

**Г.Г. КРУГЛОВ**

к. т. н., доцент,  
зав. кафедрой «Гидротехническое  
и энергетическое строительство» БНТУ

# О ПРАКТИКЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ НЕОДНОРОДНЫХ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН



Плотины из грунтовых материалов являются самым древним типом искусственных подпорных сооружений. В Египте, Индии, Перу и других странах простейшие грунтовые плотины строились за несколько тысяч лет до новой эры. В России в документах XIII века о грунтовых плотинах говорится, как об обычных распространенных сооружениях, а построенная в 1780 году Змеиногорская плотина высотой 18 м существует в настоящее время.

Наибольшее распространение грунтовые плотины получили в XX веке, особенно в 50–60-х годах, когда была возведена грунтовая плотина

Нурекской ГЭС высотой 303 м, которая и сегодня является самой высокой плотиной в мире. Широкое распространение грунтовых плотин объясняется развитием техники ведения земельно-кальных работ, возможностью полной механизации всего технологического процесса по возведению плотин от разработки грунта в карьере до укладки его в тело плотин, объемы которых достигают 130 млн м<sup>3</sup>.

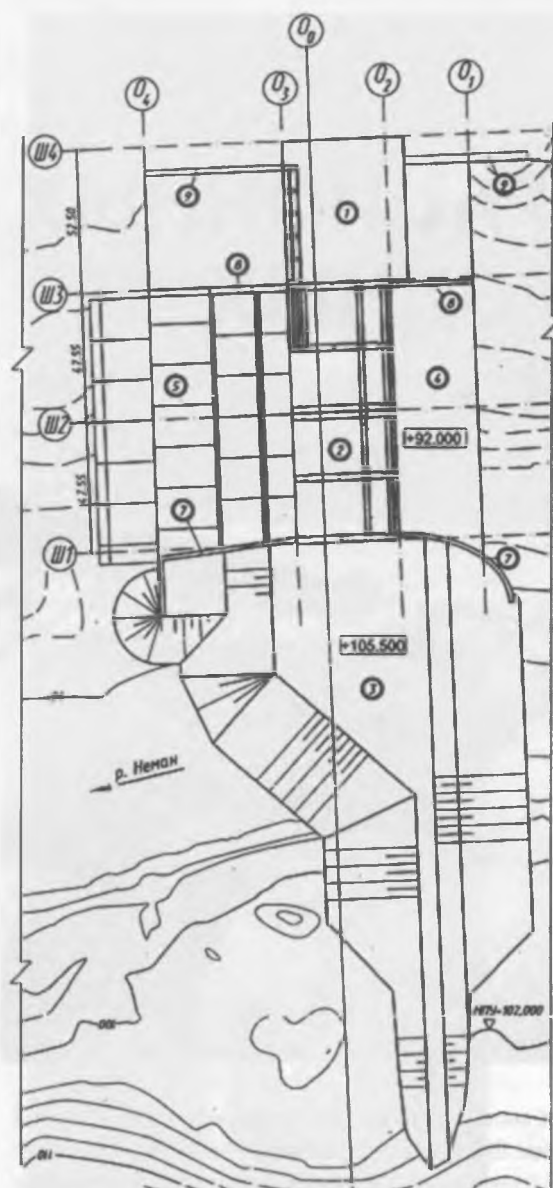
На территории Беларуси с помощью земляных плотин, которые являются самым распространенным типом грунтовых плотин, создано более 140 водохранилищ, как на малых (рис. 1 и 2), так и на крупных реках (рис. 3 и 4).



Рис. 1. Земляная плотина ГЭС «Алешино» на реке Зарежанке



Рис. 2. Земляная плотина водохранилища «Саковщинское» на реке Западная Березина



### Экспликация сооружений

| Номер на плане | Наименование                    |
|----------------|---------------------------------|
| 1              | Здание ГЭС                      |
| 2              | Водосливная плотина             |
| 3              | Земляная плотина                |
| 4              | Подводящий канал                |
| 5              | Отводящий канал                 |
| 7              | Левобережный сопрягающий устой  |
| 8              | Раздельная стенка               |
| 9              | Правобережный сопрягающий устой |

### Условные обозначения

① Номер сооружения по экспликации

### Масштаб

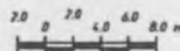


Рис. 3. Компановка Гродненской ГЭС на реке Неман

вает нормальное использование ее по назначению. Неисправным называется такое состояние плотины, при котором она не соответствует хотя бы одному из нормативно-технических требований [1–3].

