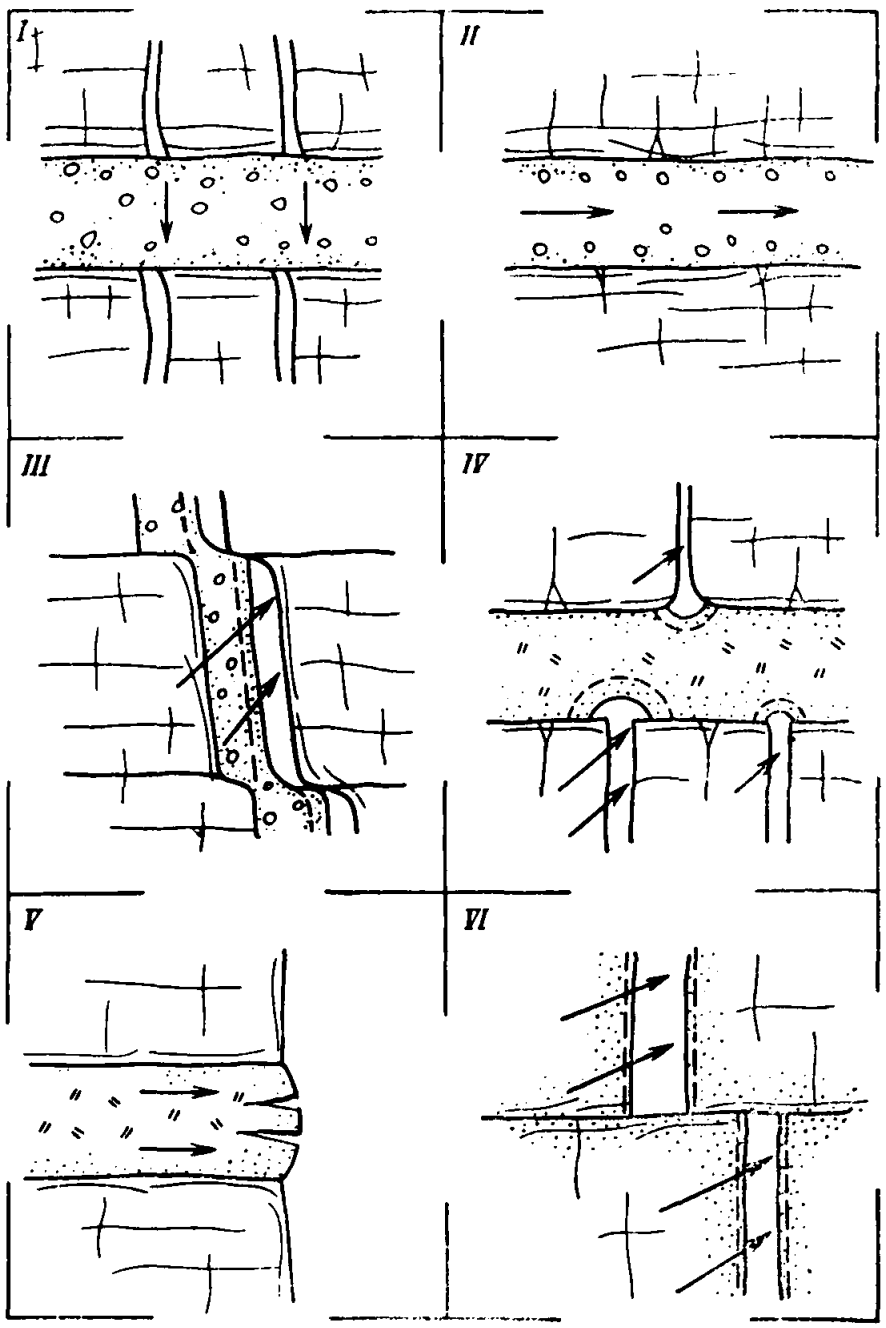


Рис. 10. Схемы шести основных видов механической суффозии в скальных массивах.

3.9. Существуют также три разновидности внутреннего вымыва (суффозии) частиц заполнителя, которые поясняются схемами на рис. 11.

На рис. 11, *а* схематически показано перемещение вымываемых фильтрационным потоком частиц *одновременно по всей толще* однородного по своему зерновому составу заполнителя. Схема на рис. 11, *б* поясняет другой возможный случай внутренней суффозии заполнителя, когда вымыв его частиц происходит *только* со стороны так называемой поверхности суффозионного разуплотнения, которая в процессе вымыва частиц перемещается вглубь пласта.

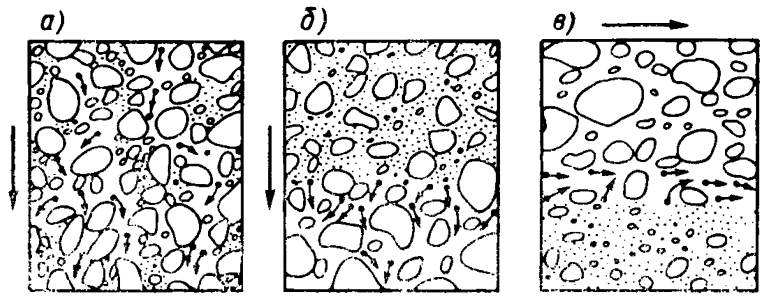


Рис. 11. Схемы трех разновидностей внутренней суффозии заполнителя

а—общая внутренняя суффозия в однородном по зерновому составу пласте заполнителя; *б*—местная суффозия внутри однородного пласта заполнителя; *в*—контактный размыв мелкозернистого пропластка в слоисто-неоднородном пласте заполнителя.

Схема продольного размыва *слоисто-неоднородного* пласта заполнителя показана на рис. 11, *в*, откуда видно, что мелкозернистый пропласток размывается в месте его сопряжения (контакта) с более крупнозернистым пропластком, который вмещает турбулентный фильтрационный поток.

3.10. Необходимым условием внутренней суффозии является возможность перемещения мелких «незащемленных» частиц в поровых каналах материала заполнителя. Данное условие с некоторым запасом может быть выражено неравенством.

$$d_в < d_0, \tag{35}$$

где $d_в$ — размер выносимых частиц.

3.11. При установленной возможности первых двух видов (рис. 10) размыва несвязного заполнителя расчет его суффозионной устойчивости рекомендуется выполнять следующим образом.

1) Путем анализа достаточно большого числа (не менее десяти) проб заполнителя выясняют з,ну (пределы) его зернового

состава, а также его пористость, параметр неоднородности и окатанность частиц [1].

2) По этим характеристикам вычисляют гидравлически эквивалентный диаметр пор d_0 и коэффициент фильтрации материала наиболее разнозернистых проб.

3) Сопоставляя полученные расчетные значения диаметров пор с размерами частиц заполнителя, определяют суммарное количество (по весу) тех из них, которые могут быть вымыты фильтрационным потоком. Затем определяют величину «критического» градиента напора, при котором произойдет вымыв этих частиц.

Считается допустимым, если в результате внутренней суффозии из общей массы материала заполнителя будет вымыто не свыше 5% частиц, т. е. заполнитель можно считать суффозионно устойчивым, если суммарное содержание в нем частиц с размерами, меньшими d_0, составляет по массе не более 5%.

3.12. Местная суффозия в однородном заполнителе начинается с поверхности пласта и сопровождается, вследствие выноса относительно мелких частиц, весьма существенным увеличением поперечников поровых каналов (рис. 11, *б*). Возникающее при этом «суффозионное разуплотнение» заполнителя может распространиться на значительную глубину пласта и вызвать его деформацию.

Этот вид суффозии характерен для зернистого материала заполнителя (грунта), состоящего из «мелкозема» и скелета, граница между которыми определяется участком разрыва дифференциальной кривой зернового состава или точкой ее «минимума» (рис. 12, *а*).

Вопрос о суффозионной устойчивости заполнителя в данном случае (при пористости скелета $n_c<0{,}5$) решается в следующем порядке. Для обеих составляющих (мелкозем и скелет), на которые условно разделен заполнитель трещины, строят суммарные кривые зернового состава, принимая каждую часть за целое, а затем по суммарной кривой скелета определяют d_{50} и коэффициент его разнозернистости $\eta_{x_c} = d_{60_c}/d_{10_c}$. Далее, для определения диаметра пор скелета, надо знать его пористость, являющуюся наиболее важной характеристикой материала заполнителя (грунта):

$$n_c = 1 - \frac{\gamma_c}{\Delta},$$

при этом объемная масса его скелета

$$\gamma_c = p_c \gamma_г, \qquad (36)$$

где $\gamma_г$ — объемная масса заполнителя (грунта); p_c — в долях единицы относительное содержание частиц скелета в общей массе грунта (рис. 12, *а*).

[1] Объем единичной пробы должен быть не менее $10 \cdot d^3_{\text{макс}}$.

Сравнивая величину n_c со значением пористости скелета, находящегося отдельно от мелкозема, можно судить о том, каким деформациям подвергнется материал (грунт), если произойдет вымыв мелких фракций. В этих целях для предварительных расчетов на рис. 12,б даны графики изменения пористости сыпучих (несвязных) грунтов в зависимости от коэффициента их разнозернистости.

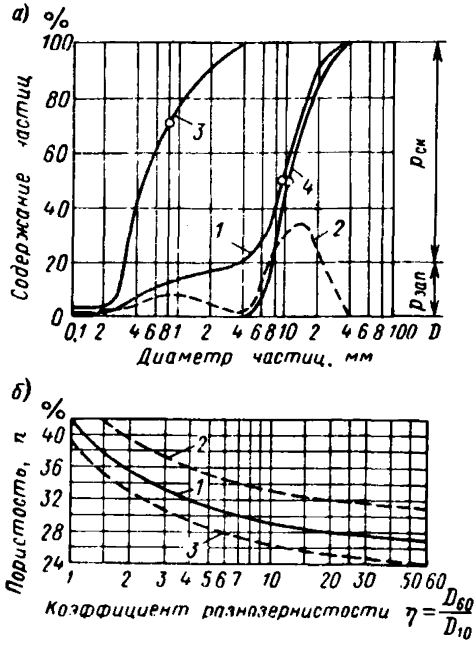


Рис. 12. Зависимость для оценки суффозионных свойств разнозернистых материалов с учетом их пористости

а—графо-аналитическая зависимость для оценки суффозионных свойств разнозернистого материала; *1* и *2*—интегральная и дифференциальная кривые зернового состава материала; *3*—интегральная кривая состава мелкозернистой составляющей (мелкозема) материала; *4*—то же, крупнозернистой составляющей (скелета) материала; *б*—зависимость пористости от коэффициента разнозернистости сыпучих (несвязных) грунтов; *1*—при средней по плотности укладке грунта; *2* и *3*—соответственно, при рыхлой и очень плотной укладке.

Зная зерновой состав скелета грунта, можно по графику определить среднюю величину его естественной пористости и, сравнивая ее с величиной n_c, получить необходимые данные о характере деформаций грунта в результате суффозии.

После этого по формуле (22) определяют параметр неоднородности зернового состава скелета η_c, и по формуле (21) — диаметр поровых каналов d_0.

Если окажется, что

$$d_{0c} < d_{70м}, \qquad (37)$$

то вымыв мелких частиц будет происходить только с открытой поверхности заполнителя (грунта). Распространение суффозии вглубь прекращается вследствие образования в порах скелета сводиков из относительно крупных частиц, содержащихся в мелкозернистой составляющей заполнителя. Таким образом, местная суффозия в этом случае быстро затухает во времени, в связи с чем не представляет никакой опасности. И наоборот, если $d_{0c} > d_{70м}$, суффозия может распространиться на всю толщу пласта заполнителя трещины или зоны дробления.

3.13. *Контактный размыв* мелкозернистого пропластка в слоисто-неоднородной толще заполнителя имеет характер эрозии и проявляется лишь при турбулизации фильтрационного потока в крупнозернистом пропластке, в связи с чем контактный размыв

будет отсутствовать, если скорость фильтрации в этом пропластке не превысит критического ее значения:

$$v_к = \frac{30\nu n}{\varphi d_0}\sqrt{\frac{x^2}{1-0{,}29x^2}}, \tag{38}$$

которое увеличивается с уменьшением диаметра пор d_0 (рис. 13).

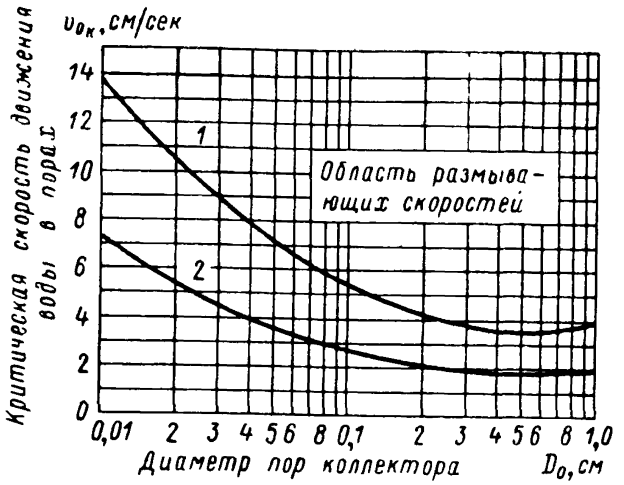


Рис. 13. Изменение критической скорости движения воды в поровых каналах зернистого материала (грунта), соответствующей началу интенсивной турбулизации фильтрационного потока

1—с хорошо окатанными частицами (φ=0,9); *2*—с плохо окатанными частицами (φ=0,45).

Для расчетов с достаточным запасом можно принять $v_0 = 3$ *см/сек*; тогда, согласно (28), при $\nu = 0{,}015$ *см²/сек* ($t = 7°$ С) и $\varphi = 0{,}75$, критический градиент напора в крупнозернистом пропластке:

$$J_к = \frac{0{,}0025\ см^2}{d_0^2}. \tag{39}$$

Если в мелкозернистом пропластке содержится определенное количество песчаных или дресвяных частиц, не способных пройти через поры крупнозернистого пропластка, то суффозионная устойчивость заполнителя по отношению к контактному размыву резко повышается. Это связано с тем, что в процессе размыва разнозернистого материала из содержащихся в нем крупных частиц формируется «естественный» обратный фильтр, вследствие чего начавшийся размыв быстро затухает и через некоторое время полностью прекращается.

Максимальную глубину размыва $f_р$, равную величине возможного взаимного смещения стенок трещины, можно вычислить по формуле

$$f_р = \frac{\Delta_м}{\gamma_м} \frac{d_р}{1 - p_р}, \tag{40}$$

где $d_р$ — расчетный диаметр частиц мелкозернистого заполнителя, проходящих через поры крупнозернистого пропластка; $p_р$ — относительная величина (в долях единицы) суммарного весового содержания в мелкозернистом заполнителе частиц с размерами $< d_р$.

3.14. Боковой размыв пласта мелкозернистого заполнителя в устьях оперяющих его открытых трещин (IV вид размыва рис. 10) возможен лишь при турбулизации фильтрационного потока в этих трещинах.

Следовательно, критический градиент напора в данном случае (при известных раскрытиях трещин) надо определять по формуле (4). Соответственно, критическая скорость фильтрации в отдельной трещине

$$v_к = \frac{g\delta^2}{12\nu\xi} J_к = 1{,}2 \cdot 10^3 \frac{\nu}{\delta} \frac{\xi}{\psi}, \tag{41}$$

или

$$v_к = 1{,}2 \cdot 10^3 \frac{\nu}{\delta} \frac{\delta + A}{\delta + 6{,}8A^2}. \tag{41'}$$

3.15. Фильтрационная прочность мелкозернистого заполнителя и глинистых прослоек по отношению к боковому размыву в устьях трещин с раскрытием δ обеспечивается при любых значениях градиента напора, если в заполнителе или прослойке имеются равномерно распределенные по размерам частицы крупнее 2δ, процентное содержание которых в целом должно быть не ниже пятикратной величины раскрытия оперяющих трещин, выраженной в миллиметрах. В этом случае начавшийся размыв быстро прекращается вследствие самопроизвольного образования над устьем оперяющей трещины защитного слоя, в виде обратного фильтра, из входящих в состав заполнителя крупных частиц.

