

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
(ННГАСУ)

Кафедра гидравлики

## **Фильтрация воды в гидротехнических сооружениях**

Часть I – теоретические основы, гидромеханические и гидравлические методы  
расчета фильтрации

Методические указания предназначены для проведения лекционных и  
практических занятий спецкурса по дисциплине гидравлика,  
а также для выполнения курсовых и дипломных проектов студентами  
специальности № 270104 – Гидротехническое строительство.

Нижегород – 2011

УДК 627.8.034.93+628.16 (07)+628.33.

Фильтрация воды в гидротехнических сооружениях. Часть I. Методические указания. – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит. – строит. ун-т, 2011 – 22 с.

Методические указания включают в себя раздел специального курса по дисциплине гидравлика для студентов специальности «Гидротехническое строительство». Настоящими указаниями даются основы теории фильтрации и основные методы решения задач фильтрации воды в гидротехнических сооружениях.

Указания предназначены студентам специальности 270104 «Гидротехническое строительство».

Составители: к.т.н., доцент Битюрин А.К., к.т.н., доцент Козлов А.П., инженер Битюрин К.А.

Рецензент: к.т.н., доцент Жизняков В.В.

## Содержание

### 1. Основы теории фильтрации

1.1. Понятие фильтрации

1.2. Вода в грунте

1.3. Водопроницаемость грунтов

1.4. Виды фильтрации

1.5. Уравнения фильтрации воды

### 2. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений

2.1. Цели фильтрационных расчетов

2.2. Методы фильтрационных расчетов

2.2.1. Гидромеханические методы

2.2.2. Гидравлические методы

Заключение

Литература

## 1. Основы теории фильтрации

### 1. 1. Понятие фильтрации

Движение жидкости (газа, газированной жидкости) в пористой среде называется *фильтрацией* [1].

В гидротехнике при рассмотрении фильтрации имеются в виду пористые среды, образованные из грунтов (связных и несвязных), трещиноватых горных пород, бетона и других пористых материалов, а в качестве фильтрующейся жидкости рассматривается вода.

Поры грунта, бетона, трещины горных пород, в которых движется жидкость, имеют сложные и разнообразные формы. Это обстоятельство приводит к особому методу изучения движения жидкости в пористой среде. Именно из-за отсутствия закономерности форм пор и трещин рассматриваются осредненные характеристики фильтрационных свойств пористой среды.

При рассмотрении фильтрации предполагается, что жидкость движется, сплошь заполняя все пространство – поры и частицы грунта. При этом расход жидкости через любую площадку должен быть равен действительному ее расходу. Таким образом, реальный поток жидкости в порах грунта заменяется *фиктивным фильтрационным потоком* той же жидкости, непрерывно заполняющим объемы пор и скелета грунта.

Основываясь на понятии фильтрационного потока, можно заключить, что если действительный расход жидкости через площадку  $\Delta\omega$  будет равен  $\Delta Q$ , то скорость фиктивного фильтрационного потока в пределах данной площадки будет [1, с. 36]:

$$V = \frac{\Delta Q}{\Delta\omega}. \quad (1)$$

Эта фиктивная скорость называется *скоростью фильтрации*. При определении скорости фильтрации принято, что фильтрационный поток заполняет все пространство. В действительности же жидкость движется через ту часть площади, которая занята порами. При пористости  $n$  эта часть площади равна  $n\Delta\omega$ . Средняя скорость в порах при расходе  $\Delta Q$  будет равна [1, с. 37]:

$$V^* = \frac{\Delta Q}{n\Delta\omega}. \quad (2)$$

Таким образом, из (1) и (2) вытекает связь между скоростью фильтрации  $V$  и средней скоростью в порах  $V^*$ :

$$V = nV^* \quad (3)$$

Так как  $n < 1$ , то и  $V < V^*$ .

## 1. 2. Вода в грунте

Вода в грунте, ее виды и свойства могут быть различными в зависимости от ее содержания в грунте и величины сил взаимодействия с минеральными частицами, определяемой, главным образом, гидрофильностью минеральных частиц [4, с. 11].

Минеральные частицы грунтов заряжены отрицательно, а молекулы воды представляют диполи, заряженные положительно на одном (атом кислорода) и отрицательно на другом (два атома водорода) конце. При соприкосновении твердой минеральной частицы с водой возникают электромолекулярные силы взаимодействия, которые притягивают диполи воды к поверхности минеральных частиц с большой силой (особенно первые слои), и чем больше удельная поверхность частиц, тем большее количество молекул воды будет находиться в *связном* состоянии. Электромолекулярные силы взаимодействия очень велики и у поверхности минеральных частиц (для первого ряда связанных молекул воды) составляет величину порядка нескольких тысяч килограмм на  $1 \text{ см}^2$ . По мере же удаления от поверхности твердых частиц, они быстро убывают и на расстоянии, равном примерно 0,5 мкм (1 мкм – микрометр,  $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ), становятся близкими к нулю.

Самые близкие к минеральной частице слои в 1-3 ряда молекул воды, соприкасающиеся с твердой поверхностью, настолько связаны электромолекулярными силами притяжения с поверхностью, что их не удастся удалить ни внешним давлением в несколько атмосфер, ни действием напора воды, и эти слои образуют пленки так называемой *прочносвязанной адсорбированной воды*.

Следующие слои молекул воды, окружающие минеральные частицы, будут связываться и ориентироваться граничной фазой по мере удаления от твердой поверхности грунтовых частиц все меньшими силами; они образуют слои *рыхлосвязанной* (лиосорбированной) воды, которые поддаются выдавливанию из пор грунта внешним давлением до нескольких  $\text{кг/см}^2$ .

Наконец, молекулы воды, находящиеся вне сферы действия электромолекулярных сил взаимодействия с поверхностью минеральных частиц, будут образовывать *гравитационную* воду, движение которой происходит под действием напора, *капиллярную*, подтягиваемую на некоторую высоту силами капиллярного натяжения.

