

Г.Г. КРУГЛОВк. 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-скальных 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 м³.

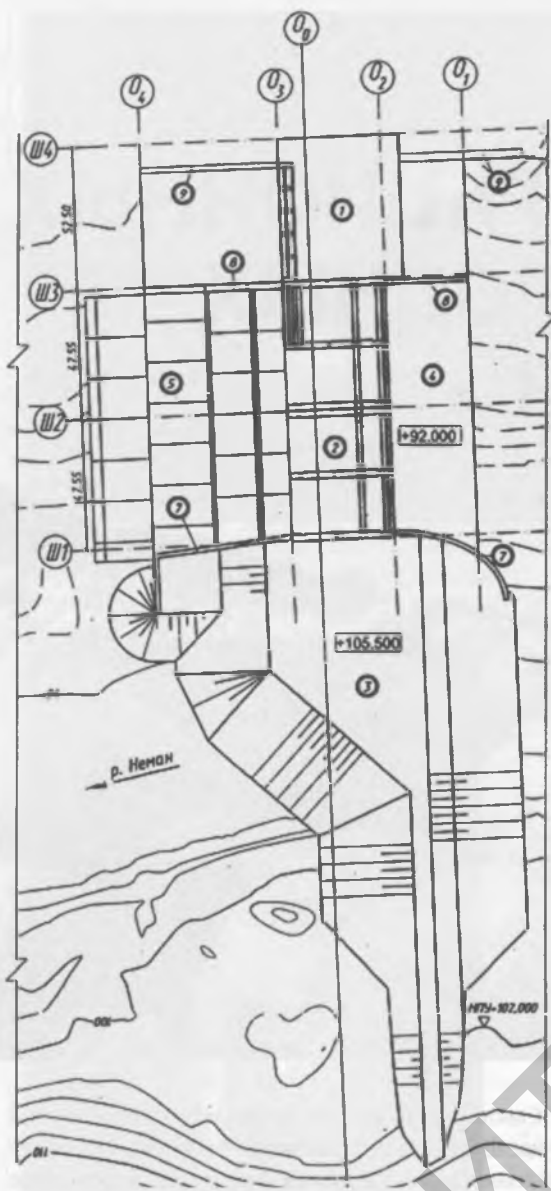
На территории Беларуси с помощью земляных плотин, которые являются самым распространенным типом грунтовых плотин, создано более 140 водохранилищ, как на малых (рис. 1 и 2), так и на крупных реках (рис. 3 и 4).



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



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



Рис. 3. Компонка 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.

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-

Одной из наиболее важных характеристик надежности является так называемая λ -характеристика, или интенсивность отказов, которая представляет собой отношение числа отказавших плотин k к среднему числу плотин N , исправно работающих за рассматриваемый отрезок времени Δt :