3.16. Устойчивость глинистого заполнителя на фильтрационный выпор в устьях вмещающих трещин (V вид суффозии рис. 10) следует определять, сопоставляя прогнозируемые градиенты напора в направлении устья трещины с критическим, при котором произойдет выпор:

$$J_в = \frac{2{,}5R_р}{\gamma_в \delta^{1/3}}, \tag{42}$$

где $R_р$ — долговременная прочность на разрыв грунта — заполнителя.

Величина $R_р$ зависит от плотности (коэффициента пористости) мелкозема заполнителя и степени его связности, харак-

теризуемой коэффициентом пористости $\varepsilon_т$, и может быть выражена формулой:

$$R_р = 1000 \exp \frac{\varepsilon_м}{0{,}2 - \varepsilon_т}, \ г/см^2. \quad (43)$$

3.17. Эрозионный размыв стенок трещин в массиве полускальных пород (VI вид механической суффозии рис. 10) будет отсутствовать при скоростях движения воды в трещинах, не превышающих одного метра в секунду, если вмещающая порода обладает в водонасыщенном состоянии прочностью на осевое сжатие не ниже 10 *кгс/см²*.

В иных случаях, в том числе, когда возможно частичное выщелачивание цементирующего вещества в породе, эрозионную ее устойчивость надо определять экспериментальными исследованиями.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ И ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

4.1. Полевыми исследованиями могут быть получены данные, более полно характеризующие водопроницаемость скального массива и его фильтрационную прочность, в частности, данные о суффозионной устойчивости заполнителя трещин и самой вмещающей породы в условиях их естественного залегания. Достоверность этих данных обеспечивается соответствующей методикой и правильным выбором участков исследований, в связи с чем предварительно должны быть тщательно изучены материалы геологических изысканий, в особенности диаграммы трещиноватости и схематические «фильтрационные профили» массива, построенные, например, по методу А. М. Гуреева. Здесь в первую очередь следует выявлять отдельные наиболее крупные трещины и зоны дробления, простирание которых совпадает с прогнозируемым направлением фильтрационного потока в массиве вблизи сооружения, т. е. там, где градиенты напора достигают наибольших значений.

4.2. При необходимости проведения специальных полевых опытов для выявления возможности суффозии заполнителя трещин, карстовых полостей или самой вмещающей породы, условия проведения этих опытов должны удовлетворять следующим требованиям.

а) Опробуемые зоны (части массива, искусственно подвергаемые воздействию фильтрационного потока) надо выбирать, прежде всего, в местах, где возникновение суффозии наиболее вероятно. Причем морфология трещин, их ориентировка, а также состав и свойства заполнителя в этих зонах должны быть ха-

рактерными для всего массива в целом, т. е. не представлять собой исключения, которое в каждом конкретном случае рассматривают отдельно.

б) В процессе испытания (опробования) должны воспроизводиться условия фильтрации, близкие по виду (но не по интенсивности) к тем, какие будут в данной зоне массива основания во время эксплуатации сооружения.

в) Следует выбирать такую схему испытаний, при которой имелась бы возможность наблюдать и количественно оценивать происходящие суффозионные явления.

Определение суффозионной устойчивости заполнителя трещин и вмещающей породы

4.3. Суффозионную устойчивость заполнителя трещин или вмещающей породы определяют в полевых условиях по изменению гидравлической проводимости испытываемой зоны массива в процессе нагнетания в него воды через скважину или группу скважин, размещаемых в соответствии с выбранной схемой испытаний (рис. 14).

При этом размеры опробуемой зоны (или целика) должны быть тем больше, чем крупнее блочность массива. Во всяком случае, в пределах зоны должно находиться не менее трех его блоков (структурных элементов, характеризующих неоднородность массива).

Если целью испытаний также является определение количественных характеристик суффозии (интенсивности размыва, зернового состава суффозирующих частиц и т. п.), наблюдательные скважины, через которые происходит разгрузка нагнетаемого потока, необходимо оборудовать устройствами (например, пескоуловками) для извлечения из скважин продуктов суффозии.

В результате испытаний устанавливают величину допустимого градиента напора, при котором не происходит существенного размыва (суффозии) заполнителя трещин, глинистых прослоек в массиве или самой породы. Величина этого градиента является критерием фильтрационной прочности скального основания в тех местах, где проводились испытания.

При выяснении суффозионной устойчивости заполнителя трещин надо производить нагнетания сразу в несколько скважин, расположенных вокруг центральной (наблюдательной) скважины, так как при нагнетании в одиночную скважину градиент напора очень быстро уменьшается в направлении растекания потока.

В тех случаях, когда испытаниям подвергают область скального массива, находящуюся в зоне аэрации (выше уровня грунтовых вод), нагнетания рекомендуется производить не в скважины, а в горные выработки — штольни (см. схему V на рис. 14) в тех местах, где они пересекают вмещающие заполнитель трещины.

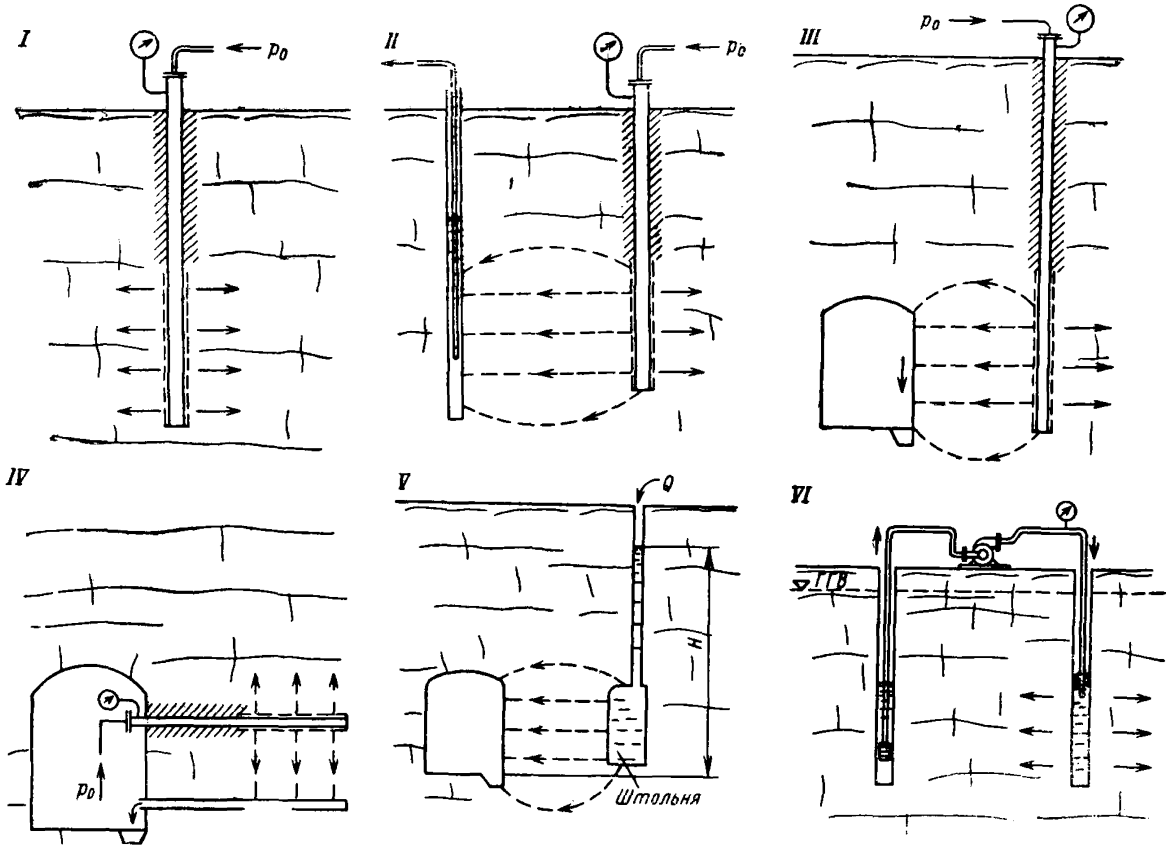


Рис. 14. Шесть наиболее употребительных способов испытаний на фильтрационную прочность скальных массивов нагнетанием воды из скважин. Способ VI откачки-нагнетания предложен Е. Е. Керкисом.

Ценные результаты могут быть получены, если во время нагнетаний определять с помощью индикаторов действительную скорость движения воды по трещинам, что иногда дает возможность сразу решить вопрос о необходимости дальнейших экспериментов по определению суффозионной устойчивости заполнителя трещин.

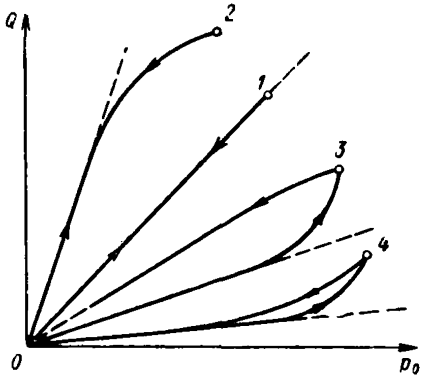


Рис. 15. Характерные виды индикаторных диаграмм процессов нагнетаний в скважины

1—линейная диаграмма, характерная для ламинарной фильтрации при отсутствии суффозии и разрывов внутри массива в процессе нагнетания; *2*—диаграмма с искривлением в направлении оси давления, что характерно при возникновении турбулизации потока вокруг скважины; *3*—диаграмма в виде гистерезисной петли—при суффозии заполнителя (также самой породы) или гидроразрыве, что обычно сопровождается необратимым увеличением проницаемости; *4*—диаграмма, характерная для обратимой деформации пласта в процессе нагнетания.

Это важно еще и потому, что по действительной скорости можно оценить величину активной трещиноватости массива, которая чаще всего неизвестна.

В первую очередь, должна быть установлена фильтрационная прочность наиболее трещиноватых зон массива, обладающих повышенной водопроводимостью, а также зон, вскрываемых дренажными скважинами и выработками.

Направление движения воды при испытаниях массива должно быть близким к ожидаемому после наполнения водохранилища.

В целом, методика испытаний массива на фильтрационную прочность должна выбираться в зависимости от конкретных гидрогеологических условий.

4.4. При наличии в скальном массиве крупных тектонических трещин, заполненных продуктами разрушения пород, или глинистых прослоек, выходящих на дневную поверхность массива, суффозионные испытания должны проводиться на небольшой глубине, т. е. непосредственно в зоне сопряжения проектируемого сооружения с основанием. Именно здесь наиболее неблагоприятны условия для сохранности пород (выветривание, разгрузка и т. п.).

В таких случаях для определения суффозионной устойчивости заполнителя трещин и материала прослоек целесообразно воспользоваться способом, который поясняется в Приложении II.

4.5. Нагнетание воды в массив для определения его фильтрационной прочности осуществляют, постепенно увеличивая напор и выясняя, как изменяется при этом индикаторная диаграмма процесса нагнетания (рис. 15). Если при достижении известной

величины напора становится заметным необратимое увеличение гидравлической проводимости испытываемой зоны в массиве и наблюдаются признаки размыва (суффозии) заполнителя трещин либо вмещающей породы, эту величину напора можно считать критической. Однако при больших напорах явление размыва (суффозии) заполнителя может маскироваться повышением расхода воды вследствие увеличения раскрытия трещин под действием гидростатического давления (гидроразрыв пласта), в связи с чем давление нагнетаемой воды не должно превышать геостатического. Кроме того, надо помнить, что далеко не всегда обнаруживается тенденция к увеличению начавшейся суффозии, в связи с чем испытания надо продолжать до полного выяснения обстоятельств развития суффозии, как при напоре, близком к критическому, так и при дальнейшем его повышении.

Анализируя затем эти обстоятельства (вид начавшейся суффозии, интенсивность ее нарастания и соответствующее увеличение проницаемости и деформируемости массива, а также зерновой состав вымываемого заполнителя), оценивают фильтрационную прочность массива при заданных условиях работы сооружения.

4.6. Оценка фильтрационной прочности скальных массивов по данным их испытаний в натурных условиях требует значительных затрат на проведение опытов в объеме, достаточном для характеристики всего основания сооружения.

В отдельных случаях предварительное суждение о суффозионной устойчивости заполнителя может быть получено в результате более простого определения параметров трещиноватости массива и в первую очередь по наличию в нем крупных незаполненных трещин, которые являются потенциальными путями выноса продуктов суффозии из толщи массива. Вопрос о том, имеются ли в массиве такие трещины, решается путем специальных исследований забоев скважин и горных выработок на основании получения прямой, фотографической или телевизионной информации о трещиноватости окружающего скважину массива, например, с помощью буроскопа или скважинной телекамеры, разработанной в отделе изысканий Ленгидропроекта.

Для этой цели также может быть использован разработанный во ВНИИГе гидравлический способ определения раскрытий крупных трещин, «подсекаемых» разведочными скважинами. Способ описан в Приложении III.

Способы определения влияния сжимающих нагрузок на водопроницаемость трещиноватого скального массива

4.7. Скальный массив основания напорного гидротехнического сооружения подвергается воздействию фильтрационного потока и находится в условиях сложного напряженного состояния, в

связи с чем водопроницаемость, суффозионная устойчивость заполнителя трещин, деформативность и прочность массива определяются не только характером его трещиноватости (раскрытием, густотой и направлением трещин), но также существенно зависят от действующих на массив нагрузок: веса сооружения, гидростатического давления и давления фильтрующейся воды. По-

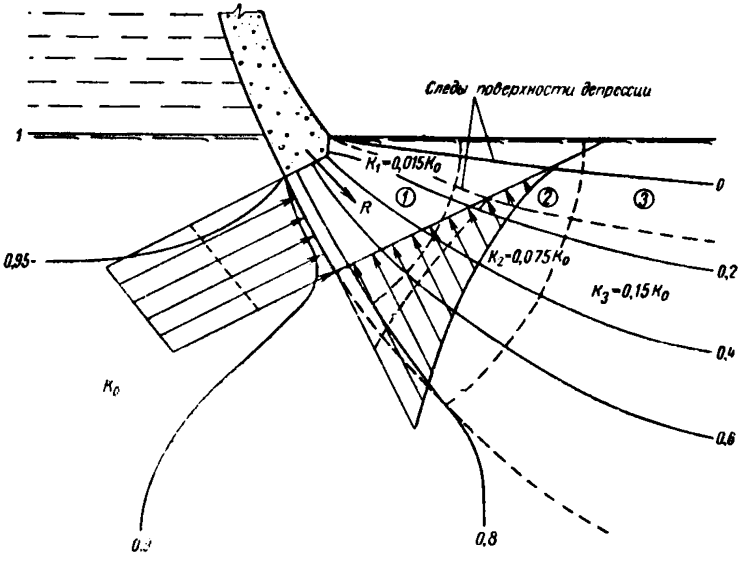


Рис. 16. Схема, поясняющая изменение противодавления в зоне примыкания арочной плотины к береговому скальному массиву в случае уменьшения его проницаемости от сжимающих напряжений. Распределение напора установлено в результате моделирования фильтрации методом ЭГДА при указанных на схеме отношениях между величинами проницаемости: массива—K_0 и трех выделенных в нем участков (*1*, *2*, *3*), непосредственно примыкающих к подошве плотины — K_1, K_2 и K_3. Для сравнения штриховыми линиями показаны эпюры противодавления при отсутствии уменьшения проницаемости массива.

этому при проведении инженерно-геологических изысканий, в особенности для проектирования высоких арочных плотин (рис. 16), следует выяснять, как будут изменяться водопроницаемость и фильтрационная прочность скального массива основания в зависимости от его напряженного состояния.

4.8. Для предварительного суждения об изменении проницаемости трещиноватого скального массива под действием сжимающей нагрузки можно воспользоваться следующей формулой:

$$\eta_c = \frac{c_\sigma}{c_0} = \left(1 - \frac{\sigma}{\Gamma\delta_0}\,\frac{E_п - E_c}{E_п \cdot E_c}\right)^3. \qquad (44)$$

Величину первоначального раскрытия δ_0 трещин в массиве можно, в свою очередь, определить методом последовательного приближения по формуле

$$\delta_0 = \sqrt[3]{\frac{12\nu\left(1+\frac{A}{\delta_0}\right)}{g\Gamma}} k_0 . \qquad (45)$$

или же пользуясь графиками на рис. 17.