Капиллярная и гравитационная вода образуют *свободную воду*, или так называемую *грунтовую воду*.

На рис.1 показана схема электромолекулярного взаимодействия поверхности минеральных частиц с водой.

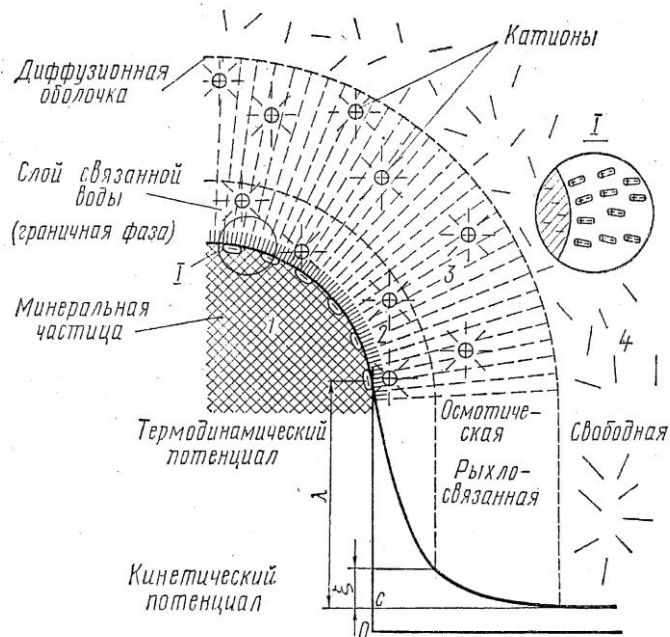


Рис.1. Схема электромолекулярного взаимодействия поверхности минеральной частицы с водой

1 – минеральная частица; 2 – вода связанная; 3 – вода рыхлосвязанная (осмотическая); 4 – вода свободная

### 1. 3. Водопроницаемость грунтов

Начало развития теории фильтрации положил Анри Дарси (1803 – 1858 г.г.) своими экспериментами по фильтрации на образце песка, помещенном в цилиндр (рис.2).

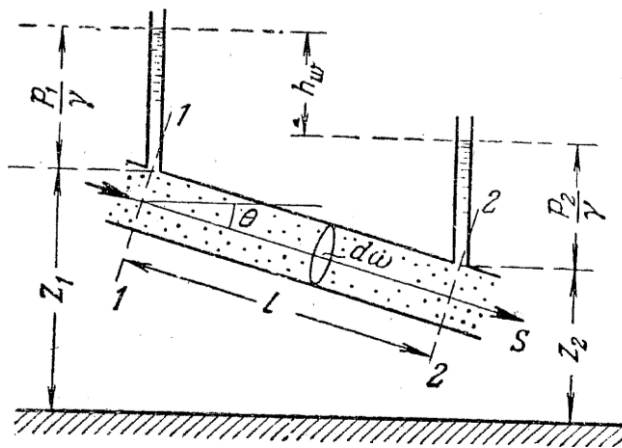


Рис.2. Установка А.Дарси

Он установил закон движения воды в песке (закон сопротивления при фильтрации), который был сформулирован следующим образом: «Для песка одного и того же качества можно допустить, что пропускаемый им расход пропорционален напору и обратно пропорционален толщине фильтрующего слоя». Математически этот закон выглядит следующим:

$$Q = \kappa_{\phi} \omega \frac{h_{\omega}}{l} \quad (4)$$

где  $\omega$  – живое сечение цилиндра,  $h_{\omega}$  – потери напора на участке длиной  $l$ ,  $\kappa_{\phi}$  – коэффициент, характеризующий фильтрационные свойства грунта, называемый коэффициентом фильтрации.

Коэффициент фильтрации равен скорости фильтрации при градиенте, равном единице.

Выполнив преобразования зависимости (4) имеем закон Дарси

$$V = \kappa_{\phi} \cdot J \quad (5)$$

где  $J$  – градиент напора (пьезометрический уклон)

$$J = \frac{h_{\omega}}{l} \quad (6)$$

Впоследствии этот закон был распространен и на другие грунты и пористые материалы, например: глинистые и торфяные грунты, сильнотрещиноватые породы, бетон и т.п.

Коэффициент фильтрации играет важную роль в фильтрационных расчетах, поэтому изучению этого параметра посвящено большое количество экспериментальных и теоретических исследований. Коэффициент фильтрации имеет размерность скорости. Ориентировочные значения коэффициентов фильтрации представлены в нижеследующей табл. 1.

#### Ориентировочные коэффициенты фильтрации грунтов [3, с.57]

Таблица 1

Грунт	$\kappa_{\phi}$ , см/с
Горная масса	$A \cdot 10^1 \div A \cdot 10^{-1}$
Гравийно-галечниковый	$A \cdot 10^0 \div A \cdot 10^{-1}$
Гравийно-галечниковый-песчаный	$A \cdot 10^{-2} \div A \cdot 10^{-3}$
Песок пылеватый*	$1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-5}$
Песок мелкий*	$1 \cdot 10^{-2} \div 1 \cdot 10^{-4}$
Песок средней крупности*	$1 \cdot 10^{-2} \div 1 \cdot 10^{-3}$
Песок крупный*	$1 \cdot 10^1 \div 1 \cdot 10^{-2}$
Супесь	$A \cdot 10^{-5} \div A \cdot 10^{-9}$
Суглинок	$A \cdot 10^{-6} \div A \cdot 10^{-9}$
Глина	$A \cdot 10^{-7} \div A \cdot 10^{-11}$
Лесс	$A \cdot 10^{-5} \div A \cdot 10^{-6}$
Торф	$A \cdot 10^{-3} \div A \cdot 10^{-4}$

где  $A$  – целое число от 1 до 9; \* - данные по [6, с.38].