Предельным состоянием плотины является такое состояние, при котором ее дальнейшая эксплуатация недопустима (из-за возможной аварии) или нецелесообразна.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния плотины, называется **отказом**. По природе возникновения и протекания процессов, приводящих к отказу, различают **отказы внезапные** и **постепенные**.

**Внезапные отказы** возникают в результате такого сочетания нагрузок и воздействий, при котором превышаются возможности плотины их воспринимать. Примером внезапного отказа плотины является оползание откосов при землетрясении. Причиной внезапных отказов чаще всего бывают дефекты изысканий, проектирования, строительства или эксплуатации плотин.

**Постепенный отказ** характерен постепенным достижением предельного значения параметра эксплуатационной надежности. Постепенные отказы возникают главным образом вследствие износа и старения материалов.

Постепенные отказы могут быть всегда исключены, если ведутся систематические наблюдения за теми параметрами, которые определяют надежность сооружения.

Одной из наиболее важных характеристик надежности является так называемая  $\lambda$ -характеристика, или интенсивность отказов, которая представляет собой отношение числа отказавших плотин  $n$  к среднему числу плотин  $N$ , исправно работающих за рассматриваемый отрезок времени  $\Delta t$ :

Техническое состояние земляной плотины характеризуется совокупностью значений параметров эксплуатационной надежности и качественных признаков состояния.

Состояние плотины называется исправным, когда она отвечает всем нормативно-техническим требованиям (эксплуатационным и эстетическим). В отличие от исправной работоспособная плотина удовлетворяет только эксплуатационным требованиям, выполнение которых обеспечи-

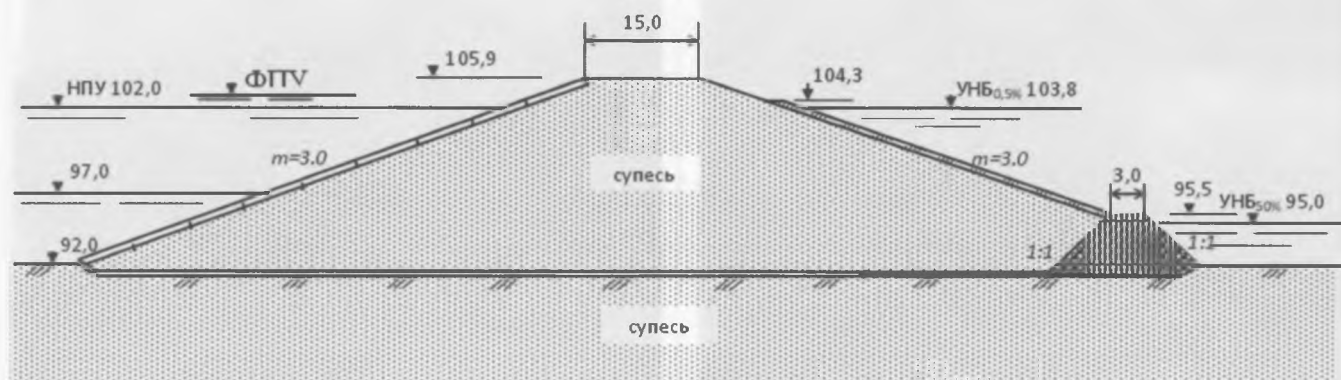


Рис. 4. Поперечное сечение земляной плотины Гродненской ГЭС

$$\lambda = \frac{n}{N \Delta t}$$

Знание закономерностей возникновения отказов, анализ и классификация их причин позволят обоснованно и целенаправленно проводить мероприятия по повышению качества изыскательских, проектных и строительных работ и уровня эксплуатации сооружений.