4.9. Так как удельное приведенное водопоглощение скважины, проходящей в массиве, в котором преобладают трещины с раскрытием δ_0, равно:

$$q_r = \Gamma \frac{\pi g \delta_0^4}{6\nu(\delta_0 + A)\ln\frac{R}{r_0}}, \qquad (46)$$

следует ожидать, что существенное снижение проницаемости скального массива в результате действия нагрузок произойдет в этом случае, если $q_r < 0{,}01$ *л/мин. м.*

4.10. При оценке качества скального основания нельзя непосредственно переносить на натуру результаты испытаний небольших образцов. Тем не менее, во многих случаях лабораторными экспериментами могут быть выявлены некоторые общие закономерности в поведении скального массива и его качественные характеристики вполне справедливые для натуры, в особенности, если массив расчленен тонкими трещинами на мелкие блоки (отдельности).

Для определения в лабораторных условиях характера изменения проницаемости при всестороннем обжатии образцов такого мелкоблочного скального грунта можно использовать приборы типа «Керн», позволяющие проводить испытания цилиндрических образцов — кернов диаметром от 50 до 150 *мм* при дивергентной (расходящейся) и конвергентной (сходящейся) фильтрации. Методика испытаний и конструкция прибора поясняются в Приложении IV.

4.11. Наиболее достоверные сведения о характере изменения фильтрационно-суффозионных свойств скального грунта получают, проводя испытания в натуре, для чего с помощью специальных устройств воспроизводят в заданной области массива расчетное напряженное его состояние и прогнозируемые условия фильтрации. Характер изменения водопроницаемости и одновременно фильтрационная прочность скального грунта в натурных условиях (in situ) могут быть определены различными способами, возможные варианты реализации которых поясняются в Приложении V.

Определение водопроницаемости скальных массивов

4.12. Основными видами полевых опытных работ для определения фильтрационных характеристик скальных массивов яв-

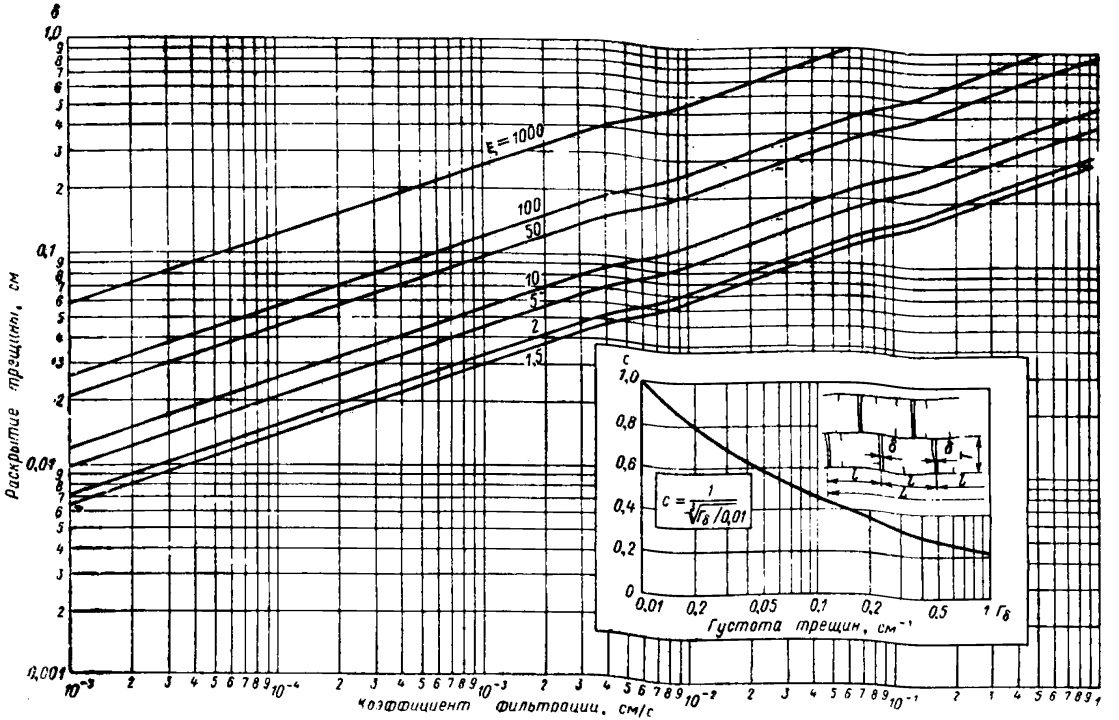


Рис 17. Графики зависимостей между коэффициентом фильтрации скального массива и раскрытием находящихся в нем трещин, параллельных направлению фильтрационного потока, густоте которых равна 0,01 $см^{-1}$. Для определения с помощью этих графиков раскрытия трещин с другой густотой Γ_δ найденную при $\Gamma=0{,}01$ $см^{-1}$ величину раскрытия следует умножить на $C = 1/\sqrt[3]{\Gamma_\delta/0{,}01}$, в связи с чем на данном рисунке показан график зависимости $C(\Gamma_\delta)$.

ляются опытные откачки из скважин, опытные нагнетания в скважины, опытные наливы в скважины и шурфы.

С помощью опытных откачек, нагнетаний и наливов в скважины могут определяться коэффициент фильтрации, коэффициент пьезопроводности и трещинная пустотность (свободная пористость) массива.

4.13. Перед проведением опытных откачек, нагнетаний и наливов в скважины должна быть определена расчетная схема опыта, *которая в основном зависит от следующих факторов*:

1) гидрогеологических характеристик пласта (напорный, безнапорный, мощность и степень неоднородности, конфигурация внешних границ);

2) степени вскрытия пласта скважиной и размещения ее рабочей части в пласте;

3) режима откачки (стационарный или нестационарный).

4.14. При расчете коэффициента фильтрации по данным откачки из одиночной скважины, удаленной на большое расстояние от внешних границ пласта, должны использоваться только уравнения неустановившейся фильтрации.

Те же уравнения должны использоваться и при откачке на опытных кустах скважин в случае недостаточной стабилизации потока, а при достаточной стабилизации — уравнения установившегося движения (формулы Дюпюи-Тима).

4.15. При опытных откачках и нагнетаниях следует применять несовершенные скважины, так как в этом случае существенное изменение напоров произойдет лишь в сравнительно ограниченной области водоносного пласта, чем можно воспользоваться для зонального определения его водопроницаемости по глубине вместо осредненного значения водопроницаемости всего пласта.

4.16. Если при определении коэффициента фильтрации по данным кустовой откачки в напорном пласте расстояние от наиболее удаленной наблюдательной скважины до опытной (центральной) меньше, чем до боковой границы пласта(например, реки), то в этом случае можно пользоваться формулой

$$k = \frac{Q}{2\pi T (s_0 - s_1)} \ln \frac{r_1}{r_0}, \qquad (47)$$

где r_1 — расстояние наблюдательной скважины от опытной; s_0 и s_1 — понижения в опытной и наблюдательной скважинах; T — мощность пласта.

4.17. В тех случаях, когда опытные откачки проводятся в пласте, имеющем относительно менее проницаемые подошву и кровлю, длину рабочей части скважины l необходимо назначать так, чтобы $l \geqslant 0{,}1T$. Если соблюдение этого условия затруднено, может быть принята схема пласта неограниченной мощности.

При определении коэффициента фильтрации пластов с более проницаемыми подошвой и кровлей следует принимать расчетную схему пласта неограниченной мощности. При этом опытная скважина должна иметь рабочую часть длиной не более $0{,}1T$ и быть

удаленной от ближайшей к ней границы не менее чем на одну треть мощности пласта. При соблюдении этих условий влиянием границ пласта можно пренебрегать.

При выборе расчетной схемы опыта необходимо учитывать внутреннюю неоднородность пласта. В частности, если пласт ограниченной мощности неоднороден, целесообразно опытные скважины устраивать несовершенными и размещать их в зонах с разной проницаемостью. Выполняя при этом те же условия, можно определить коэффициенты фильтрации отдельных зон (пропластков) водоносного пласта.

4.18. При опытных нагнетаниях и наливах в неводоносные породы напор в опытной скважине не должен превышать 0,1 высоты образующейся при нагнетании зоны водонасыщения пласта.

4.19. Откачки и нагнетания должны производиться с постоянным расходом (дебитом) или понижением в опытной скважине. Какие-либо другие режимы усложняют оценку фильтрационных характеристик пласта.

Наиболее достоверно эти характеристики определяются по понижениям в контрольных скважинах, длина и размещение водоприемной части которых должны быть такими же, как и в опытной скважине. При этом скважины необходимо располагать примерно по нормали к направлению естественного потока грунтовых вод.

Определение коэффициента фильтрации по данным откачек в пласте неограниченной мощности

4.20. При наличии одиночной скважины в напорном пласте и установившемся режиме фильтрации

$$k = 0{,}366\frac{Q \lg\left(1{,}47\frac{l}{\zeta r_0}\right)}{ls_0}, \tag{48}$$

где $\zeta=1$ — при расположении водоприемной части скважины у кровли и подошвы пласта и $\zeta=2$ — при расположении ее внутри пласта.

В случае центральной и наблюдательной скважин

$$k = \frac{Q}{2\pi l (s_0 - s_1)}\left[N\left(\frac{l}{\zeta r_0}\right) - N\left(\frac{l}{\zeta r_1}\right)\right]. \tag{49}$$

Здесь при $\frac{l}{\zeta r_0} \geqslant 10$

$$N\left(\frac{l}{\zeta r_0}\right) = \ln\left(1{,}47\frac{l}{\zeta r_0}\right). \tag{50}$$

В случае двух наблюдательных скважин

$$k = \frac{Q}{2\pi l (s_1 - s_2)}\left[N\left(\frac{l}{\zeta r_1}\right) - N\left(\frac{l}{\zeta r_2}\right)\right]. \tag{51}$$

Формулы (49) и (51) относятся к напорному и безнапорному пластам.

4.21. Коэффициент фильтрации пласта неограниченной мощности можно определять по результатам опытной откачки в условиях неустановившегося ее режима, используя для этого данные по одной скважине (центральной или наблюдательной) или по двум (наблюдательным, либо наблюдательной и центральной).

В случае откачки с постоянным дебитом:

$$k = -\frac{Q}{4\pi l_{s_1}} \operatorname{Ei}(-u_1), \tag{52}$$

где $\operatorname{Ei}(-x) = \int_{-\infty}^{-x} \frac{e^x}{x} dx$ — интегральный экспоненциал, значения которого приведены в справочниках по математике; u_1 — находятся с помощью способа последовательных приближений из уравнения.

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\operatorname{Ei}(-u_1)}{\operatorname{Ei}\left(-u_1 \frac{t_1}{t_2}\right)}. \tag{53}$$

При незатопленном фильтре скважины, расположенной в безнапорном пласте, величина l принимается равной

$$l = l_0 - 0{,}25\,(s_0' + s_0''), \tag{54}$$

где l_0 — глубина погружения водоприемной части скважины ниже естественного уровня подземных вод; s_0' и s_0'' — понижения в опытной скважине в моменты времени t_1 и t_2.

В случае откачки при постоянном понижении в центральной скважине для напорного и безнапорного пластов

$$k = 0{,}183 \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 - Q_2} \frac{\lg \frac{t_2}{t_1}}{lS_0}. \tag{55}$$

Эта формула применима, когда

$$1{,}32 \leqslant \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \ln \frac{t_2}{t_1} \leqslant 2 \frac{Q_2}{Q_1} \ln \left(1{,}47 \frac{l}{\zeta r_0}\right).$$

В случае наблюдательной скважины для напорного и безнапорного пластов

$$k = 0{,}183 \frac{\lg \frac{t_2}{t_1}}{l\left(\frac{s_2}{Q_2} - \frac{s_1}{Q_1}\right)}. \tag{56}$$

Эта формула применима, если

$$1{,}32 \leqslant \frac{\left(\frac{s_1}{Q_1}\right)}{\left(\frac{s_2}{Q_2}\right) - \left(\frac{s_1}{Q_1}\right)} \ln \frac{t_2}{t_1} \leqslant 2 \frac{s_1}{s_2} \frac{Q_2}{Q_1} N\left(\frac{l}{\zeta r_0}\right).$$

Определение коэффициента фильтрации пласта по данным опытных нагнетаний

4.22. Опытные нагнетания являются основным методом оценки водопроницаемости скальных и полускальных массивов, расположенных выше уровня грунтовых вод (в зоне аэрации).

При нагнетаниях в водоносные зоны массива применимы расчетные формулы для опытных откачек. Только в этих формулах необходимо вместо понижения (s) принимать повышение напора во время нагнетания, взятое с обратным знаком.

Для определения коэффициента фильтрации по данным нагнетаний в неводонасыщенные зоны используются другие формулы, учитывающие обстоятельства насыщения массива (пласта) водой.

4.23. При нагнетании с постоянным расходом воды в скважину, расположенную в пласте ограниченной мощности, коэффициент фильтрации можно определить по формуле:

$$k = 0{,}183 \frac{Q \lg \frac{t_2}{t_1}}{(s_2 - s_1) l}, \qquad (57)$$

где s_1 и s_2 — напоры воды в скважине, измеряемые от верха опытного интервала в моменты времени t_1 и t_2.

4.24. При нагнетании воды с постоянным дебитом в несовершенную скважину, расположенную в пласте неограниченной мощности и наличии одной наблюдательной (контрольной) скважины

$$k = 0{,}366 \frac{Q \lg \frac{r}{r_0}}{(s_r + 0{,}5l) l}, \qquad (58)$$

где r — расстояние наблюдательной скважины от центральной; s_r — напор в опытной скважине над верхом ее водоприемной части в момент времени t_r после начала нагнетания, когда в наблюдательной скважине появилась вода.

5. МЕТОДИКА ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

5.1. Экспериментальные исследования, проводимые в лабораторных условиях, позволяют во многих случаях, при сравнительно небольших затратах средств, получать в достаточном объеме необходимые сведения об основных закономерностях движения воды в трещинах, о проницаемости заполнителя трещин и его сопротивляемости воздействию фильтрационного потока. В какой мере эти данные могут характеризовать действительное поведение изучаемого объекта зависит от того, насколько полно в лабораторном эксперименте удалось воспроизвести натурные условия. Поэтому, как правило, в основе лабораторных исследований должен лежать принцип испытаний образцов конкретного заполнителя или грунта с естественным сложением (структурой). Желательно вместе с тем перейти в дальнейшем к испытаниям сравнительно небольших (вмещающих заполнитель) частей скального массива, для чего, однако, необходимо разработать неразрушающие способы извлечения образцов-монолитов соответствующих размеров. Во всяком случае, это надо учитывать при выборе

методики полевых опытных работ, включенных в программу изысканий. Таким образом, для изучения в лабораторных условиях фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований должна быть создана специальная аппаратура, приближающая условия испытаний к натурным.

5.2. Водопроницаемость и суффозионную устойчивость несвязного материала тектонического дробления скальных пород, а также терригенного материала, заполняющего отдельные наиболее крупные трещины разгрузки в бортах каньона, можно определить в лабораторных условиях с помощью фильтрационно-суффозионного прибора, позволяющего воспроизвести условия для первого и второго видов механической суффозии. Описание конструкции этого прибора дано в Приложении VI.

5.3. Устойчивость заполнителя трещин к поверхностному размыву, также как и сопротивляемость эрозии самой породы, слагающей стенки трещин (третий и шестой виды суффозии) следует определять, изучая экспериментальным путем условия возникновения этих двух видов суффозии в щелевом лотке.

Один из вариантов конструкции суффозионного щелевого лотка, разработанный в лаборатории фильтрационных исследований ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, рассмотрен в Приложении VII.

5.4. Суффозионная устойчивость заполнителя или глинистого пропластка при боковом размыве в устьях оперяющих его открытых трещин (четвертая форма суффозии) может быть определена при испытании образцов заполнителя на установках, получивших название «Бора». Одна из таких установок (Бора-1) показана на рис. 27, а ее описание дано в Приложении VIII.

5.5. Испытания образцов заполнителя с целью определения его устойчивости к внутреннему продольному размыву и выдавливанию из трещин (второй и пятый виды суффозии) при соблюдении условий, близких к натурным, можно осуществить с помощью установок двух типов, описание которых дано в Приложении IX.