Из приведенной таблицы видно, что значения коэффициентов фильтрации грунтов даже одних и тех же наименований изменяются в широких пределах.

Фильтрационные свойства грунтов часто определяют метод фильтрационного расчета.

Абсолютно непроницаемых грунтов в природе не имеется [1, с. 60]. Обычно *непроницаемым* грунтом называется грунт, проницаемость которого весьма мала по сравнению с проницаемостью другого грунта.

В инженерной практике один грунт по отношению к другому считается водоупорным при соотношении коэффициентов фильтрации более 20. Таким образом, непроницаемость грунта имеет относительное значение.

Проницаемые грунты подразделяются на грунты *изотропные* и *анизотропные*.

В любой точке изотропного грунта коэффициент проницаемости (фильтрации) не зависит от направления фильтрации. Изотропные грунты, в свою очередь, подразделяются на *однородные* и *неоднородные*. В однородных грунтах коэффициент фильтрации не зависит от координат области фильтрации, являясь постоянным.

В анизотропных грунтах коэффициент фильтрации в данной точке *зависит от направления скорости фильтрации*. Примером анизотропных грунтов являются песчаники, лессовые грунты [1, с.60].

Часто анизотропность грунта обусловлена тем, что грунт образован из чередующихся тонких изотропных слоев с двумя различными значениями коэффициента фильтрации  $k_1$  и  $k_2$  (рис.2).

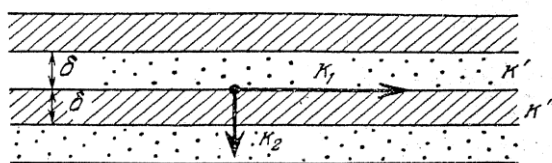


Рис. 3. Анизотропия грунтов

Значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  являются максимальными и минимальными его значениями, а соответствующие им направления будут *главными направлениями анизотропии*.

Если в анизотропном грунте главные направления анизотропии не зависят от координат области фильтрации, то такой *анизотропный* грунт называется *однородным*. Примером *однородно-анизотропного* грунта является грунт, образованный из тонких слоев с чередующимися постоянными значениями коэффициента фильтрации  $k_1$  и  $k_2$  грунтов и с постоянными толщинами  $\delta$ . При этом поверхности соприкосновения слоев должны быть параллельными плоскостями.



*Неоднородно-анизотропными* грунтами называются грунты главные направления анизотропии или же значения  $k_1$  и  $k_2$  являются функциями координат [1, с.62].

Если тело плотины (противофильтрационного элемента) выполнено из достаточно однородных глинистых или песчаных грунтов, то коэффициент анизотропности ( $k_a = k_1/k_2$ ) сравнительно невелик (до  $2 \div 3$ ), и задача может решаться как изотропная [3, с.374]. Анизотропия в таких грунтах чаще всего возникает вследствие укатки грунта горизонтальными слоями.

Возможность возникновения анизотропных свойств грунта должна тщательно анализироваться и при необходимости в полученное решение должны вноситься соответствующие поправки, особенно в расчетах кривой депрессии. На рис. 4 показаны гидродинамические сетки однородной плотины из изотропного и анизотропного грунта [3, с.374].

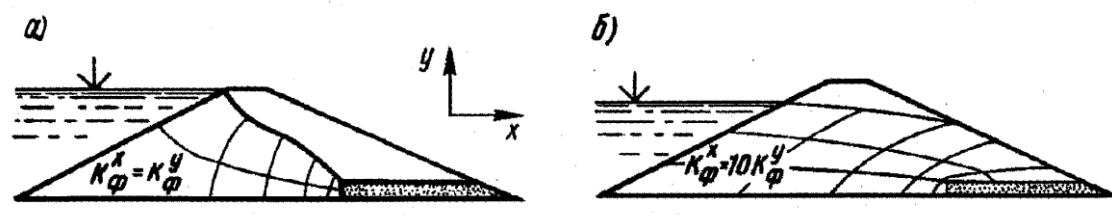


Рис. 4. Гидродинамические сетки в плотине с плоским дренажем:

а) при изотропной проницаемости; б) – при анизотропной проницаемости

Как видно из приведенного примера, роль плоского дренажа при анизотропных свойствах грунта в плотине резко уменьшается, повышается линия депрессии и точка высачивания.

#### 1. 4. Виды фильтрации воды

Различается два вида фильтрации – безнапорная и напорная.

*Безнапорная фильтрация* характеризуется наличием свободной депрессионной поверхности, соприкасающейся с атмосферой. Примером безнапорной фильтрации является фильтрация воды в теле грунтовых плотин и в обход сооружений (рис.5).

*Напорная фильтрация* характеризуется отсутствием свободной депрессионной поверхности, область фильтрации ограничивается сверху поверхностью сооружения или кровлей водоупорного грунта. Примером напорной фильтрации может служить фильтрация воды над бетонной плотиной (рис.6<sup>а</sup>), под судоводным шлюзом, зданием ГЭС, межпластовая фильтрация.