Как показывает практика, аварии и повреждения плотин и причины их вызывающие, могут быть самыми разнообразными. В литературе [4–8] приводятся данные ряда авторов Грунер (Швейцария), Такаса (Япония), которые обобщали причины аварий плотин, а наиболее полные сведения о повреждениях и авариях более 200 плотин приведены Мидлебруком (США). По данным этих авторов, в качестве основных причин аварий плотин были:

- сосредоточенная фильтрация через тело плотины и основание — 38 %;
- перелив воды через гребень плотны — 30 %;
- оползания и деформации откосов — 15 %;
- землетрясения — 7 %;
- волновые воздействия — 5 %;
- прочие факторы (образование сплошных ходов землеройными животными и т. д.) — 5 %.

Основная причина аварий земляных плотин связана с сосредоточенной фильтрацией через тело плотины. Разрыв плотины начинается с выхода фильтрационного потока в виде ключа-ручейка на откос, не защищенный специальным покрытием, или в виде грифона у подошвы низового откоса плотины. Характерным примером усиленной фильтрации через тело плотины является Ортокойская плотина на р. Чу (Киргизия), плотины Плизант-Валей, Девис, Хатгтаун (США) и др. В нашей республике подобные явления были отмечены на земляных плотинах водохранилищ «Любаньское» и «Красная Слобода», прудов «Первомайск» Солигорского района и «Тимковичи» Копыльского района.

Особенно часто это наблюдается на плотинах, построенных достаточно давно, без соблюдения необходимых требований к уплотнению грунта, устройству дренажей, обратных фильтров, а также в тех случаях, когда выход фильтрационного потока на незащищенный откос вызван ошибками в фильтрационных расчетах плотин.

В действовавшем до 1974 года СНиП [9] были приведены методы расчета фильтрации через земляные плотины. В последующих изданиях нормативной литературы и в действующем в настоящее время ТКП 45-3.04-150-2009 «Плотины из грунтовых материалов» нет рекомендуемых методов фильтрационного расчета, а перечислены только параметры фильтрационного потока, которые следует определять. Поэтому в проектной практике используются методы, приведенные в технической литературе [9–13].

Как показали проведенные исследования, существующий основной метод расчета земляных плотин с экраном (метод виртуальных длин, разработанный академиком Павловским Н.Н.) дает существенные погрешности в определении положения уровня грунтовых вод (кривой депрессии) в теле плотины.

Суть этого метода заключается в том, что неоднородная плотина с коэффициентом фильтрации грунта тела плотины  $K_1$  и экрана  $K_2$  приводится к однородной плотине с коэффициентом фильтрации  $K_r$ . Виртуальная толщина экрана ( $\delta_{\text{в}}$ ) определяется из условия равенства потерь напора фильтрационного потока в реальном экране ( $\delta_r$ ) и виртуальном по зависимости:

$$\delta_{\text{в}} = \delta_r \frac{\hat{E}_r}{\hat{E}_y} \quad (1)$$

После приведения плотины к виртуальному профилю (рис. 5) расчет фильтрации выполняется по известному методу расчета однородных плотин, достоверность которого подтверждена лабораторными и натурными исследованиями.

Ординаты кривой депрессии в теле плотины определяются по зависимости:

$$h_x = \sqrt{2 \frac{q}{K_r} (L - x) + h_c^2}, \quad (2)$$

где  $q$  — удельный фильтрационный расход воды в теле плотины, вычисленный по формуле:

$$\frac{q}{K_r} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L_p}; \quad (3)$$

$h_c$  — ордината кривой депрессии в сечении I—I (рис. 5), определяемая по зависимости:

$$h_c = \sqrt{H_1^2 - 2 \frac{q}{K_r} (L + \Delta L_{\text{в}} + L_3)}; \quad (4)$$

$H_1$  и  $H_2$  — глубина воды в верхнем и нижнем бьефах соответственно;