Приложение I

Таблица характеристик шероховатости поверхностей разрыва образцов песчано-цементного камня, песчаника, бетона и некоторых скальных пород [1]

№ световых сечений	Длина профилограммы l_1, *см*	Длина проекции профилограммы l_2, *см*	Коэффициент развития профиля $x_1=l_1/l_2$	Коэффициент развития поверхности $x_2=x_1^2$	Абсолютная величина выступов макрошероховатости $\Delta_в$, *см*	Густота выступов макрошероховатости $\Gamma_в$, $см^{-1}$
I. Песчано-цементный камень (состав 1 : 2; В/Ц = 0,5)						
1	28,2	27,40	1,03	1,06	0,256	0,8
2	29	27,8	1,042	1,085	0,179	1,2
3	29,5	27,8	1,081	1,17	0,211	1,4
4	28,4	26,9	1,056	1,115	0,158	1,4
5	28,0	26,1	1,071	1,150	0,115	0,8
6	28,0	26,2	1,069	1,140	0,181	1,2
	Средние значения		1,054	1,111	0,184	1,13
II. Песчаник (Нурекский гидроузел)						
7	28,5	27,9	1,021	1,042	0,143	0,2
8	28,2	27,85	1,012	1,025	0,152	0,8
9	29,0	28,1	1,031	1,061	0,160	1,0
10	27,9	26,8	1,041	1,082	0,149	0,8
	Средние значения		1,023	1,045	0,151	0,7
III. Бетон (состав 1 : 0, 7 : 1,7; В/Ц = 0,5)						
20	30,8	27,8	1,11	1,23	0,252	1,2
21	34,0	28,1	1,21	1,46	0,356	0,6
22	29,7	27,8	1,069	1,140	0,270	0,6
23	28,7	27,0	1,06	1,13	0,343	1,2
	Средние значения		1,100	1,217	0,306	0,9

[1] Некоторые скальные породы (по данным, опубликованным в работе И. М. Грушко, Н. Ф. Глущенко и А. Г. Ильина. Структура и прочность дорожного цементного бетона, изд. Харьковского университета, 1965 г.).

Вид скальной породы	Коэффициент развития поверхности x_3
Гранит мелкокристаллический	1,24
Гранит крупнокристаллический	1,15
Известняк	1,08

Приложение II

Способ испытания на суффозионную устойчивость заполнителя крупных тектонических трещин, выходящих на дневную поверхность скального массива

Испытание производится по схеме (рис. 18), на которой показан фрагмент скального массива, рассеченный тектонической трещиной, заполненной материалом дробления вмещающих пород, фильтрационную прочность которого необходимо определить в естественных условиях. Для этого на поверхности скального массива (основания) в месте, наиболее характерном и опасном в отношении возможного размыва заполнителя трещины устраивают покрытие в виде железобетонной плиты прибетонированной и затем прижатой с помощью анкеров к поверхности массива. Через эту плиту пробуривают в массиве, на некотором расстоянии одна от другой, две горизонтальные скважины, с таким расчетом, чтобы они «подсекали» трещину на протяжении двух-трех метров. В скважины вставляют затем трубы, перфорированные концевые участки которых должны находиться в трещине. Остальное затрубное пространство уплотняют. Между этими скважинами, верхняя из которых является нагнетательной, а нижняя — дренажной, пробуривают еще одну или две наблюдательные (контрольные) скважины меньшего диаметра, служащие для измерения напора фильтрационного потока в трещине. В наблюдательные скважины также помещают перфорированные на конце трубки и к ним присоединяют манометры.

После выполнения указанных операций приступают к проведению самого эксперимента по установлению фильтрационной прочности заполнителя трещины. Перед этим вначале насыщают заполнитель водой, которую через нижнюю (дренажную) трубу нагнетают при небольшом давлении в трещину. Одновременно через открытые контрольные трубки наблюдают за передвижением воды по трещине, затем к трубам присоединяют манометры. Сразу же после окончания водонасыщения насос подключают к верхней скважине (трубе), через которую начинают нагнетать воду в трещину, увеличивая ее давление ступенями. При этом железобетонная плита препятствует выходу на поверхность нагнетаемой воды, благодаря чему, в трещине создаются условия

одномерной фильтрации. Давление на каждой ступени выдерживают постоянным в течение 3—4 *ч*. За это время делают измерения расходов воды, поступающей в нагнетательную и дренажную скважины, а также напоров внутри трещины.

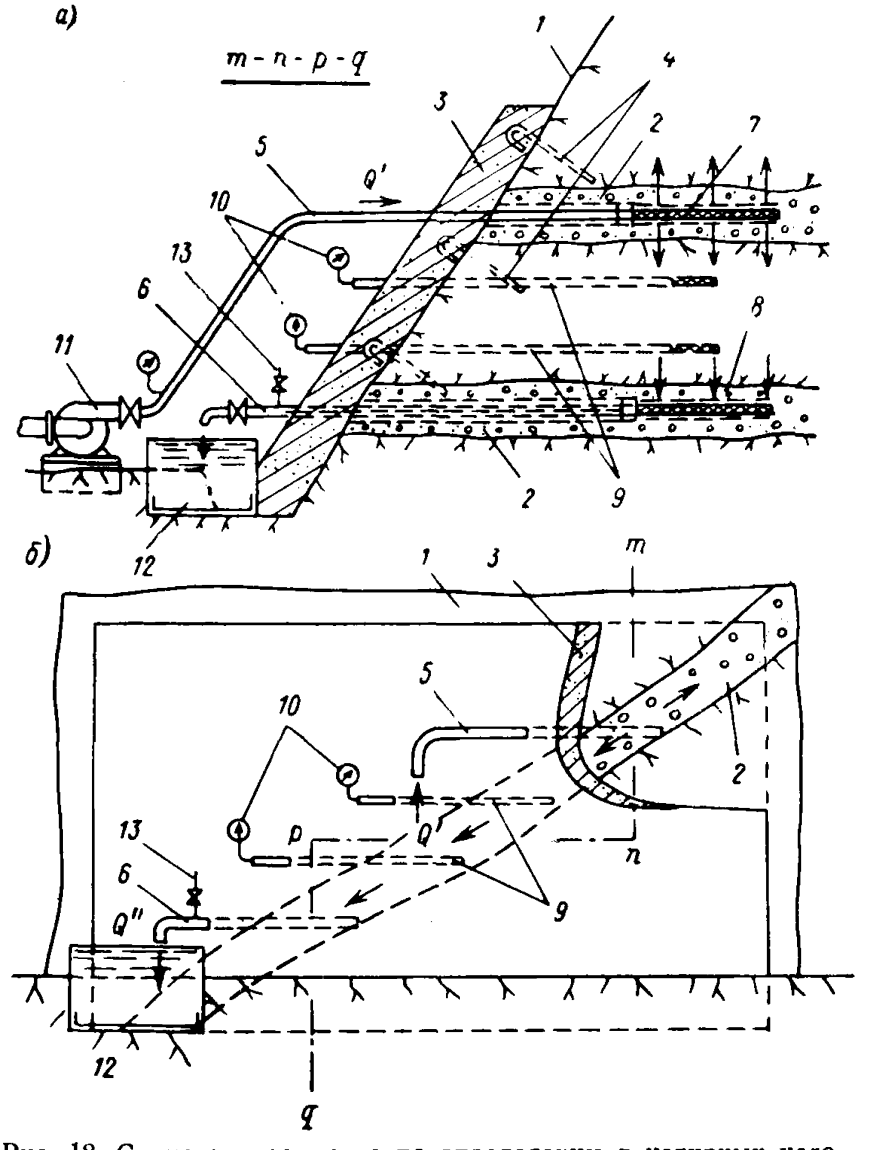


Рис. 18. Схема эксперимента по определению в натурных условиях суффозионной устойчивости заполнителя отдельных, наиболее крупных трещин, выходящих на поверхность скального массива

а—поперечный разрез по линии *m—n—p—q*; *б*—вид со стороны лицевой поверхности плиты; *1*—фрагмент скального массива; *2*—тектоническая трещина; *3*—железобетонная плита; *4*—анкеры; *5—6*—трубы; *7—8*—перфорированные концевые участки труб; *9*—контрольные скважины; *10*—манометры; *11*—насос; *12*—отстойник; *13*—трубка для вымыва частиц грунта.

В случае размыва фильтрационным потоком заполнителя трещины мелкие его частицы будут выноситься в дренажную скважину, откуда их можно периодически вымывать в отстойник при помощи введенной внутрь скважины трубки.

Общее количество вымытых за время испытаний частиц, а также относительное увеличение проницаемости заполнителя позволяют характеризовать суффозионную его устойчивость.

Приложение III

Гидравлический способ определения раскрытий крупных полых трещин в скальном массиве

Особенность способа состоит в том, что нагнетаемая в скважину вода целиком поглощается одиночной полой трещиной. Поступление воды в трещину без посторонних ее утечек (в том числе, в соседние трещины) обеспечивается следующим образом.

На участке предполагаемого выхода в скважину полых трещин помещают баллон, выполненный из непроницаемого эластичного материала, например, резины и подают внутрь баллона воду. Постепенно повышая давление воды, доводят его до величины, при которой происходит разрыв баллона в том месте, где стенка скважины пересекается наиболее крупной трещиной. Эта величина зависит от прочности материала баллона и раскрытия трещин (как показали опыты, баллон из резины толщиной не более 0,5 *мм*, разрывается в устье трещины с раскрытием свыше 1 *мм* при давлении порядка нескольких атмосфер). Затем воду через разорванную оболочку нагнетают в трещину уже при сравнительно небольшом давлении (не более одной атмосферы) и одновременно измеряют расход и напор; после чего соответствующими расчетами по формулам для случая осе-симметричной фильтрации определяют раскрытие трещины.

Этот способ определения раскрытий полых трещин в скальных массивах поясняется чертежами на рис. 19. На рис. 19, *а* схематически показана установка, с помощью которой можно осуществить нагнетание воды в одиночную трещину с целью определения ее раскрытия. Здесь в предварительно выбуренной скважине *1* размещен эластичный баллон *2*, перекрывающий устье трещины *3*, которая «подсечена» скважиной. Баллон *2* соединен трубкой *4*, через расходомер *5*, с насосом *6*. К трубке также подключен манометр *7*.

Индексом «д» на рисунке обозначен узел, который в увеличенном виде показан на рис. 19,*б*.

Таким образом, под напором, создаваемым насосом, вода из трубки через разрыв в баллоне поступает в трещину и растекается в радиальных направлениях. Расход поглощаемой трещиной воды в данном случае подсчитывается по формуле (12).

Из этой формулы видно, что приведенный расход фильтрации в трещине $q=Q/H_0$ очень сильно зависит от ее раскрытия. Вместе с тем практически возможное изменение расстояния до контура стока R мало повлияет на величину расхода, так как R вхо-

дит под знак логарифма. Следовательно, по измеренному расходу q можно с большой степенью точности определить раскрытие трещины δ, в чем состоит преимущество этого способа перед другими.

Надо особо отметить, что даже при частичном разрыве оболочки баллона (разрыв не по всему периметру устья трещины в

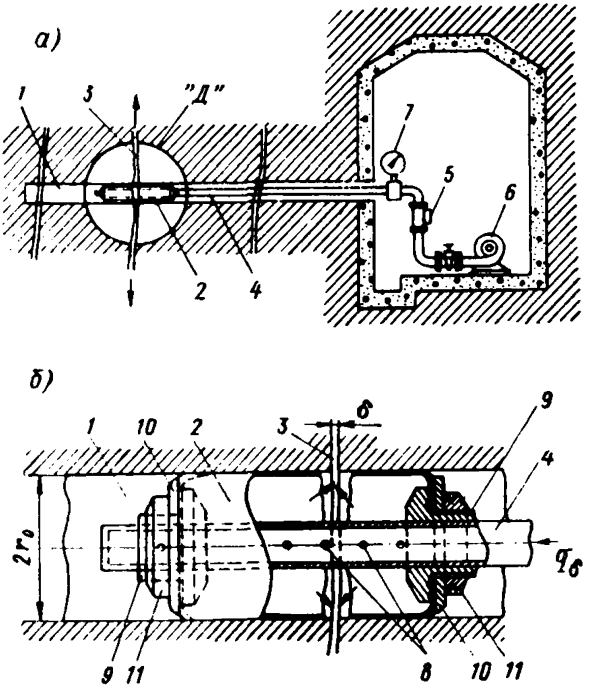


Рис. 19. Гидравлический способ определения раскрытия полых трещин в скальном массиве

1—скважина; *2*—эластичный баллон; *3*—трещина; *4*—подводящая трубка с заглушкой на конце; *5*—расходомер; *6*—насос; *7*—манометр; *8*—отверстия для выхода воды из трубки внутрь балона; *9*—втулки, приваренные к подводящей трубке; *10*—кольцевые диски; *11*—гайки, навинчивающиеся на втулки.

скважине) величина приведенного расхода изменится незначительно. Так, при разрыве на половине периметра расход снижается всего лишь на 26%, что соответствует семи-восьмипроцентной погрешности в определении раскрытия трещины. Такого же порядка погрешность получается вследствие неточности в оценке расстояния до контура стока. Например, фактическое снижение R в два раза по сравнению с принятым в расчетах дает ошибку в определении около 5%.

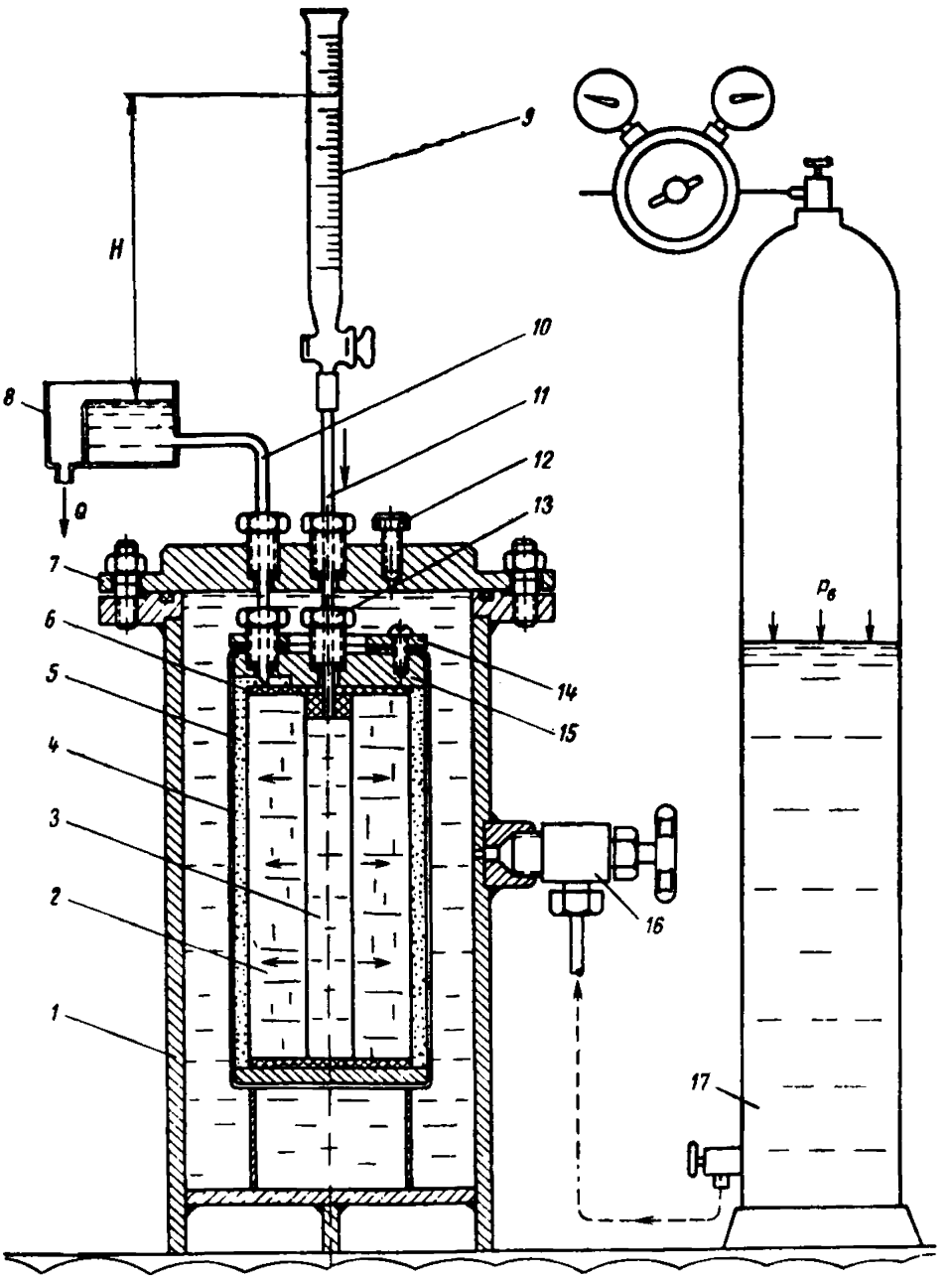


Рис. 20. Продольный разрез прибора „Керн" для испытаний на водопроницаемость образца скального грунта при всестороннем его обжатии

1—цилиндрический корпус прибора; *2*—образец (керн) скальной породы; *3*—осевая полость (скважина), выбуренная по оси образца; *4*—гибкая непроницаемая оболочка; *5*—дренажный слой зернистого материала (песка); *6*—резиновая прокладка, приклеенная к торцевой поверхности образца; *7*—крышка; *8*—сливной бачок; *9*—мерный сосуд, из которого вода поступает во внутреннюю полость образца; *10*—сливная трубка, через которую вода выпускается из дренажного слоя; *11*—центральная трубка, проходящая в осевую полость образца; *12*—ниппель для выпуска воздуха; *13*—гайка для герметизации центрального отверстия в верхнем фланце; *14*—прижимное кольцо, с помощью которого крепится гибкая оболочка к верхнему фланцу; *15*—верхний фланец; *16*—кран, через который подается жидкость в рабочую камеру; *17*—резервуар с жидкостью, находящейся под избыточным давлением.