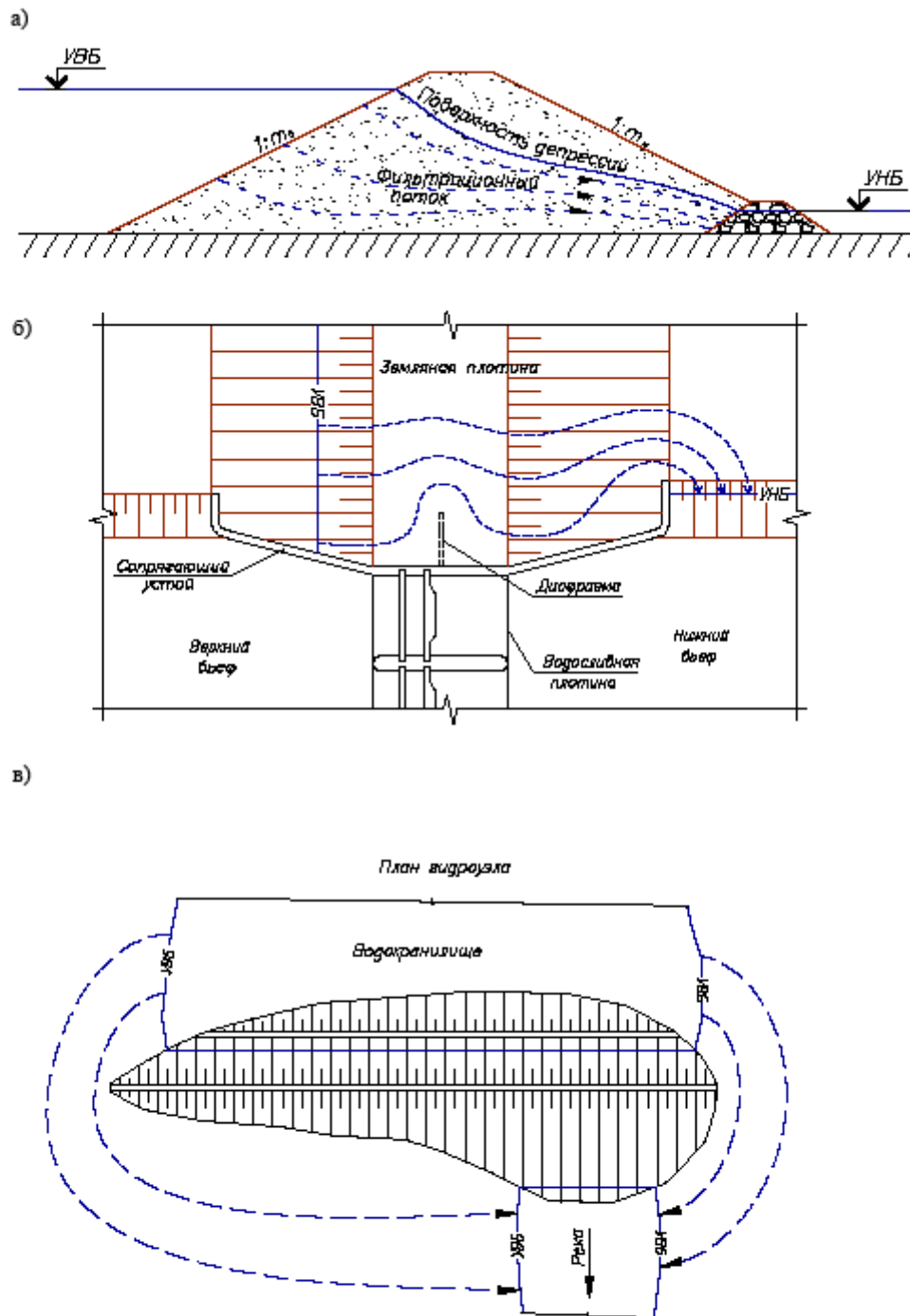


Рис. 5 Безнапорная фильтрация

а) в теле грунтовой плотины    б) в обход сопрягающего устоя  
в) в обход грунтовой плотины

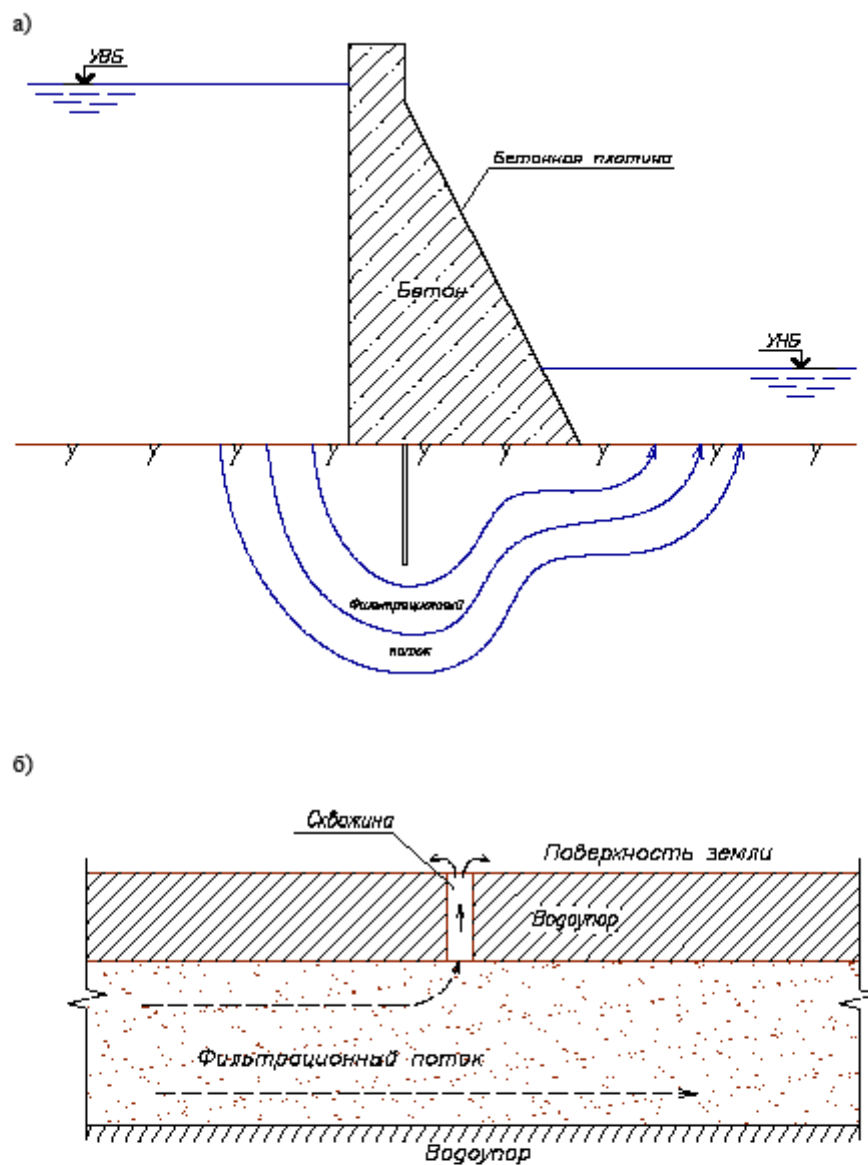


Рис. 6 Напорная фильтрация воды

а) в основании бетонной плотины, б) в межпластовом пространстве

### 1. 5. Уравнения фильтрации воды

Основное дифференциальное уравнение установившегося фильтрационного потока (уравнение неразрывности) в двумерных условиях имеет следующий вид [1,2,3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{\Phi} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{\Phi} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0, \quad (7)$$