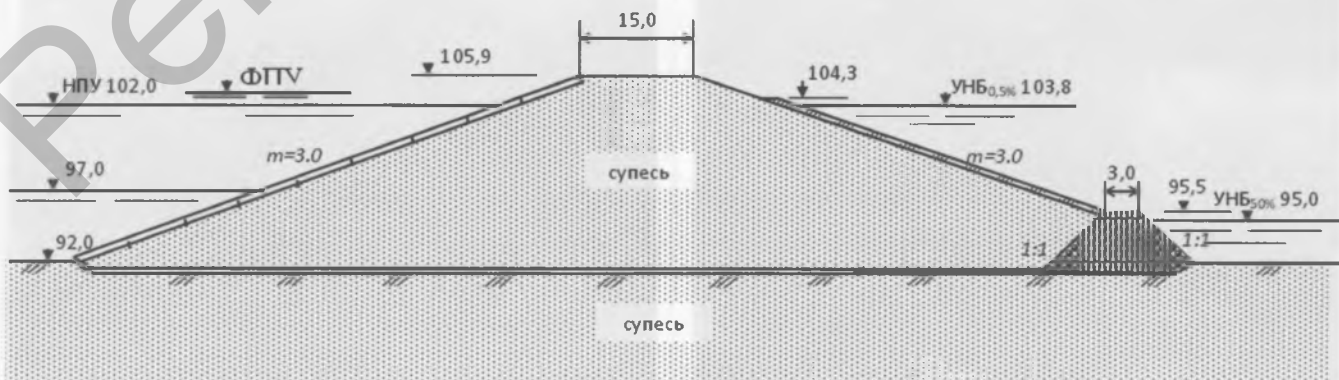


Рис. 4. Поперечное сечение земляной плотины Гродненской ГЭС

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

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 Мидлебуком (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_T . Виртуальная толщина экрана ($\delta_{3,в}$) определяется из условия равенства потерь напора фильтрационного потока в реальном экране (δ_3) и виртуальном по зависимости:

$$\delta_{3,в} = \delta_3 \frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y}. \quad (1)$$

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:

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

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

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

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

$$h_c = \sqrt{H_1^2 - 2 \frac{q}{K_T} (L + \Delta L_n + L_3)}; \quad (4)$$

H_1 и H_2 — глубина воды в верхнем и нижнем бьефах соответственно;
 L_p — расчетная длина, вычисляемая как:

$$L_p = L + \Delta L_n + \Delta L_b + \Delta L_3; \quad (5)$$

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

$$\Delta L_n = \frac{m}{3} H_2; \quad (6)$$

m — заложение верхового откоса дренажной призмы;

$$\Delta L_b = \frac{m_b}{2m_b + 1} H_1. \quad (7)$$

Во всей технической литературе (9–13) длина виртуального экрана ΔL_3 определяется как проекция виртуальной толщины экрана $\delta_{3,в}$ на горизонтальную ось, то есть:

$$L_3 = \delta_3 \frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y} \sin \alpha. \quad (8)$$

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:

$$L_3 = \delta_3 \frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y} \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (9)$$