$L_p$  — расчетная длина, вычисляемая как:

$$L_p = L + \Delta L_{\text{в}} + \Delta L_{\text{г}} + \Delta L_3; \quad (5)$$

$L$  — расстояние от начала координат до верхней бровки дренажной призмы, определяемая по чертежу (рис. 5):

$$\Delta L_{\text{в}} = \frac{m}{3} H_2; \quad (6)$$

$m$  — заложение верхового откоса дренажной призмы;

$$\Delta L_{\text{г}} = \frac{m_{\text{в}}}{2m_{\text{в}} + 1} H_1. \quad (7)$$

Во всей технической литературе (9–13) длина виртуального экрана  $\Delta L_3$  определяется как проекция виртуальной толщины экрана  $\delta_{\text{в}}$  на горизонтальную ось, то есть:

$$L_3 = \delta_{\text{в}} \frac{\hat{E}_r}{\hat{E}_y} \sin \alpha. \quad (8)$$

В действительности при построении виртуального профиля плотины надо определять не проекцию виртуальной толщины экрана на горизонтальную ось, а расстояние  $bd$  (рис. 5), на которое переместится ось  $h_x$  при переходе от реального к виртуальному профилю, то есть к профилю однородной плотины. А это расстояние из треугольника  $cbd$  (рис. 5) будет определяться как:

$$L_3 = \delta_{\text{в}} \frac{\hat{E}_r}{\hat{E}_y} \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (9)$$

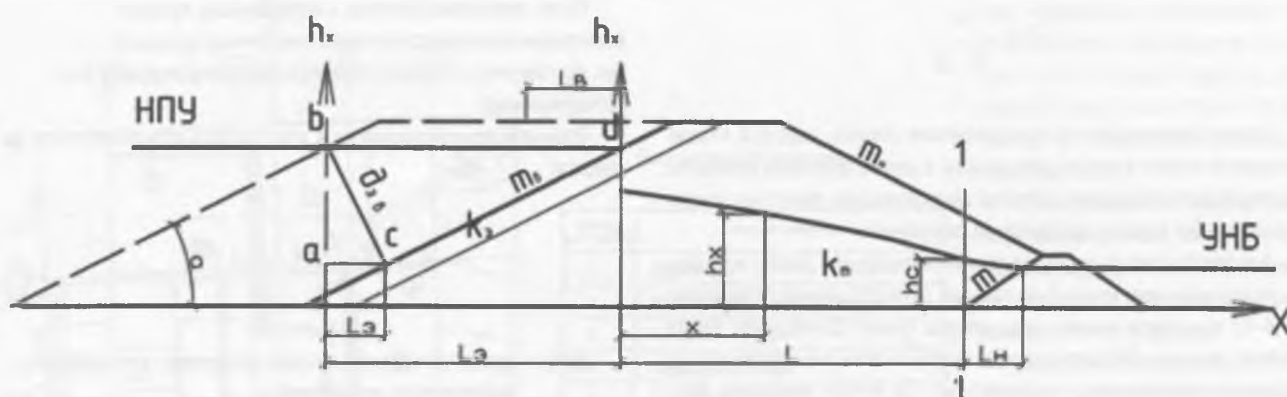
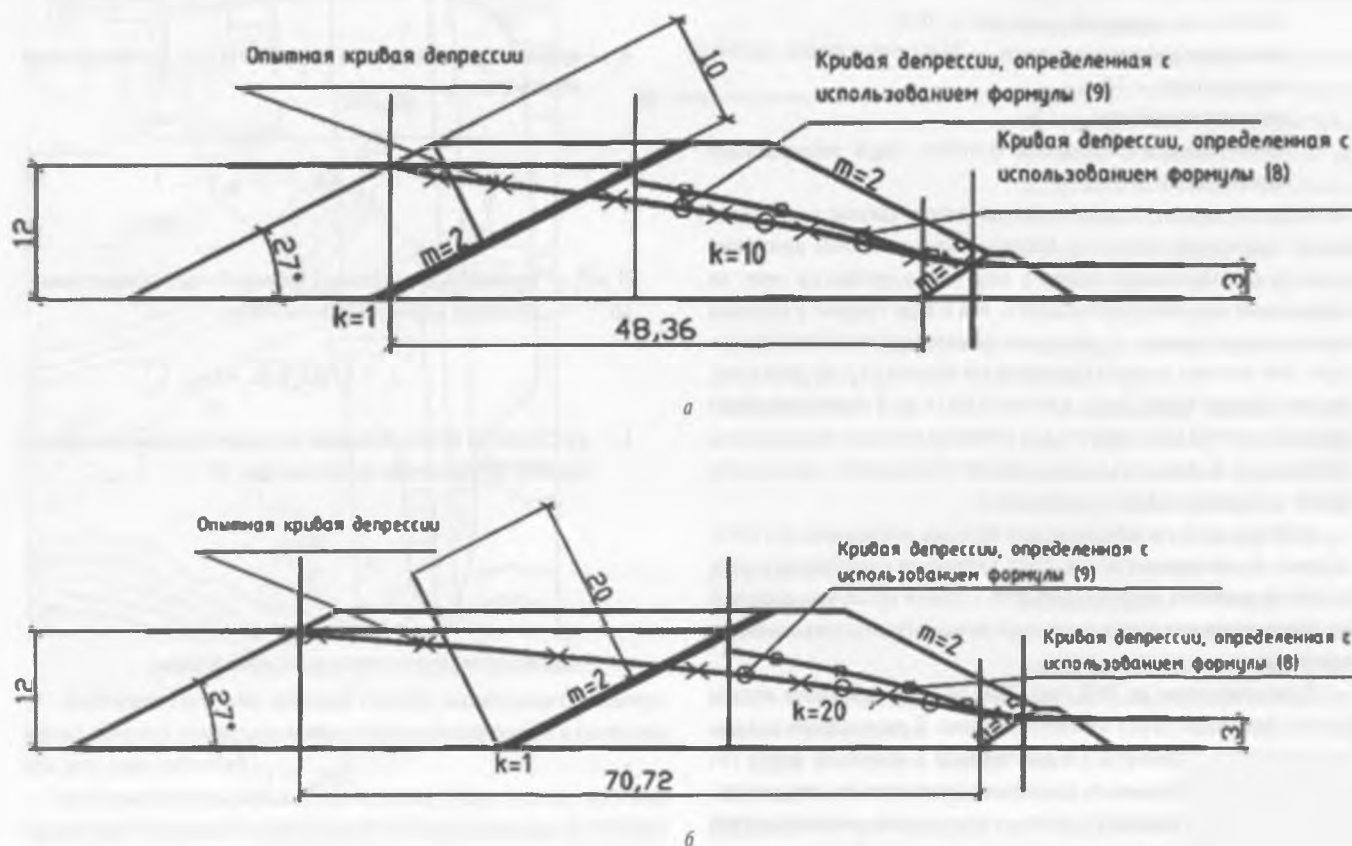