Приложение IV

Определение в лабораторных условиях с помощью прибора типа «Керн» характера изменения проницаемости образца скального грунта при всестороннем его обжатии

Прибор типа «Керн» (рис. 20) позволяет испытывать цилиндрический образец скального грунта при дивергентной и конвергентной фильтрации и одновременном его обжатии внешним гидростатическим давлением.

В первом случае вода из мерного сосуда поступает во внутреннюю полость испытываемого образца и растекается по трещинам или порам к наружной его поверхности, где попадает в зернистую обсыпку (дренажный слой), а затем вытекает из этого слоя по трубке в сливной бачок. При дивергентной фильтрации движение воды осуществляется в обратной последовательности, в связи с чем мерный сосуд и сливной бачок надо поменять местами.

Во время фильтрации воды через образец его можно подвергнуть всестороннему обжатию давлением жидкости, поступающей в рабочую камеру прибора из резервуара. Под действием этого давления, передаваемого на поверхность образца через гибкую непроницаемую оболочку, раскрытие трещин в образце, следовательно, его проницаемость будет уменьшаться. В результате определений расходов фильтрации при постоянном напоре и различном давлении становится ясным характер изменения проницаемости образца в зависимости от величины всестороннего его обжатия.

Приложение V

Способ определения in situ фильтрационно-суффозионных и деформативно-прочностных свойств скального грунта при сложном напряженном его состоянии

Данный способ, иллюстрируемый схемой на рис. 21, позволяет одновременно определять водопроницаемость, суффозионную устойчивость заполнителя трещин, деформативность и механическую прочность скального массива при различных заданных сочетаниях сжимающих осевых и поперечных нагрузок и фильтрационных режимах.

Для этого на одном из характерных участков исследуемого массива с предварительно выровненной и зачищенной поверхностью намечают положение целика, который должен быть выделен из массива траншеей. Перед этим в целике выбуривают центральную скважину, или создают длинную щель (в случае необходимости испытания по схеме плоской задачи), после чего производят его обуривание.

Заданное напряженное состояние выделенного таким образом целика обеспечивают приложением к нему в определенном сочетании осевой и боковой нагрузок. Осевая нагрузка создается с помощью гидравлических домкратов, передающих усилие на целик через полый штамп и уплотняющую прокладку. В случае

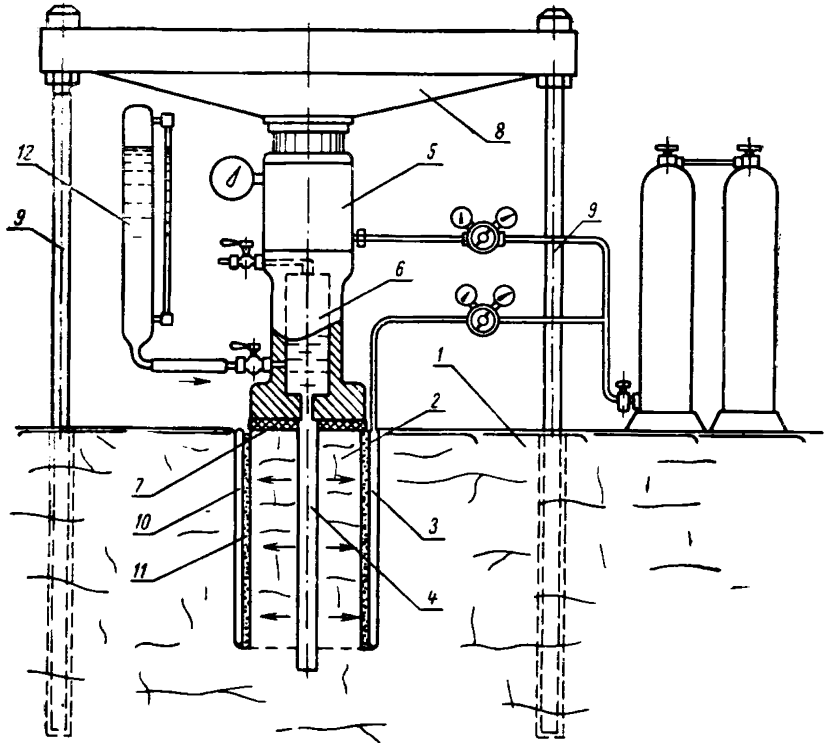


Рис. 21. Схема, поясняющая способ определения в натурных условиях фильтрационно-суффозионных и деформативно-прочностных свойств скального массива в зависимости от его напряженного состояния

1—скальный массив; *2*—испытываемый целик; *3*—периметральная траншея (прорезь); *4*—центральная скважина; *5*—гидравлический домкрат; *6*—полый штамп; *7*—уплотняющая прокладка; *8*—опорная траверса; *9*—анкерные тяги; *10*—гидравлические подушки; *11*—дренажная засыпка; *12*—мерный сосуд.

проведения эксперимента на открытых площадках упором для домкратов может служить траверса с анкерными тягами, закрепленными в скальном массиве. При проведении опытов в горных выработках домкраты опираются в потолочную упорную плиту. Боковая нагрузка (обжатие целика) создается помещенными в траншею плоскими гидравлическими домкратами-подушками. Предварительно между этими подушками и целиком помещают дренажную прослойку, например, в виде песчаной или гравийной засыпки.

Фильтрационный поток создают путем нагнетания при определенном напоре воды в центральную скважину, из которой она по трещинам фильтруется в направлении дренажной засыпки. Величину напора и расход воды контролируют любыми известными способами, например, с помощью напорного мерного сосуда.

Водопроницаемость (коэффициент фильтрации) испытываемой части массива (целика) определяют по данным измерений расхода и напора воды для каждой ступени загружения и, тем самым, устанавливают изменение водопроницаемости в зависимости от напряженного состояния целика, а по изменению его проницаемости во времени (при постоянном напоре и заданном напряженном состоянии) определяют суффозионную устойчивость заполнителя трещин.

В соответствии с разработанным способом в установке предусмотрена возможность измерения осевых и радиальных деформаций (смещений) породы в отдельных точках целика. Так, для фиксации радиальных смещений его боковой поверхности используются расположенные в траншее измерительные скважины, в которых помещены дистанционные датчики перемещения известных конструкций. Осевые смещения целика измеряют на фиксированных высотах в центральной скважине с помощью штанги, на которой крепятся измерительные приборы (например, индукционные датчики перемещений).

По измерениям осевых и радиальных деформаций для каждой ступени нагружения целика определяют деформативные свойства скального массива при наличии в нем фильтрационного потока. Доводя затем целик до разрушения осевой нагрузкой при известной величине бокового обжатия и заданной интенсивности фильтрационного потока можно определить прочность испытываемой части массива в условиях фильтрации и сложного напряженного состояния.

Следует иметь в виду, что при выделении целика из массива может произойти нарушение естественного сложения (разуплотнение) скального грунта и, в особенности, заполнителя трещин. Учитывая данное обстоятельство, целесообразно в таких случаях проводить испытания, не выделяя целика. Однако, чтобы избежать при этом быстрого затухания по глубине сжимающих напряжений, необходимо анкерную тягу опорной траверсы поместить в саму нагнетательную скважину, как это показано на рис. 22, *а*.

Здесь анкерная тяга одним своим концом укреплена («заделана») в нижней части скважины, приустьевой участок которой оставлен свободным. С другого конца тяга проходит через манжет и нагрузочную плиту-штамп. Для герметизации скважины в плите имеются сальниковое уплотнение и концентрические канавки с помещенными в них уплотнительными кольцами.

В месте расположения сальникового уплотнения в плите также имеются отверстия с присоединенными к ним трубками, через

которые подается вода в скважину и в манжет. Далее анкерная тяга проходит через траверсу, являющуюся упором для гидравлических домкратов, с помощью которых создается в скале сжимающая нагрузка. На выступающих концах анкерной тяги нарезана резьба и навинчена гайка, удерживающая траверсу при создании нагрузок.

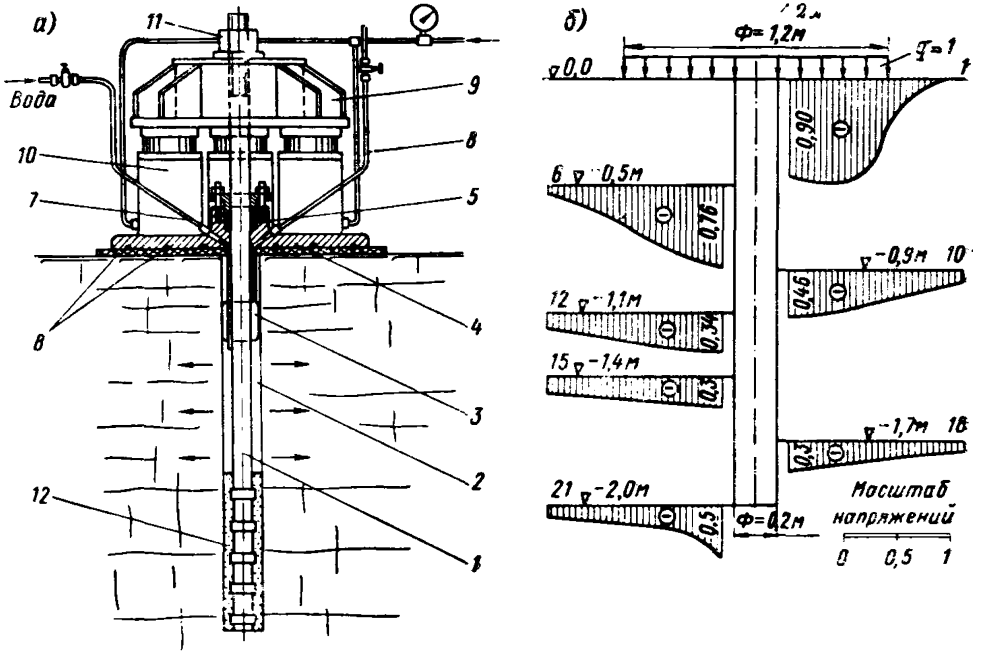


Рис. 22. Устройство для испытания скального массива на водопроницаемость и фильтрационную прочность (*а*) и эпюры вертикальных сжимающих напряжений при обжатии (*б*) скального массива круглым штампом диаметром 1,2 *м*, заанкеренным в центрально расположенной скважине диаметром 0,2 *м* и глубиной 2 *м*

1—анкерная тяга; *2*—скважина; *3*—манжет; *4*—нагрузочная плита-штамп; *5*—сальниковое герметизирующее уплотнение; *6*—уплотнения; *7*—трубка для подачи воды в скважину; *8*—трубка для подачи воды в манжет; *9*—опорная траверса; *10*—гидравлические домкраты; *11*—гайка; *12*—материал заделки анкерной тяги.

Испытания скалы на водопроницаемость и фильтрационную прочность с помощью этого устройства осуществляют следующим образом.

Стальную тягу помещают в предварительно выбуренную в массиве скважину и нижний конец тяги анкеруют, оставляя свободным от заделки остальной участок скважины. Здесь на определенной глубине (примерно равной диаметру штампа), где практически выравниваются эпюры сжимающих напряжений, устанавливают гидравлический манжет-тампон, через который прохо-

дит тяга. После этого на выровненной поверхности массива укладывают нагрузочную плиту-штамп, пропустив тягу через сальниковое уплотнение в ней. На плите размещают гидравлические домкраты, а над ними упорную траверсу, укрепляя ее на конце тяги гайкой. Затем по трубке подают под давлением воду в манжет, плотно прижимающийся к стенкам скважины, вследствие чего в ней выделяется участок, в пределах которого осуществляют испытания массива на водопроницаемость и фильтрационную прочность. Для этого по трубке в скважину подается вода, которая растекается в поперечном направлении по трещинам в окружающий скважину массив. Одновременно с помощью домкратов увеличивают обжатие испытываемого пласта в массиве, находящегося между штампом и заделкой анкерной тяги. Поскольку сжатие пласта в этом случае осуществляется с двух сторон, поле напряжений оказывается более однородным, что подтверждается показанными на рис. 22, *б* эпюрами вертикальных напряжений, полученных в результате расчетов на электронно - вычислительной машине по методу конечных элементов.

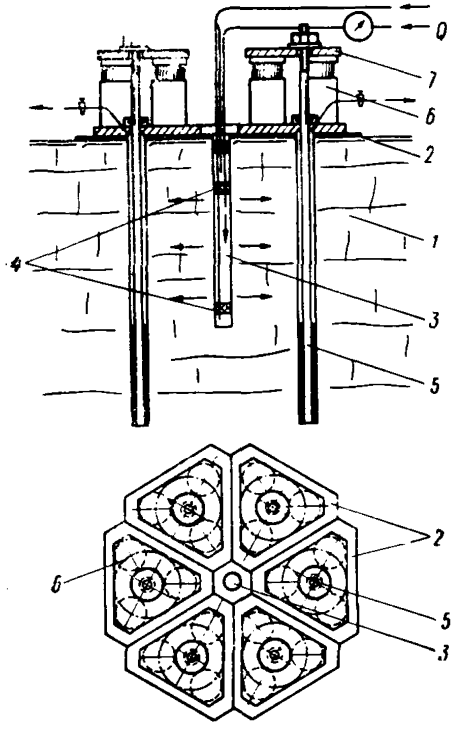


Рис. 23. Схема испытаний скального массива на водопроницаемость и фильтрационную прочность при нагружении его шестью треугольными штампами

1—скальный массив; *2*—нагрузочные штампы; *3*—скважина; *4*—тампон-манжеты, выделяющие в скважине участок, из которого осуществляют нагнетание воды в окружающий массив; *5*—заанкеренные в массиве тяги; *6*—домкраты; *7*—траверсы.

По данным измерений расхода и напора воды на каждой ступени загружения устанавливают характер изменения водопроницаемости скального грунта в зависимости от его напряженного состояния.

По изменению проницаемости во времени при данном напоре воды и напряженном состоянии массива определяют суффозион-

ную устойчивость (фильтрационную прочность) заполнителя трещин.

С помощью нескольких таких устройств можно создать равномерное и более интенсивное обжатие скального массива в значительном объеме, как это схематически показано на чертеже рис. 23. В данном случае массив нагружается шестью одинаковыми треугольными штампами. Определение водоупорных свойств скального грунта при этом осуществляется путем нагнетания воды в центрально расположенную скважину, концевые участки которой имеют отдельное питание, в связи с чем резко уменьшается искажение формы осерадиального фильтрационного потока.