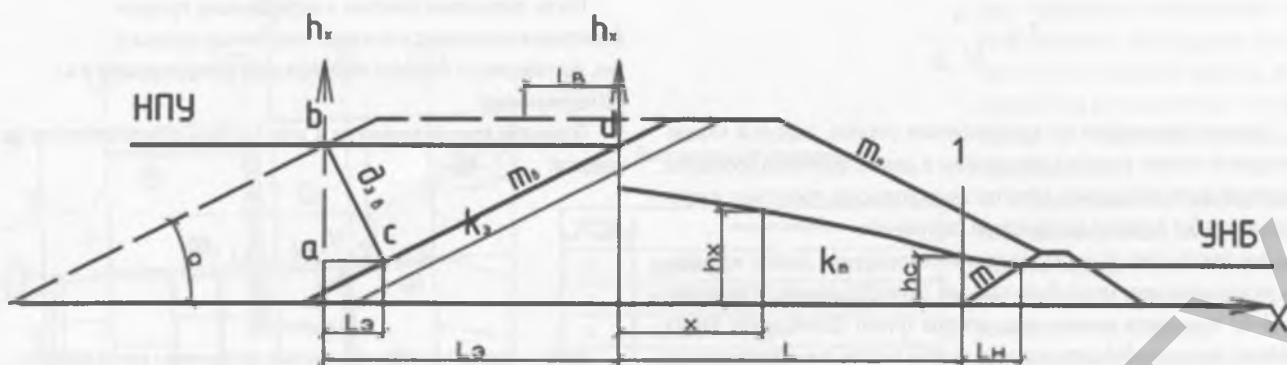


Рис. 5. Схема к фильтрационному расчету плотины с экраном

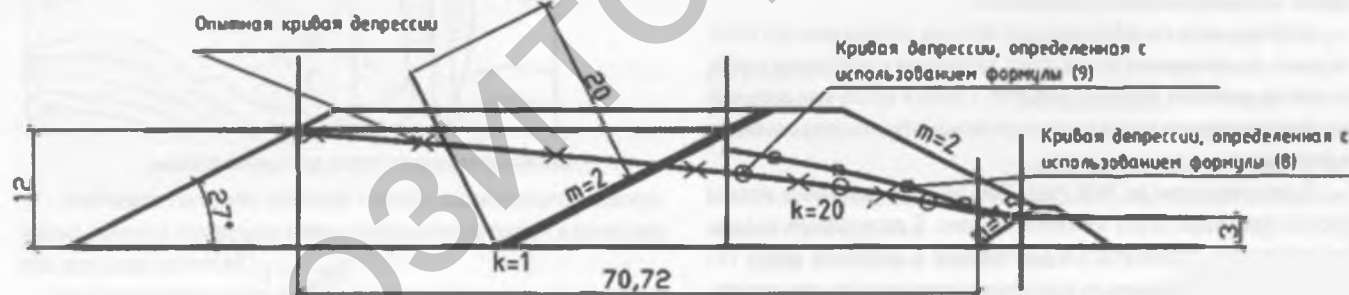
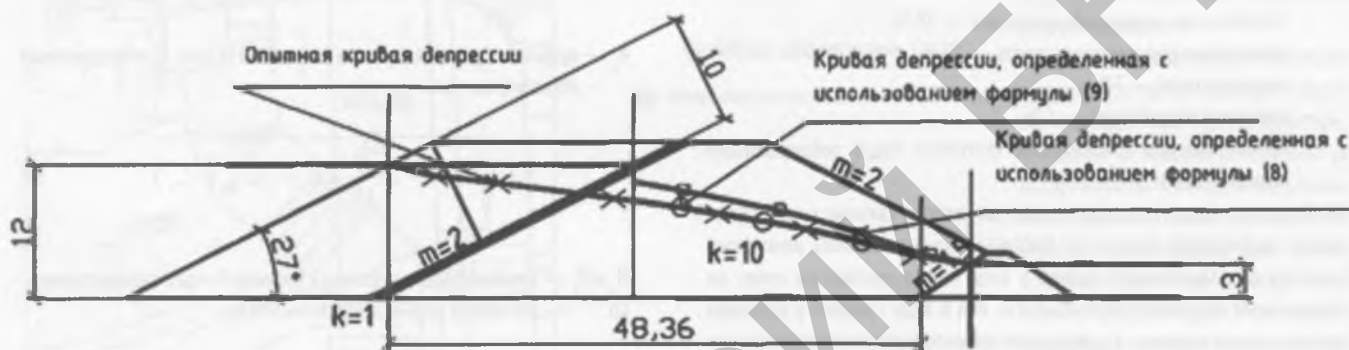


Рис. 6. Схемы к фильтрационным расчетам плотин: а — для соотношения $\frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y} = 10$; б — для соотношения $\frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y} = 20$

Проверить, какая из зависимости (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_s .

Результаты таких расчетов для случаев соотношения коэффициентов

фильтрации $\frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y} = 10$ и $\frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y} = 20$ 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 $\frac{\hat{E}_T}{\hat{E}_y} = 50, 100,$

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.

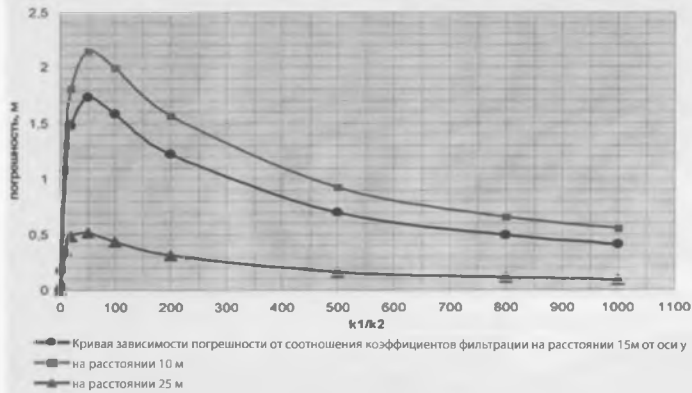


Рис. 7. График погрешности при вычислениях ординат в зависимости от соотношения коэффициентов фильтрации

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 $\frac{\hat{E}_x}{\hat{E}_y} \geq 50$ 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. Голинкевич 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 натуральных 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-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.