Рис. 5. Схема к фильтрационному расчету плотины с экраном

Рис. 6. Схемы к фильтрационным расчетам плотин: а — для соотношения  $\frac{\hat{E}_т}{\hat{E}_г} = 10$ ; б — для соотношения  $\frac{\hat{E}_т}{\hat{E}_г} = 20$ 

Проверить, какая из зависимостей (8) и (9) дает верный результат, можно следующим образом. Построив виртуальный профиль, соответствующий однородной плотине, рассчитать и построить на нем кривую депрессии, достоверность которой, как уже отмечалось, не вызывает сомнений. А затем наложить на эту кривую депрессии еще две, вычисленные с использованием зависимостей (8) и (9). Та из этих двух кривых, которая совпадает с достоверной кривой и будет верной, а следовательно, будет верной и зависимость для определения  $L_э$ .

Результаты таких расчетов для случаев соотношения коэффициентов фильтрации  $\frac{\hat{E}_т}{\hat{E}_г} = 10$  и  $\frac{\hat{E}_т}{\hat{E}_г} = 20$  приведены на рис. 6а и 6б. Как видно,

кривая депрессии, построенная по методу виртуальных длин, с использованием зависимости (9) полностью совпадает с достоверной кривой депрессии, что подтверждает правомерность использования этой зависимости.