Приложение VI

Прибор для испытаний несвязного зернистого материала (заполнителя трещины) на водопроницаемость и устойчивость по отношению к первому и второму видам механической суффозии

Прибор, схематически показанный на рис. 24, работает следующим образом: на нижнюю решетку рабочей камеры укладывают подстилающий дренажный слой гравия, а на него — испытываемый грунт (заполнитель), пригружаемый распределительным слоем и верхней решеткой. Затем камеру закрывают крышкой, через которую проходит шток, передающий на верхнюю решетку усилие от домкрата. Создав предварительно требуемое давление на грунт, обойму поворачивают с помощью червячного механизма, наклоняя помещенную в обойму рабочую камеру и обеспечивая тем самым во время замачивания грунта благоприятные условия для удаления воздуха, находящегося в порах дренажного слоя или под решеткой. Вытесняемый воздух выходит через предусмотренный с этой целью краник, расположенный несколько ниже грунта.

Убедившись в полном удалении воздуха, вновь устанавливают рабочую камеру прибора в вертикальном положении и завершают насыщение грунта водой. После этого начинают испытания грунта на фильтрацию и суффозию, пропуская через него поток воды с постепенно возрастающим напором.

Проницаемость грунта определяют в процессе испытаний по расходу фильтрации и градиентам напора, а интенсивность суффозии — по нарастанию веса частиц, выпавших в чашку седиментометра, в качестве которого можно, например, использовать торзионные весы. В данном приборе это обеспечивается тем, что через отстойник имеется прямой доступ к грунтосборнику с находящейся в нем чашкой седиментометра.

Рабочую камеру вместе с обоймой также можно поворачивать вокруг вертикальной оси вилки. Это создает определенные удоб-

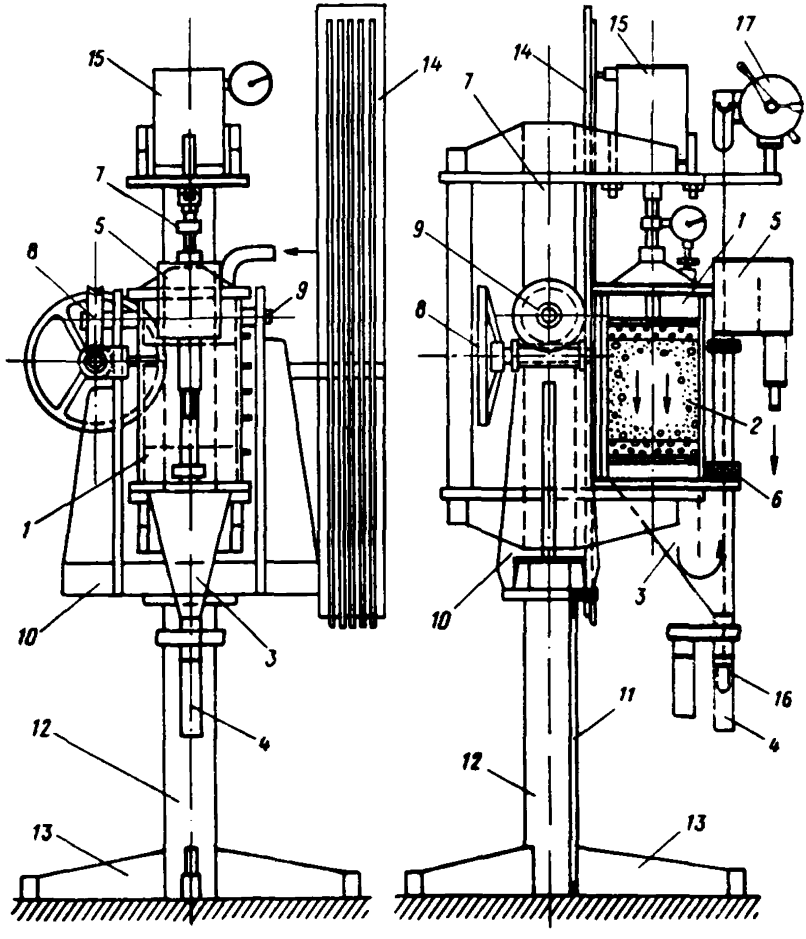


Рис. 24. Усовершенствованный фильтрационно-суффозионный прибор с приспособлением для регистрации интенсивности суффозии

1—цилиндрическая рабочая камера; *2*—испытываемый грунт (заполнитель); *3*—отстойник; *4*—грунтосборник; *5*—сливной бачок; *6*—патрубок; *7*—обойма; *8*—червячный механизм; *9*—ось; *10*—вилка; *11*—хвостовик; *12*—трубчатая стойка; *13*—опорная крестовина; *14*—пьезометрический щит; *15*—гидравлический домкрат; *16*—чашка; *17*—седиментометр.

ства во время наблюдений за состоянием испытываемого грунта, что является отличительной особенностью конструкции данного прибора.

Суффозионный щелевой лоток для определения устойчивости заполнителя трещин и вмещающей породы к поверхностному размыву фильтрационным потоком (эрозии)

Суффозионный щелевой лоток схематически изображен на рис. 25.

Лоток состоит из рабочей камеры с находящейся в ней подвижной кассетой, куда уложен испытываемый образец породы, приспособлений-щелемеров, расположенных на прозрачной крышке камеры лотка, и устройства для перемещения кассеты, состоящего из прикрепленных к ней тяг, соединенных также с траверсой, на концевых участках которой имеются винты. Места прохода тяг через дно камеры герметизированы сальниками, а для уплотнения промежутка между кассетой и дном камеры здесь помещена легкосжимаемая и водонепроницаемая прокладка, например, из губчатой резины.

На торцевых стенках камеры имеются патрубки, через которые подается и отводится вода, а перед этими патрубками в камере установлены струераспределительные решетки. С тем, чтобы уменьшить сбойность течения потока на концевых участках щели, кассета снабжена открылками.

На крышке камеры лотка размещены штуцеры, к которым присоединяются пьезометры для измерения напора потока воды в щели.

Для проведения испытаний образец породы (в виде бруска с выровненной верхней гранью) укладывают по возможности без нарушения его естественной структуры в кассету, которая находится в рабочей камере лотка, и фиксируют положение образца в кассете с помощью твердеющего раствора.

Закрывают лоток крышкой, присоединяют к штуцерам пьезометры, а к патрубкам — приспособления для создания напора и слива воды, после чего замачивают образец, заполняя камеру водой.

Если при впитывании воды происходит деструкция поверхностного слоя образца, его плотно прижимают к крышке, а это можно осуществить лишь при наличии подвижной кассеты.

Затем, вращая винты, устанавливают и измеряют с помощью щелемеров начальное раскрытие щели и, постепенно увеличивая напор воды, доводят скорость и гидравлический уклон потока в щели до прогнозируемых значений этих параметров в натуре и одновременно наблюдают через прозрачную крышку лотка за состоянием поверхности образца, контролируя щелемерами раскрытие щели.

В случае размыва (эрозии) поверхности, об интенсивности этого явления можно судить не только по увеличению раскрытия щели, но также по изменению ее проницаемости, характеризуе-

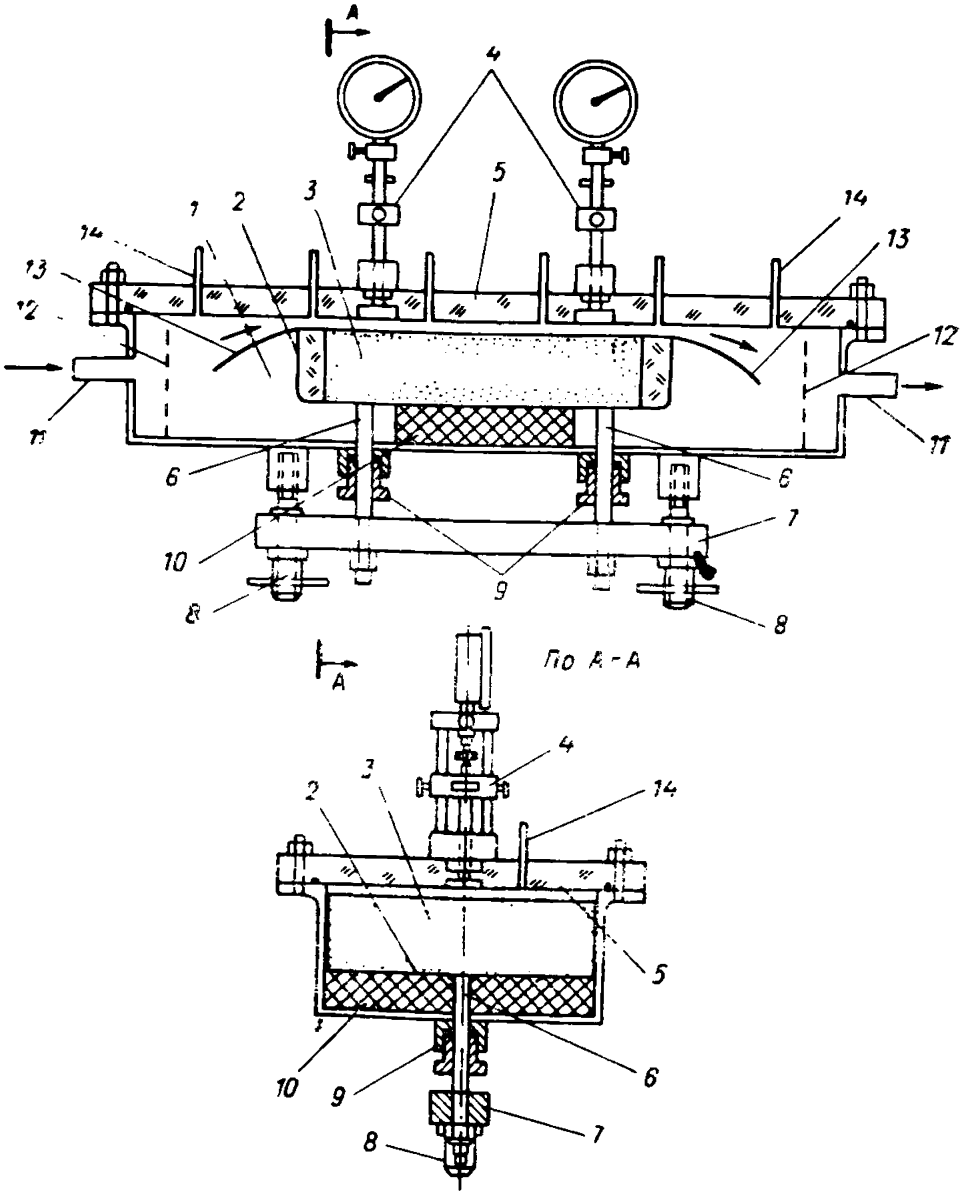


Рис. 25. Схема суффозионного щелевого лотка с подвижной кассетой для экспериментальных исследований поверхностного размыва (эрозии) заполнителя трещин и вмещающей слабосцементированной породы (третьего и шестого видов суффозии в скальных массивах)

1—рабочая камера лотка; *2*—подвижная кассета; *3*—испытываемый образец заполнителя или слабосцементированной породы; *4*—щелемер; *5*—крышка лотка из прозрачного материала; *6*—тяга; *7*—траверса; *8*—винты для перемещения кассеты; *9*—сальниковые уплотнения; *10*—водонепроницаемая эластичная прокладка; *11*—патрубки для подключения лотка к системам подачи и слива воды; *12*—струераспределительные решетки; *13*—открылки; *14*—штуцеры для присоединения к лотку пьезометров.

мой средней скоростью потока при данном градиенте напора, который определяют по показаниям пьезометров.

Таким образом отсутствие или наличие эрозионных явлений во время испытаний, при различных скоростях потока и раскрытиях щели, позволяет судить о фильтрационной прочности испытываемой породы (грунта).

Конструкция устройства (щелемера) для определения раскрытия щели и измерения глубины размыва грунта поясняется чертежом на рис. 26. Глубину размыва определяют с помощью этого устройства следующим образом. Вращая подающую гайку, расположенную в прорези опорной планки перемещают выдвижной шток вверх до упора, полностью утапливая тарелку в выточке крышки лотка. Вращением столика устанавливают нулевой отсчет на шкале мессуры, затем опускают шток вниз, пока тарелка не прижмется к поверхности грунта, при этом по показанию мессуры определяют величину раскрытия щели. Сопоставляя во времени величины раскрытия в данной точке, выясняют интенсивность размыва грунта, не снимая при этом крышки лотка.

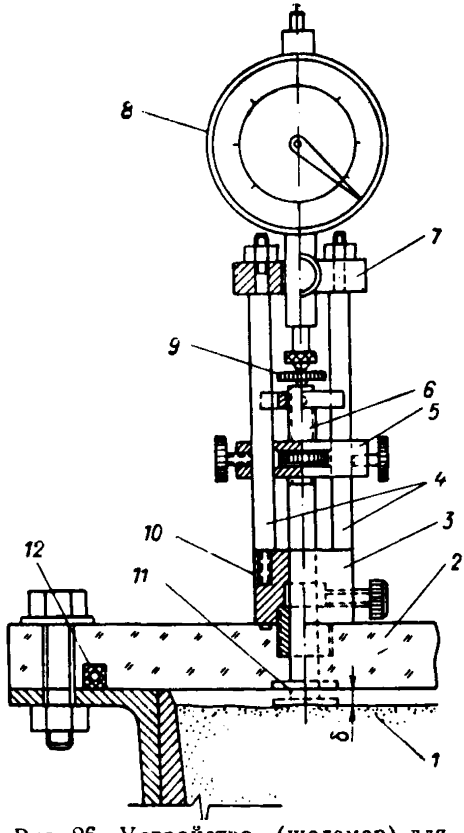


Рис. 26. Устройство (щелемер) для измерения раскрытия щели при испытании на размыв образцов породы в суффозионном щелевом лотке

1—испытываемая порода (заполнитель), находящийся в кассете; *2*—крышка лотка; *3*—сальниковая муфта; *4*—стойки; *5*—опорная планка с подающей гайкой; *6*—выдвижной шток; *7*—верхняя планка; *8*—мессура; *9*—столик для установки нуля отсчета; *10*—кольцевой зазор с находящейся в ней вязкой жидкостью (тавотом); *11*—опорная тарелка; *12*—трубчатое уплотнение для герметизации камеры лотка.

Приложение VIII

Установки «Бора» для экспериментального определения суффозионной устойчивости заполнителя трещин или глинистых прослоек в скальном массиве

Испытание образцов заполнителя трещин на устойчивость к контактному размыву фильтрационным потоком проводятся на установке Бора-1 (рис. 27) следующим образом.