где  $h$  – пьезометрический напор;  $x, y$  – прямоугольные декартовы координаты;  $k_{\Phi}$  – коэффициент фильтрации.

В случае однородно-изотропных грунтов уравнение (7) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0. \quad (8)$$

В инженерных расчетах гидротехнических сооружений в основном используется последнее уравнение (8).

Иногда требуется решать задачи неустановившейся фильтрации, что связано с колебанием уровня в водохранилище, с уплотнением водонасыщенных грунтов или при откачке (закачке) жидкости в слои грунта. В этом случае уравнение неразрывности в случае переменного напора приобретает вид [3, с. 61]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{\Phi} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{\Phi} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (9)$$

где  $h$  – напорная функция в расчетной области, изменяющаяся во времени  $t$ ;  $\mu$  – коэффициент водоотдачи (водопоглощения) грунта.

Решение уравнений неразрывности фильтрационного потока ведется при соответствующих краевых условиях. *Краевые условия* включают в себя начальные и граничные условия.

*Начальные условия*  $h = f(x, y, t)$  назначаются лишь для уравнения (9). Для уравнения (8) они не имеют смысла.

*Граничные условия* задаются следующим образом:

а) на границах водных бассейнов и в дренажах

$$(x, y) = f(t) \quad (10)$$

$$\text{или } h(x, y) = const \quad (11)$$

б) на границах фильтрующей области

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0. \quad (12)$$

где  $n$  – нормаль к границе.

## 2. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений

### 2.1. Цели фильтрационных расчетов

Фильтрационными расчетами гидротехнических сооружений надлежит определять следующие параметры фильтрационного потока [8,9]:

- а) положение свободной поверхности фильтрационного потока (депрессионной поверхности) в теле плотины и берегах;
- б) фильтрационный расход через тело плотины, основание и берега;
- в) напоры (или градиенты напора) фильтрационного потока в теле плотины, основании, а также в местах выхода фильтрационного потока в дренаж, в нижний бьеф за подошвой низового откоса, в местах контакта грунтов с различными характеристиками и на границах противофильтрационных устройств.

При неоднородном или анизотропном геологическом строении основания параметры фильтрационного потока следует определять с учетом этих факторов.

Первостепенной целью фильтрационных расчетов является оценка фильтрационной прочности тела и основания сооружения, а также противофильтрационных устройств. Для этой оценки требуются численные значения градиентов пьезометрического напора, которые также определяются фильтрационными расчетами.

### 2.2. Методы фильтрационных расчетов

Основными методами фильтрационных расчетов являются [3, с.61]:

- а) гидромеханические;
- б) гидравлические;
- в) графические;
- г) численные;
- д) аналоговые;
- е) экспериментальные.

#### 2.2.1. Гидромеханические методы

Основаны на аналитическом решении дифференциальных уравнений фильтрации. Результатом решения является функция пьезометрического напора

$$h=f(x, y, t), \quad (13)$$

позволяющая построить гидродинамическую сетку [2, с. 62], [7, с. 462], т.е. семейство эквипотенциалей (линий равного напора) и линий тока (траекторий движения частичек жидкости).

В качестве примера гидродинамической сетки представлен рис. 7.

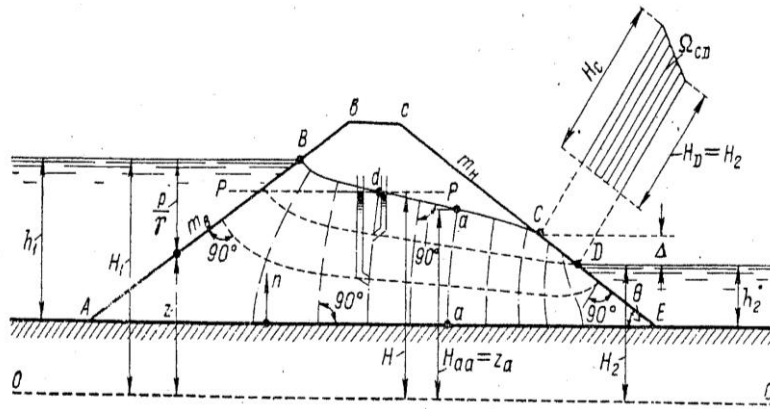


Рис. 7. Гидродинамическая сетка в земляной однородной плотине.

Из рисунка видно, что область фильтрации здесь имеет форму фигуры ABCDE, со следующими граничными участками.

*Участок AB.* Во всех точках его напор  $h$  одинаков и равен  $H_1$ , т.е. линия AB является эквипотенциалью.

*Участок DE.* Этот участок так же, как и AB, представляет собой линию равного напора  $h = H_2$ .

*Участок AE* (поверхность водоупора). Эта поверхность представляет собой нижнюю граничную линию тока.

*Участок BC* (кривая депрессии). Кривая депрессии является линией равного давления (при неучете капиллярного поднятия это давление равно атмосферному). Кроме того, кривая депрессии является верхней граничной линией тока. Характерно для кривой депрессии то обстоятельство, что в любой ее точке

$$h = z, \quad (14)$$

где  $z$  – превышение рассматриваемой точки над плоскостью сравнения О-О.