Для оценки величины погрешности при определении ординаты кривой депрессии в случае использования зависимости (8) для всего возможного диапазона соотношения коэффициентов фильтрации грунтов тела

плотины и экрана, были выполнены расчеты для условий  $\frac{\hat{E}_т}{\hat{E}_г} = 50, 100,$

200, 500, 800, 1000 и определены значения ординаты кривых депрессий на расстоянии от оси ординат  $x = 10, 15$  и 25 м. Результаты расчетов приведены на рис. 7.

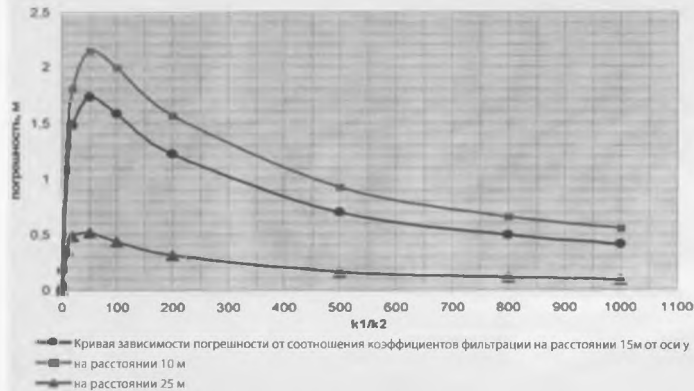


Рис. 7. График погрешности при вычислениях ординат в зависимости от соотношения коэффициентов фильтрации

Как видно из рисунка, максимальная погрешность при определении ординат кривых депрессий получается при соотношении  $\frac{\hat{E}_x}{\hat{E}_y} = 50$ . При увеличении соотношения коэффициентов фильтрации погрешность

уменьшается, а при  $\frac{\hat{E}_x}{\hat{E}_y} = \geq 500$  практически исчезает, что объясняется

значительным понижением кривой депрессии за экраном, когда ординаты кривых депрессий по всей длине незначительно отличаются от глубины воды в нижнем бьефе, то есть кривая депрессии приближается к прямой линии на отметке уровня воды в нижнем бьефе.

#### Основные выводы.

1. При переработке действующего ТКП 45-3.04-150-2009 его содержание следует дополнить рекомендуемыми методами фильтрационных расчетов земляных плотин.
2. Существующий основной метод фильтрационного расчета неоднородных земляных плотин (с экраном) необходимо исправить в части определения местоположения оси  $h'$ , чтобы избежать значительных (до 40–50 %) погрешностей при определении положения депрессионной кривой в теле плотины, что является основной причиной аварий земляных плотин.

#### Список литературы и использованных источников

1. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Издательство стандартов, 1983.
2. Голикевич Т.А. Прикладная теория надежности. — М.: Высшая школа, 1985.
3. Мирцхулава Ц.Е. Надежность гидромелиоративных сооружений. — М.: Колос, 1974.
4. Малаханов В.В. Техническая диагностика грунтовых плотин. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Ничипорович А.А. Плотины из местных материалов. — М.: Стройиздат, 1973.
6. Гогоберидзе М.И. Научные основы постановки натурных наблюдений на плотинах. — Тбилиси: Мецниереба, 1980.
7. Обобщение данных статистического анализа аварий и инцидентов в аспекте надежности плотин. М.И. Гогоберидзе, Р.Г. Какауридзе, Ю.Н. Микашвили, Д.Ц. Мирухулава. — Сообщения АН Груз.ССР 1977, т. 86, № 3.
8. Schultter N / Statistische Sicherheit der Talsperren/ Wasser, Enerqia, Laft, 1976. Vol. 68, № 5.
9. Глава СНиП II-И.4-62 Плотины земляные насыпные. Нормы проектирования. — Москва, 1964. — 60 с.
10. Гидротехнические сооружения. В 2 ч. Ч. 1/Под ред. М.М. Гришина. — М.: Высшая школа, 1979. — 615 с.
11. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика / Под ред. В.П. Недриги. — М.: Стройиздат, 1983. — 543 с.
12. Розанов Н.Н. Плотины из грунтовых материалов. — М.: Стройиздат, 1988. — 430 с.
13. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. — 2-е изд. — Ч. 1. Глухие плотины. — М.: Агропромиздат, 1985. — 303 с.