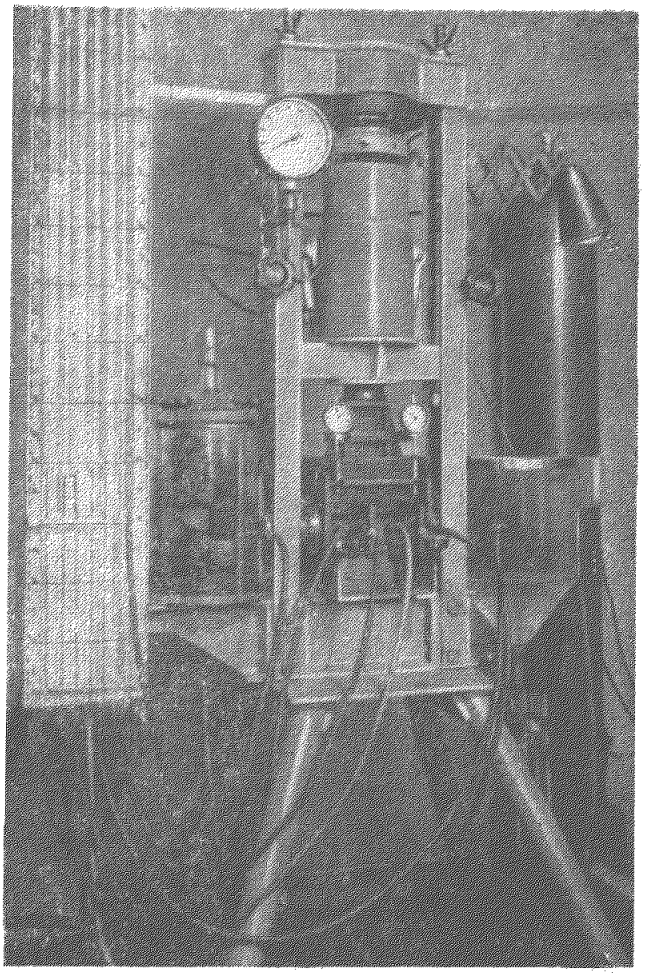
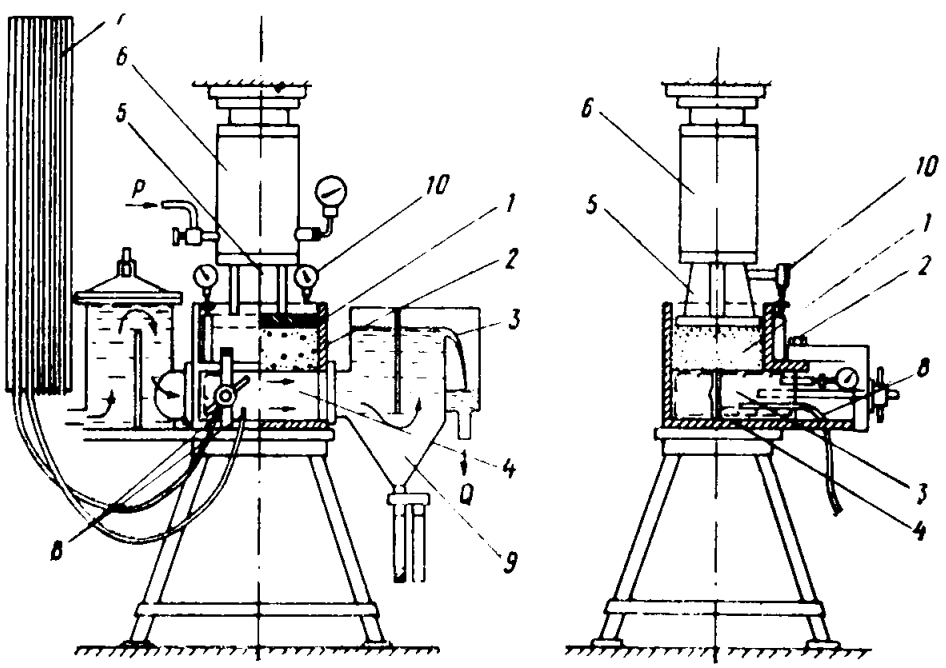


Рис. 27. Внешний вид установки Бора-1 для определения суффозионной устойчивости заполнителя боковому размыву по оперяющей открытой трещине и схема этой установки

1—испытываемый заполнитель; *2*—двухполостная коробка; *3*—образец скальной породы с продольной трещиной изменяемого раскрытия; *4*—продольная трещина; *5*—поршень; *6*—гидравлический домкрат; *7*—пьезометры; *8*—пьезометрические штуцеры; *9*—отстойник; *10*—индикаторы (мессуры) для измерения осадок поршня.



Грунт-заполнитель помещают в верхний отсек двухполостной коробки, в нижнем отсеке которой расположен образец скальной породы, имеющий продольную сквозную трещину. Уложенный грунт уплотняют с помощью поршня, воспринимающего необходимое для уплотнения усилие от нагрузочного устройства, например, гидравлического домкрата. Затем через трещину пропускают поток воды, постепенно увеличивая его скорость до тех пор, пока не начнется размыв грунта. Гидравлический уклон потока

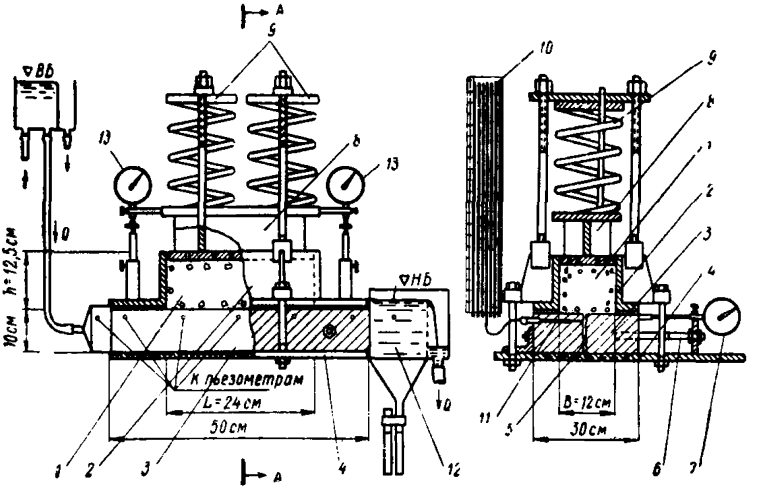


Рис. 28. Схема установки Бора-2

1—испытываемый заполнитель; *2*—рабочая камера, которую вместе с находящимся в ней заполнителем можно отъединить от образца скального массива; *3*—образец скального массива, разделенный продольной трещиной на две части (подвижную и неподвижную); *4*—опорная плита; *5*—продольная трещина; *6*—анкерные тяги для перемещения подвижной части скального образца; *7*—мессуры для определения раскрытия трещины; *8*—поршень, передающий сжимающее усилие на заполнитель от нагрузочного устройства (пружин-*9*); *10*—пьезометры; *11*—пьезометрические отверстия в скальном образце для определения гидравлического уклона потока в трещине; *12*—отстойник для выносимых потоком частиц заполнителя; *13*—мессуры для регистрации осадок поршня.

определяют по показаниям пьезометров, присоединенных к отверстиям, выходящим в трещину. Интенсивность размыва грунта определяют по выносу его частиц в отстойник и по осадке поршня, регистрируемой индикаторами. По нарастанию интенсивности размыва и осадок, по мере увеличения скорости, можно определить ее размывающую величину, которая характеризует суффозионную устойчивость или сопротивляемость заполнителя (грунта) контактному размыву.

Существенной деталью установки является приспособление в виде двух анкерных тяг, позволяющее в процессе опыта регулировать величину раскрытия трещины в образце скальной породы, что в значительной мере облегчает исследования по установлению общей зависимости между раскрытием трещин и величиной размывающей скорости (или градиентом напора).

Установка Бора-1 имеет ряд недостатков:

1) вследствие отсутствия стабилизирующих поток участков на входе в оперяющую трещину и на выходе из нее создаются условия для преждевременной турбулизации потока и размыва грунта при скоростях движения воды в трещине ниже действительно размывающих;

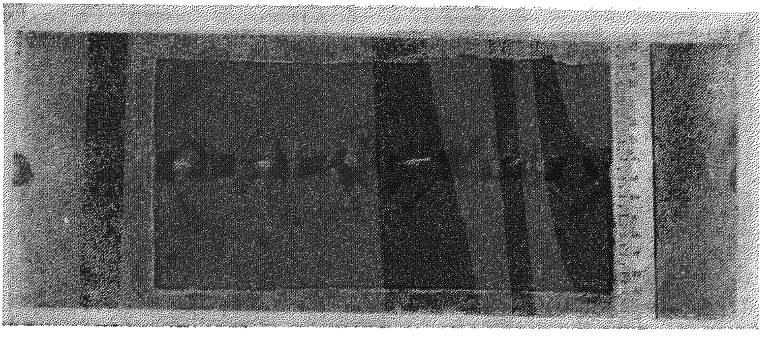


Рис. 29. Вид поверхности заполнителя (обращенной к оперяющей трещине с раскрытием 10 *мм*) после его испытаний на боковой размыв на установке Бора-2.

2) так как верхняя камера, куда помещают образец заполнителя выполнена совместно с нижней, после испытаний образца нельзя определять визуальным осмотром состояние его поверхности на участке размыва, выходящем в устье оперяющей трещины.

Эти недостатки полностью устранены в конструкции установки Бора-2, схема которой показана на рис. 28.

Методика проведения испытаний на этой установке такая же, как и на установке Бора-1, с той лишь разницей, что после испытаний рабочую камеру вместе с находящимся в ней образцом заполнителя можно снять и произвести осмотр и фотографирование его нижней поверхности. Пример показан на рис. 29.

Приложение IX

Установки для испытания образцов заполнителя на суффозионную устойчивость при внутреннем продольном его размыве и выдавливании из трещины (второй и пятый виды суффозии)

1. Установка типа «Тектрон» позволяет испытывать заполнитель при силовом воздействии дивергентного фильтрационного потока и, одновременно, — сжимающей нагрузки, интенсивность которой в отдельных случаях сравнительно легко может быть доведена до величины напряжений в глубине массива.

Конструктивно установка «Тектрон» (рис. 30) выполнена таким образом, что имеется свободный доступ к образцу заполнителя и возможность наблюдений за его состоянием в процессе испытания.

Основным элементом установки (рис. 31) является пустотелый разъемный цилиндрический керн, нижняя опорная часть которого отделена трещиной от верхней части, выполняющей роль прижимного штампа, уплотняющего заполнитель под действием усилия, передаваемого от нагрузочного устройства. Для более полного приближения условий испытаний к натурным желательно, чтобы керн был выполнен из материала вмещающей заполнитель скальной породы (в других случаях — из цементно - песчаного камня, бетона и т. п.), получая таким путем естественную шероховатость стенок трещины.

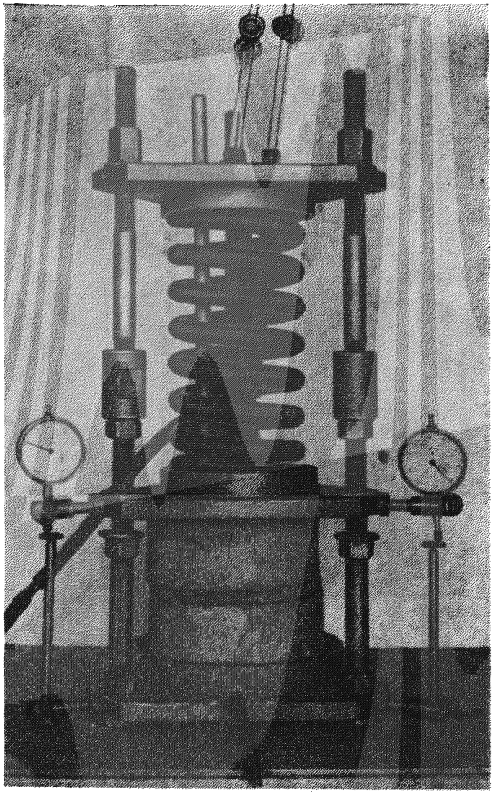


Рис. 30. Внешний вид установки „Тектрон". Наружная сетка снята.

Испытываемый образец заполнителя укладывают, по возможности, без нарушения его структуры, в трещину, направленную поперек пустотелого керна скальной породы, между нижней и верхней его частями. Затем образец уплотняют нажатием на него верхней подвижной части керна, воспринимающей необходимое усилие от нагрузочного устройства, например, пружины, сжимаемой с помощью фланца, перемещающегося по направляющим стойкам. Чтобы предотвратить возможное оплывание образца и выдавливание его из трещины под действием уплотняющей нагрузки, он внутри и снаружи защищен крупной сеткой, которая не должна являться препятствием для вымываемых фильтрационным потоком частиц

заполнителя. После уплотнения через образец пропускают воду, подаваемую под напором во внутреннюю полость керна. Постепенно увеличивая напор, наблюдают за расходом профильтровавшейся воды, количеством вымываемых частиц, попадающих в кольцевой водосборник, а также за перемещением верхней части керна, регистрируемым мессурами (это перемещение, кстати, также может характеризовать увеличение деформативности трещиноватого скального массива в результате суффозии заполнителя). По изменению всех этих характеристик судят о состоянии образца и, доводя его до разрушения при разных нагрузках, устанавливают зависимость критического градиента напора от интенсивности сжатия заполнителя. Вместе с тем, используя данные о напоре и расходе просочившейся через заполнитель воды, можно определить его коэффициент фильтрации, выполнив для этого несложный расчет по формуле (12).

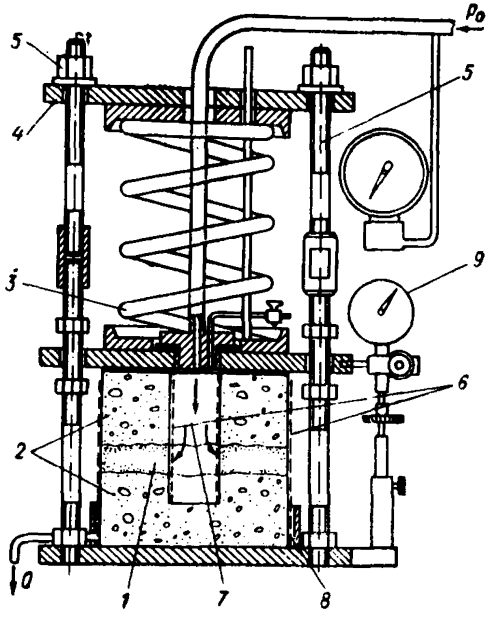


Рис. 31. Схема установки „Тектрон"

1—испытываемый образец заполнителя· *2*—пустотелый кери скальной породы; *3*—нагрузочное устройство (пружины); *4*—фланец; *5*—направляющие стойки; *6*—защитная сетка; *7*—внутренняя полость керна; *8*—кольцевой водосборник; *9*—мессуры, регистрирующие перемещение верхней части керна.

2. Модифицированная установка типа «Фитрон». Для проведения суффозионных исследований заполнителя установка «Фитрон» (рис. 32) должна быть снабжена приспособлениями (домкратами, пружинами), с помощью которых можно создать сжимающую нагрузку.

Методика испытаний заполнителя на этой установке поясняется схематически изображенными на рис. 33 ее продольным и поперечным разрезами.

Приготовленный для испытаний образец заполнителя укладывают, по возможности, без нарушения его структуры, между двумя половинами бруска, выполненного из скальной породы или

бетона и размещенного на опорной плите установки (для удобства во время укладки заполнителя верхнюю половину бруска снимают). После этого пространство между двумя половинами бруска (трещину), с уложенным туда заполнителем, закрывают нащельником, который имеет герметизирующую эластичную прокладку. Эта прокладка также обеспечивает возможность поперечных смещений подвижной половины бруска при уплотнении заполнителя и в случае его суффозии (размыва). К торцевым открытым участкам трещины герметично присоединяют напорный бачок и отстойник с грунтосборником (песколовкой).

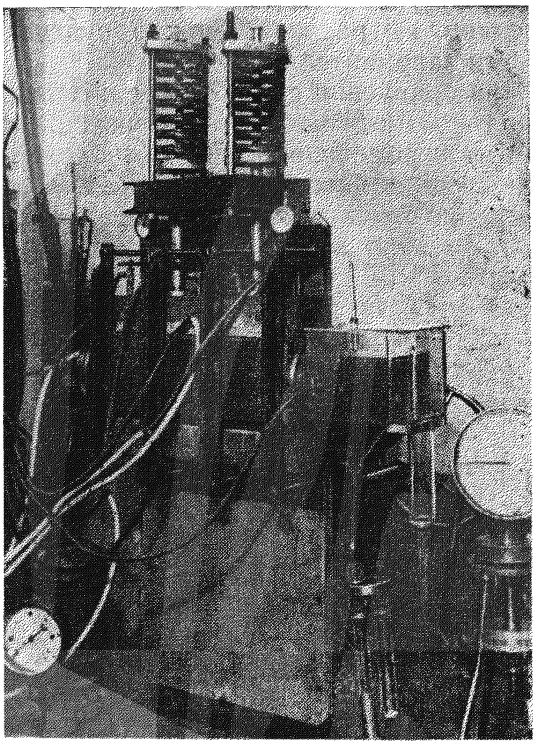


Рис. 32. Общий вид установки „Фитрон".

Уложенный заполнитель затем уп-

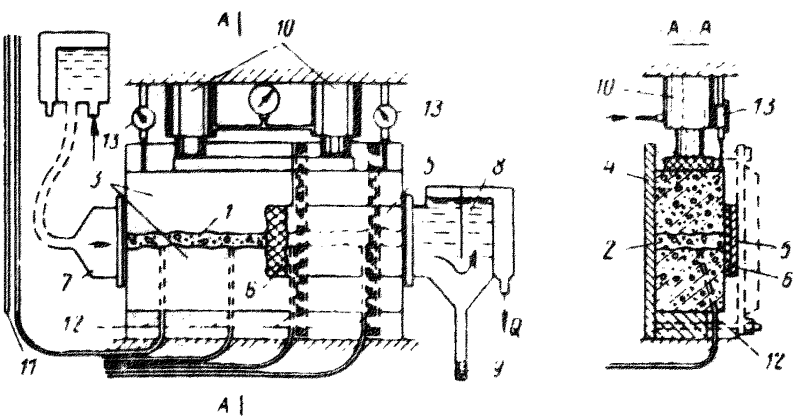


Рис. 33. Схема, поясняющая методику испытаний заполнителя трещины на модифицированной установке „Фитрон"

1—заполнитель; *2*—трещина; *3*—образец скальной породы в форме бруска; *4*—опорная плита; *5*—нащельник; *6*—уплотняющая прокладка; *7*—напорный бачок; *8*—отстойник; *9*—грунтосборник; *10*—нагрузочное устройство; *11*—пьезометры; *12*—отверстия, выходящие в трещину; *13*—индикаторы.