Таким образом, в любой точке кривой депрессии напор равен превышению этой точки над плоскостью сравнения.

*Участок CD.* Он представляет собой промежуток высачивания воды непосредственно в атмосферу. Этот участок так же, как и кривая депрессии, является линией атмосферного давления, в связи с чем к нему также относится соотношение (14). При этом данный участок не является линией тока; линии тока пересекают его под некоторым углом, не равным  $90^\circ$ . Характерно для этого участка то, что напор  $h$  вдоль его, согласно зависимости (14), изменяется по линейному закону.

В точке С линия откоса С-Е является касательной к кривой депрессии. Следовательно, пьезометрической уклон  $J_c$  в точке С должен быть равен уклону низового откоса плотины

$$J_c = \sin \theta, \quad (15)$$

где  $\theta$  - угол наклона низового откоса к горизонту

На рисунке 7 штрихпунктирными линиями показаны линии равного напора (живые сечения), пунктирными – линии тока. Линии равного напора составляют прямой угол с поверхностью водоупора АЕ и кривой депрессии ВС; в связи с этим каждая точка линий АЕ и ВС характеризуется дополнительным условием

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0, \quad (16)$$

где  $n$  – нормаль к АЕ или ВС.

Линии тока (за исключением линий тока АЕ) составляют прямые углы с линиями откоса АВ, ЕД (но не DC) и живыми сечениями.

Если к какой-либо линии равного напора присоединить пьезометры, то уровни в них должны установиться на одной горизонтальной плоскости Р-Р, пересекающей кривую депрессии в точке примыкания к ней рассматриваемой линии равного напора.

### 2.2.2. Гидравлические методы

Гидравлические решения фильтрации [3,с.70], [10,с.319] содержат ряд допущений: о форме фильтрационных струек, о распределении скоростей и давлений по сечениям и пр. Поэтому гидравлические методы решения менее точны, чем гидромеханические, и дают положение депрессионной кривой, средние скорости, градиенты напора, величину фильтрационного расхода. Гидравлические методы дают простые, удобные решения, поэтому они получили широкое применение в инженерных расчетах.

Гидравлическим методом решены задачи о фильтрации в однородных плотинах и плотинах с экранами, ядрами или диафрагмами, как недренированных, так и дренированных.

Ниже приводятся примеры фильтрационного расчета гидравлическими методами.

#### Фильтрация через однородную плотину

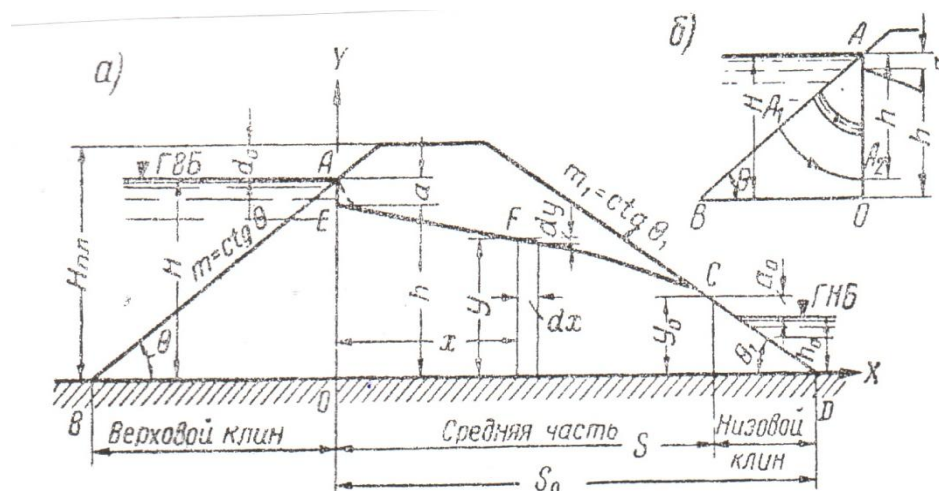


Рис. 8. Схема к расчету фильтрации через однородную плотину

на непроницаемом основании

Алгоритм расчета следующий.

1. Профиль плотины делится на три части:
  - верховой клин – треугольник, отсекаемый вертикалью, проведенной через урез воды верхнего бьефа (точка А);
  - низовой клин – треугольник, отсекаемый вертикалью в точке С – выхода (высачивания) кривой депрессии на низком откосе;
  - среднюю часть между указанными вертикалями.
2. Определяется поведение напора «h» в пределах верхового клина АОВ. Для этого приняв траекторию струек по дугам окружности, имеющим центр в точке А, с выходной высотой h и вычисляя расход q по скорости средней струйки с радиусом R=h/2 под напором a=H-h записывается следующая формула:

$$q = V \cdot h = -k_{\phi} \cdot J \cdot h = k_{\phi} \frac{a}{\frac{h \cdot \pi(90^{\circ} - \theta)}{2 \cdot 180^{\circ}}} \cdot h \approx k_{\phi} \cdot \frac{115}{90^{\circ} - \theta^{\circ}} \cdot a \quad (17)$$

Движение воды в средней части профиля совершается при наличии свободной поверхности депрессии EFC, уравнение которой в осях XOY будет выводиться следующим образом.

$$V = -k_{\phi} \frac{dy}{dx}, \quad (18)$$

$$\text{и } q = V \cdot y = -k_{\phi} y \frac{dy}{dx}. \quad (19)$$

Отсюда  $q dx = -k_{\phi} \cdot y dy$  и после интегрирования

$$Qx = -k_{\phi} \cdot \frac{y^2}{2} + C \quad (20)$$

При  $x = 0, y = h$

$$C = \frac{k_{\phi} h^2}{2}, \text{ следовательно}$$

$$qx = -\frac{k_{\phi} y^2}{2} + \frac{k_{\phi} h^2}{2} = \frac{k_{\phi}}{2} (h^2 - y^2).$$

$$q = \frac{k_{\phi}}{2x} (h^2 - y^2). \quad (21)$$

Зависимость (21) является уравнением Ж. Дюпюи (1857 г.).