лотняют нажатием на него верхней половины бруска, воспринимающей заданное усилие от нагрузочных устройств, например, гидравлических домкратов или пружин. Пропуская через заполнитель воду с определенным напором и наблюдая при этом за изменением ее расхода, можно судить о суффозионной устойчивости заполнителя.

При появлении суффозии ее интенсивность определяют по количеству выносимых потоком частиц, оседающих в грунтосборнике, и по перемещению верхней половины бруска, что отмечается по показаниям мессур (если в этом случае суффозия вызывает изменение структуры заполнителя).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ[1]

2. Основные закономерности движения воды по трещинам

1. **Ломизе Г. М.** Фильтрация в трещиноватых породах. М.-Л., Госэнергоиздат, 1951, 127 с. с ил.

2. **Краснопольский А. А.** Грунтовые и артезианские колодцы. — «Горный журнал», 1912, т. III, с. 25—37.

3. **Schneebeli G.** Hydraulique souterraine,—Paris, Eyrolles, 1966, p. 362.

4. **Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П.** Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. — «Доклады АН СССР», 1960, т. 132. Механика. Серия 3, с. 545—548.

5. **Ромм Е. С.** Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М. «Недра», 1966, 283 с. с ил.

6. **Parsons P. W.** Permeability of idealized fractured rock,—"Sol. Petrol. Engrs J.", 1966, 6, № 2.

7. **Жиленков В. Н.** О закономерностях фильтрации воды по трещинам в бетонных конструкциях. — «Труды координационных совещаний по гидротехнике», вып. 68, Л., 1971, с. 195—204 (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

8. **Жиленков В. Н., Гуляева Л. В., Овчинников А. Б.** О влиянии на водопроницаемость трещин шероховатости их стенок.— «Труды координационных совещаний по гидротехнике», вып. 48. Л., 1970, с. 45—52 (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

9. **Вахрамеев И. И.** Геометрические параметры трещиноватости горных пород. — «Горный журнал», 1961, № 9, с. 5—14.

10. **Цейтлин А. С.** Измерение абсолютной шероховатости. — В кн.: Новые методы измерений и приборы для гидравлических исследований. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 45—50.

11. **Rubatto Antonello.** Numeri di resistenza per fortissime scabrezze relative,—"Energia elettr.", 1968, v. 45, № 3, p. 188—193.

12. **Жиленков В. Н.** О закономерностях фильтрации воды в трещиноватых скальных породах. — «Известия ВНИИГ». Л., 1967, т. 84, с. 269—271.

13. **Методика** изучения трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа. — «Труды ВНИГРИ», вып. 276. Л., «Недра», 1969, 125 с.

[1] К 1-му разделу Руководства литературы нет.

3. Расчетные методы оценки фильтрационно-суффозионных свойств заполнителя трещин и глинистых прослоек в скальных массивах

1. **Кондратьев В. Н.** Фильтрация и механическая суффозия в несвязных грунтах. Симферополь, Крымиздат, 1958, 76 с. с ил.

2. **Бэр Я., Заславская Д., Ирмей С.** Физико-математические основы фильтрации воды. М., «Мир», 1971, 451 с. с ил.

3. **Шейдеггер А.** Физика течения жидкостей через пористые среды. М., Гостоптехиздат, 1960, 249 с. с ил.

4. **Коллинз Р.** Течения жидкостей через пористые материалы, М., «Мир», 1964, 360 с. с ил.

5. **Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б.** Подземная гидравлика, М.-Л. Гостоптехиздат, 1949, 524 с ил.

6. **Аравин В. И., Нумеров С. Н.** Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М., Гостехиздат, 1953, 612 с. с ил.

7. **Жиленков В. Н.** О закономерностях фильтрации в трещинной и зернистой средах закрепляющих растворов типа ньютоновской жидкости. — В кн.: Материалы VII Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов. Л., «Энергия», 1971, с. 504—510.

8. **Жиленков В. Н.** Принципы расчета водопроницаемости и фильтрационной прочности завес и понуров из глинистых грунтов. — Сб. докладов Всесоюзного совещания в Баку по проектированию и созданию противофильтрационных устройств в основании высоких плотин. М., Стройиздат, 1972, с. 64—76.

9. **Жиленков В. Н.** О контактном размыве глинистых грунтов фильтрационным потоком. — «Труды координационных совещаний по гидротехнике». Л., 1972, вып. 72, с. 48—61. (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

10. **Жиленков В. Н.** О фильтрационной прочности грунтов в условиях контактного выпора. — «Труды координационных совещаний по гидротехнике». Л., 1972, вып. 72, с. 61—71. (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

4. Определение водопроницаемости и фильтрационной прочности скальных массивов в полевых условиях

1. **Гуреев А. М.** Инженерно-геологическая модель скального массива в основании гидротехнических сооружений. — Труды координационных совещаний по гидротехнике». Л., 1972, вып. 77, с. 5—14 с табл. (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

2. **Геология** и плотины, т. IV под ред. А. А. Борового. М., «Энергия», 1964, 135 с. с ил.

3. **Аллас Э. Э.** Из опыта цементации трещиноватых скальных пород. — «Гидротехническое строительство», 1965, № 4, с. 16—20.

4. **Жинью М., Барбье Р.** Геология плотин и гидротехнических сооружений. М., Госстройиздат, 1961, 355 с. с ил.

5. **Инженерно-геологические** изыскания для строительства гидротехнических сооружений. Под общ. ред. Е. С. Карпышева. М., «Энергия», 1972, 376 с. с ил.

6. **Жицкий П. Я.** Исследование фильтрации жидкости в трещиноватых породах по промысловым данным. — «Нефтяное хозяйство», 1966, № 3.

7. **Михайлов А. Е.** Полевые методы изучения трещин в горных породах. М., Госгеолтехиздат, 1956, 132 с. с ил.

8. **Прогноз** водопритоков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. М., «Недра», 1972, 196 с. с ил.

9. **Lundgren R.** and others. Borehole cameras,—Mater. Research and Standarts, 1968, № 8, p. 17—22.

10. **Рапин В. А., Бакиров К. Х.** Прибор для фотографирования забоя скважин. — НТС. «Машины и нефтяное оборудование», вып. 5., М., 1971, с. 35—36.

11. **Рапин В. А., Бакиров К. Х.** Результаты исследования забоя скважины методом фотографирования. — НТС. Нефтяное хозяйство, вып. 1. 1971, с. 64—67.

12. **Нейштадт Л. И., Пирогов И. А.** Методы инженерно-геологического изучения трещиноватости горных пород. М., «Энергия», 1969, 248 с. с ил.

13. **Методика** изучения трещиноватых горных пород и трещиноватых коллекторов нефти и газа. — «Труды ВНИГРИ», вып. 276. Л., «Недра», 1969, 125 с.

14. **Храмушев А. С.** Гидрогеологическая классификация трещиноватых горных пород. — «Советская геология», № 4, 1941, с. 85—94.

15. **Куваев Н. Н.** О сохраняемости трещин ориентировки на различных глубинах. — В кн.: Сб. статей по вопросу горного давления и сдвижения горных пород. № 34. М., 1960, с. 305—307. (Всесоюзный научно-исслед. ин-т горной геомеханики и маркшейдерского дела).

16. **Каган М. Л.** Инженерно-геологическое обоснование проектирования противофильтрационных мероприятий в основании бетонной Токтогульской плотины на р. Нарыне. В кн.: Проектирование и создание противофильтрационных устройств в основании высоких плотин. М., Стройиздат, 1972, с. 48—54.

17. **Кириченко Н. И., Малютин Б. В.** О вымыве глинистого заполнителя трещин в скальных породах. — «Гидротехническое строительство», 1963, № 10, с. 32—34.

18. **Аравин В. И., Нумеров С. Н.** Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Изд. 2-е. Л.-М., Госстройиздат, 1955, 291 с. с ил.

19. **Аравин В. И., Носова О. Н.** Натурные исследования фильтрации. Л., «Энергия», 1969, 256 с. с ил.

20. **Веригин Н. Н.** Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М.-Л., Стройиздат, 1962, 180 с. с илл.

21. **Насберг В. М.** Определение коэффициента фильтрации неводонасыщенных грунтов методами наливов и нагнетаний в скважины и шурфы. — «Известия ТНИСГЭИ», т. 17, 1967, с. 72—96.

22. **Пэк А. А.** О методах определения проницаемости скальных горных пород. — «Советская геология», 1966, № 1, с. 119—125.

23. **Керкис Е. Е.** Определение коэффициента водопроницаемости горных пород методом откачки—нагнетания. — «Советская геология», 1956, № 56, с. 83—95.

24. **Bernaix J.** Moyens nouveaux d'étude au laboratoire des propriétés mécaniques des roches,—"Ann. Inst. Techn. du Bâtim. et Trav. Publics", 1967, № 234, p. 905—936.

25. **Коненков К. С., Кошевник А. Ю., Гудок Н. С., Прокофьева Е. А.** Установка для исследования проницаемости кернов, Новости нефтяной техники. — «Нефтепромысловое дело», 1958, № 1, с. 19—22.

26. **Тышев А. А.** Прибор для определения коэффициента фильтрации горных пород под давлением. — «Изв. Сибирского отд. АН СССР», 1959, № 11, с. 91—93.

27. **Кнутсон Ц. Ф., Бохор Б. Ф.** Поведение пористых пород при всестороннем давлении. — В кн.: Механика горных пород. Пер. с англ., М., «Недра», 1966, с. 407—420.

28. **Добрынин В. М.** Влияние давления на коллекторские свойства песчаников. — «Геология нефти и газа», 1963, № 1, с. 45—52.

29. **Grey** Donald H., **Fatt** Irving, **Bergamini** Gabriella. The effect of stress on permeability of sandstone cores,—"Soc. Petrol. Engrs J.", 1963, 3, № 2, p. 205—208.

30. **Кусаков М. М., Гудок Н. С.** Влияние внешнего давления на фильтрационные свойства нефтесодержащих пород. — «Нефтяное хозяйство», 1958, № 6, с. 40—47 с ил.

31. **Бурлаков И. А., Фурсов Н. П.** Зависимость проницаемости гранулярных и трещинных пород от горного давления и температуры. — «Нефтепромысловое дело». 1963, № 2, с. 5—8.

32. **Bernard W., Wilbur H. S.** Simultaneous measurement of pore and elastic properties of rocks under triaxial stress conditions,—"Soc. Petrol. Engrs J.", 1967, 7, № 3, p. 503—509.

33. **Beaujoint M., Bernède J.** Progrès récent en mécanique des roches,—"Houille Blanche", 1965, 20, № 7, p. 691—702.

34. **Жиленков В. Н.** Некоторые вопросы водопроницаемости бетона. — «Сборник докладов по гидротехнике». Л., вып. 3, 1961, с. 116—128.

35. **Жиленков В. Н.** О влиянии сжимающей нагрузки на проницаемость трещиноватого скального массива. — «Известия ВНИИГ», Л., 1973, т. 102, с. 195—202.

36. **Газиев Э. Г.** Механика скальных пород в строительстве, М., Стройиздат, 1973, 176 с. с ил.

5. Методика фильтрационно-суффозионных исследований, проводимых в лабораторных условиях

1. **Семенов М. П., Орадовская Е. А., Храмогина Т. С., Молоков Л. А.** Исследования размываемости трещиноватых горных пород и заполнителя трещин фильтрационным потоком. — В кн.: Труды лаборатории инженерной гидрогеологии. М., Госстройиздат, 1957, с. 24—115 (ВОДГЕО).

2. **Жиленков В. Н.** Водоупорные свойства грунтов ядер и экранов высоких плотин. Л., «Энергия», 1968, 114 с. с ил.

3. **Жиленков В. Н.** Экспериментальные исследования фильтрационной прочности заполнителя тектонических трещин в скальном основании Нурекской плотины. — «Труды координационных совещаний по гидротехнике». Л., 1970, вып. 48, с. 135—148 (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева).

4. **Калустян Э. С.** Размываемость связного заполнителя тектонических трещин в основании арочной плотины Ингури. — «Труды Гидропроекта». М., сб. 33, 1973.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 5

Область применения Руководства 5
Некоторые понятия, определения и условные обозначения . . . 5

2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ ПО ТРЕЩИНАМ. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ФИЛЬТРАЦИИ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ 10

Движение воды в трещинах с параллельными стенками . . . 10
Фильтрация в клиновидных трещинах 15
Расчет фильтрации в трещине методом нагнетания в нее воды из скважины 18
Условия возникновения турбулизации осерадиального потока в трещине 19
Расчетный метод определения водопроницаемости скального массива с четко выраженной системой трещин 20

3. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ТРЕЩИН И ГЛИНИСТЫХ ПРОСЛОЕК В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ. 20

Оценка водопроницаемости несвязного зернистого заполнителя — материала тектонического дробления вмещающей породы . . 20
Оценка водопроницаемости глинистых прослоек в скальных массивах 23
Оценка суффозионных свойств заполнителя трещин, карстовых полостей, прослоек и самой вмещающей породы в скальных массивах 24
Основные виды механической суффозии в скальных массивах . 26

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ И ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ 33

Определение суффозионной устойчивости заполнителя трещин и вмещающей породы 34
Способы определения влияния сжимающих нагрузок на водопроницаемость трещиноватого скального массива 37
Определение водопроницаемости скальных массивов 39
Определение коэффициента фильтрации по данным откачек в пласте неограниченной мощности 42
Определение коэффициента пласта по данным опытных нагнетаний 43

5. МЕТОДИКА ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ . . 44

ПРИЛОЖЕНИЯ.

Приложение I. Таблица характеристик шероховатости поверхностей разрыва образцов песчано-цементного камня, песчаника, бетона и некоторых скальных пород 46

Приложение II. Способ испытания на суффозионную устойчивость заполнителя крупных тектонических трещин, выходящих на дневную поверхность скального массива 47

Приложение III. Гидравлический способ определения раскрытий крупных трещин в скальном массиве. 49

Приложение IV. Определение в лабораторных условиях с помощью прибора типа «Керн» характера изменения проницаемости образца скального грунта при всестороннем его обжатии . . . 52

Приложение V. Способ определения in situ фильтрационно-суффозионных и деформативно-прочностных свойств скального грунта при сложном напряженном его состоянии 52

Приложение VI. Прибор для испытаний несвязного зернистого материала (заполнителя трещины) на водопроницаемость и устойчивость по отношению к первому и второму видам механической суффозии 57

Приложение VII. Суффозионный щелевой лоток для определения устойчивости заполнителя трещин и вмещающей породы к поверхностному размыву фильтрационным потоком (эрозии) 59

Приложение VIII. Установки «Бора» для экспериментального определения суффозионной устойчивости заполнителя трещин или глинистых прослоек в скальном массиве. 61

Приложение IX. Установки для испытания образцов заполнителя на суффозионную устойчивость при внутреннем продольном его размыве и выдавливании из трещины (второй и пятый виды суффозии) 64

Список литературы 69

РУКОВОДСТВО ПО МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-СУФФОЗИОННЫХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

П 28-74
ВНИИГ

Научный редактор *В. И. Аравин*

Редактор *Л. Г. Сетко*

Технический редактор *Т. М. Бовичева*

Ленинградское отделение издательства «Энергия».
192041, Ленинград
Марсово поле, 1.

Сдано в набор 30/V 1975 г.
Подписано к печати 9/IX 1975 г.
М-24153. Формат 60×90/16.
Бумага типографская № 1.
Печ. л. 4,75. Уч.-изд. л. 4,93.
Тираж 980. Зак. 299.
Цена 49 коп.

Типография Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева.
195220, Ленинград, Гжатская ул., 21.

gost.e-ecolog.ru