Расход фильтрующейся воды определяется по формуле (21) путем подстановки  $x = S_0, y = y_0 = a_0 + h_0$ :

$$q = \frac{k_\phi}{2S} [h^2 - (a_0 + h_0)^2] \quad (22)$$

Обозначив длину OD через  $S_0$ , то

$$S = S_0 - m_1(a_0 + h_0), \quad (23)$$

а формула (22) будет представлена в виде:

$$q = \frac{k_\phi [h^2 - (a_0 + h)^2]}{2[S_0 - m_1(a_0 + h_0)]}. \quad (24)$$

В пределах низового клина (рис. 9) фильтрационный расход определяется отдельно для зоны выше уровня нижнего бьефа (I зона) и ниже уровня нижнего бьефа (II зона) в предположении, что струйки жидкости направлены горизонтально.

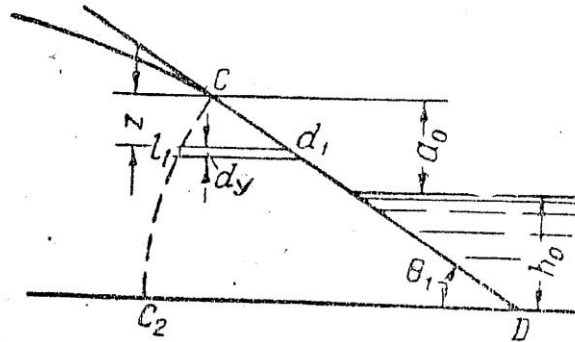


Рис. 9. Схема к расчету низового клина

Приняв границу клина по эквипотенциале  $CC_2$ , представляющей собой дугу окружности с центром в точке D, то:

в зоне I

$$dq_I = k_\phi \frac{y}{l_1 d_1} dy = k_\phi \frac{y}{y/\sin \theta_1} dy = k_\phi \sin \theta_1 dy, \quad (25)$$

$$q_I = k_\phi \sin \theta_1 \int_0^{a_0} dy = k_\phi a_0 \sin \theta_1; \quad (26)$$

в зоне II

$$dq_{II} = k_\phi \frac{a_0}{y} \sin \theta_1 dy, \quad (27)$$

$$q_{II} = \int_{a_0}^{a_0+h_0} dq_{II} = k_\phi a_0 \sin \theta_1 \int_{a_0}^{a_0+h_0} \frac{dy}{y} = k_\phi a_0 \sin \theta_1 \ln \frac{a_0+h_0}{a_0}, \quad (28)$$

Общий фильтрационный расход через низовой клин:

$$q = q_I + q_{II} = k_{\phi} a_0 \sin \theta_1 \left( 1 + \ln \frac{a_0 + h_0}{a_0} \right).$$

Учитывая, что во всех сечениях плотины проходит один и тот же расход  $q$ , фильтрационный расчет сводится к решению следующей системы трех уравнений [10, с.320]:

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{115k_{\phi}(H-h)}{90^{\circ}-\theta^{\circ}} \\ q &= \frac{k_{\phi}[h^2-(a_0+h)^2]}{2[S_0-m_1(a_0+h_0)]} \\ q &= k_{\phi}a_0\sin\theta_1 \left( 1 + \ln \frac{a_0+h_0}{a_0} \right) \end{aligned} \right\}$$

Решение этой системы дает возможность определить неизвестные  $h$ ,  $a_0$  и  $q$ .

Расчет может быть упрощен определением величины  $a_0$  по формуле Замарина Е.А. [10, с.375]:

$$a_0 = \frac{s_1}{m_1} - \sqrt{\left(\frac{s_1}{m_1}\right)^2 - (H - h_0)^2}, \quad (30)$$

Обозначения в этой формуле представлены на рис.10.

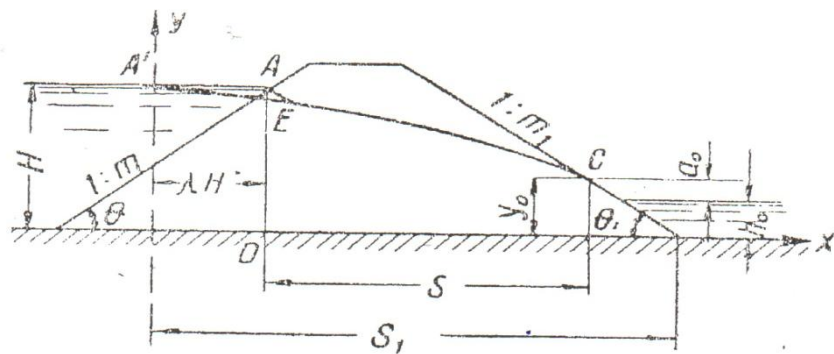


Рис.10. Построение кривой депрессии с учетом верхового клина длиной  $\lambda H$

#### *Земляная плотина с ядром*

Для фильтрационного расчета плотины с ядром используется метод виртуальных длин Павловского Н.Н. Этот метод заключается в следующем (рис. 11):

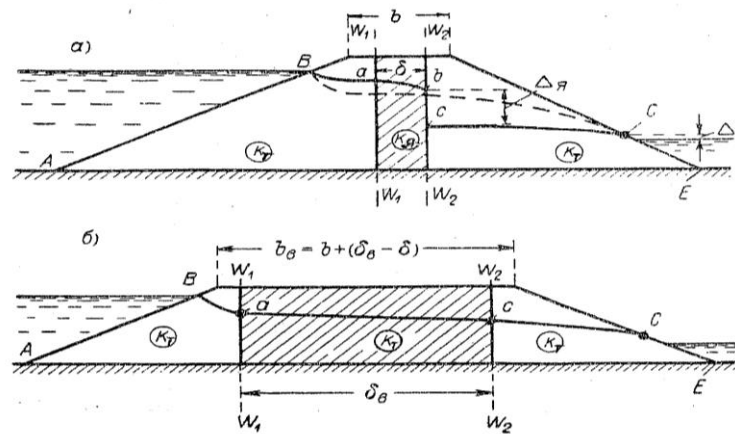


Рис.11. К расчету плотин с ядром: а) – реальная схема; б) – фиктивная схема

а) Маловодопроницаемое ядро с коэффициентом фильтрации  $k_y$  и толщиной  $\delta$  заменяется другим воображаемым (фиктивным) ядром, имеющим коэффициент фильтрации, равный коэффициенту фильтрации  $k_T$  остальной части тела плотины, и толщину

$$\delta_B = \delta \frac{k_T}{k_y}, \quad (31)$$

где  $\delta_B$  – виртуальная толщина ядра.

Виртуальное ядро, имеющее увеличенный коэффициент фильтрации и увеличенную толщину обладает той же сопротивляемостью движению воды, что и действительное ядро.

б) Полученный фиктивный профиль рассчитывается как однородная земляная плотина – вычисляется фильтрационный расход, строится линия депрессии.

в) Фиктивный участок линии депрессии ОС заменяется реальным ядром, для этого верховой и низовой клинья плотины смещаются так, чтобы расстояние между вертикалями  $W_1$  и  $W_2$  стало равным  $\delta$ . Участки Ва и сС построенной кривой депрессии сохраняются, а также сохраняется величина вычисленного фильтрационного расхода.

### *Земляная плотина с экраном*

Из-за малой водопроницаемости экрана кривая депрессии, построенная для однородной плотины (на рис.12, кривую, показанную пунктиром) изменяется следующим образом:

- с низовой стороны экрана в теле плотины, в связи с уменьшением фильтрационного расхода, кривая депрессии становится более пологой (линия сd на рис.):

- свободная поверхность в пределах представляет собой линию ab, направленную ортогонально к верховой грани экрана;

- внутренний промежуток высачивания оказывается наклонным (линия bc); вода, профильтровавшаяся через экран в пределах промежутка высачивания bc, как бы в виде дождя на поверхность начального участка кривой депрессии.

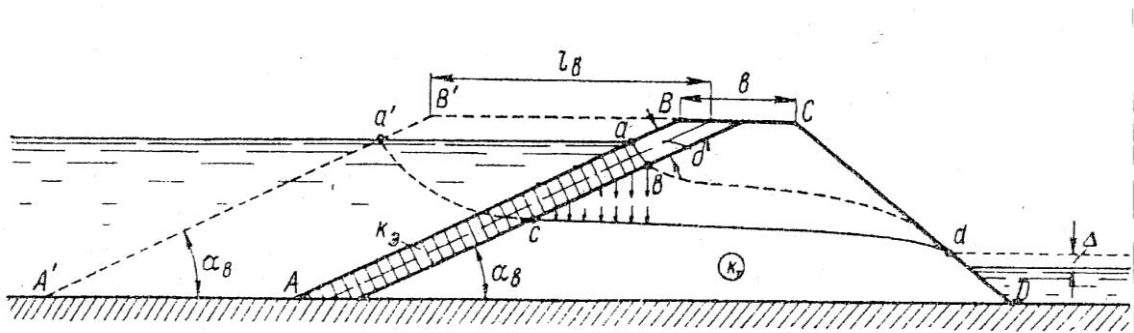


Рис.12. К расчету плотины с экраном

По методу виртуальных длин действительный экран, имеющий коэффициент фильтрации  $k_z$  и толщиной  $\delta$ , заменяется воображаемым виртуальным экраном, имеющим коэффициент фильтрации тела плотины  $k_r$ . При этом с таким изменением коэффициента фильтрации экрана верховой откос плотины AB переносится параллельно самому себе в положение A'B' определяемое размером

$$l_b = \delta \frac{k_r}{k_z} \sin \alpha_b . \quad (32)$$

Полученный профиль A'B'CD рассчитывается как однородная плотина, при этом находится удельный расход  $q$  и линия депрессии cd.

### Заключение

В настоящих указаниях представлены основы теории фильтрации и два наиболее применяемых метода решения фильтрационных задач гидротехники.

Графические, численные, аналоговые, экспериментальные методы решения задач представлены во II части методических указаний с идентичным названием.

## Литература

1. Аравин В.И. и Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой среде. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953. – 616 с.
2. Полубаринова–Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
3. Рассказов Л.Н. и др. Гидротехнические сооружения. Часть I, Учебник для вузов. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. – 576 с.
4. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1979. – 272 с.
5. Аравин В.И., Носова О.Н. Натурные исследования фильтрации. – Л.: Энергия, 1969. – 256 с.
6. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. Под общ. ред. В.П.Недриги – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
7. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия, 1971. – 552 с.
8. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения.
9. СНиП 2.06.05-84\*. Плотины из грунтовых материалов.
10. Гришин М.М. Гидротехнические сооружения. – М.: Госстройиздат, 1962. – 764 с.

Битюрин Александр Константинович

Козлов Александр Павлович

Битюрин Константин Александрович

## Фильтрация воды в гидротехнических сооружениях

Часть I – теоретические основы, гидромеханические и гидравлические методы  
расчета фильтрации

Методические указания для проведения лекционных и практических занятий  
спецкурса по дисциплине гидравлика, а также для выполнения курсовых и  
дипломных проектов студентами специальности № 270104 – Гидротехническое  
строительство

---

Подписано к печати . Формат 60x90 1/16 Бумага газетная. Печать трафаретная

Уч. изд. л. 1,0 Усл. печ. л. 1,2 Тираж 100 экз. Заказ №

---

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65