
ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ВОДОПРОНИЦАЕМОГО СЛОЯ ОСНОВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ ПРИБЛИЗИТЕЛЬНОМ РАВЕНСТВЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕЛА ПЛОТИНЫ И ЕГО ОСНОВАНИЯ

В.И. Елфимов, Д.Е. Кумеров

Кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Используется гидравлическая (приближенная) методика расчета параметров фильтрационного потока земляных плотин на водопроницаемом основании при приблизительном равенстве коэффициентов фильтрации тела плотины и основания различной мощности. В результате сравнительного анализа влияния толщины водопроницаемого слоя на параметры фильтрационного потока была установлена необходимость уточнения этой величины.

Ключевые слова: фильтрационный расчет, земляные плотины, проницаемое основание.

Земляные плотины являются наиболее распространенными водоподпорными сооружениями, которые входят в состав многих гидроузлов различного назначения, особенно низконапорных. Такое широкое распространение они получили по следующим причинам: 1) возможность использования практически любых грунтов; 2) комплексная механизация всех работ; 3) проводимые работы не требуют рабочих высокой квалификации; 4) возможность строительства в любых климатических условиях; 5) простота конструкции и надежность работы в самых тяжелых инженерно-геологических условиях.

По данным Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ), к началу этого века в мире было построено около 46 тысяч плотин. Из этого количества плотин более 70% являются грунтовыми. В РФ эксплуатируется большое количество водохранилищ и несколько сотен накопителей стоков и промышленных отходов, образованных земляными плотинами или дамбами. В практике гидротехнического строительства известно немало случаев аварий и повреждений этих плотин, в том числе от фильтрационных деформаций. Подавляющее большинство таких аварий могут произойти при первичном заполнении водохранилища водой или в первые годы эксплуатации сооружений [6]. В то же время встречаются случаи серьезного повреждения плотин после многолетней эксплуатации. Так, плотины La Laguna (Мексика) и Emery (США) разрушились из-за возникновения сосредоточенных ходов фильтрации соответственно 57- и 116-летней эксплуатации [19].

Таким образом, приведенные здесь факты говорят о том, что правильной организации отвода грунтовых вод для недопущения фильтрационных деформаций в теле и основаниях земляных плотин, особенно сооружений на водопроницаемом

основании, необходимо уделять значительное внимание, а также совершенствовать методики их расчета.

В современной практике проектирования грунтовых плотин 1-го и 2-го класса для фильтрационных расчетов применяют численные методы (МКЭ) с использованием современных компьютерных программ (ModFlow, Plaxis, FlowVision и др.) или гидромеханические методы, позволяющие решать фильтрационные задачи путем численного решения уравнения Лапласа для заданных граничных условий. При использовании этих методов не всегда удается выдержать естественные граничные условия, что не позволяет получить общую картину фильтрации в теле плотины и ее основании.

Кроме численных методов для плотин 3-го и 4-го класса и на предварительных стадиях проектирования для плотин 1-го и 2-го класса продолжают применять гидравлические или экспериментальные методы решения весьма трудной задачи по фильтрации через однородные земляные плотины на водопроницаемом основании.

Из гидравлических методов очень часто используют метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) для исследований пространственной задачи протекания тела плотины к берегам или исследования в щелевых лотках для исследования задач плоской фильтрации. Основоположниками гидравлических методов являются Н.Н. Павловский и Е.А. Замарин, который углубил решение Павловского и предложил упрощенный способ расчета фильтрации. Согласно общим положениям метода фильтрационный поток в профиле однородной плотины на водонепроницаемом основании разбивают на три характерных участка: верховой клин I, средний клин II и низовой клин III; для каждого участка (рис. 1) составляют уравнение фильтрационного расхода. Уравнение расхода в верховом и низовом клиньях получают из уравнения Дарси с различными упрощениями на этих участках (например, траектории движения струек потока условно принимают прямолинейными горизонтальными или радиальными), а для среднего участка используют формулу Дюпюи, описывающую плоский, плавно изменяющийся фильтрационный поток для единого прямоугольного массива:

$$\frac{q}{k_{\phi}} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L}, \quad (1)$$

где q — удельный расход $\text{м}^3/\text{с}$; H_1 — глубина потока в начале и в конце рассматриваемого участка длиной L , м.

Для проведения фильтрационного расчета контур верхового откоса заменяют условной вертикальной плоскостью располагаемой на расстоянии $L_{\text{пр}}$ от точки пересечения уровня НПУ с верховым откосом и получают прямоугольник эквивалентный по фильтрационному расходу вместе с проницаемыми участками основания толщиной (T), последующему фильтрационному расчету отдельно для тела и основания плотины (метод разработан В.П. Недригой).

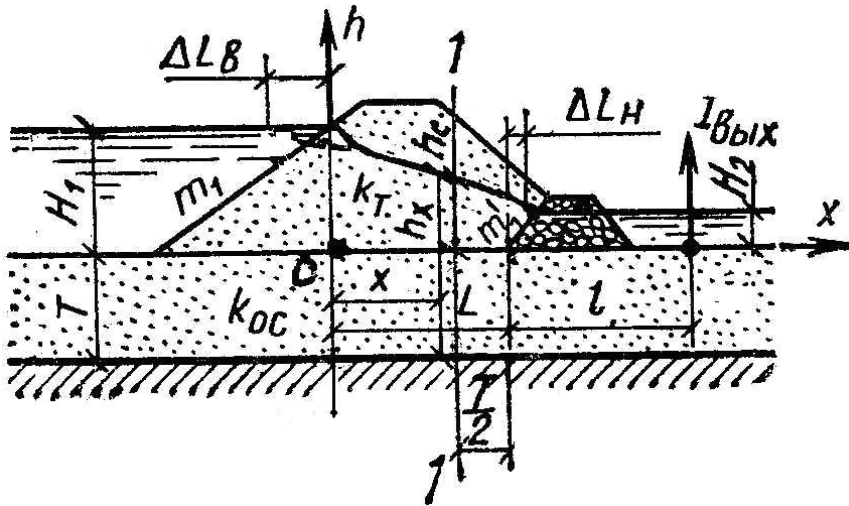


Рис. 1. Расчетная схема к расчету кривой депрессии

Указанные методы фильтрационного расчета земляных плотин разработаны для проницаемых оснований постоянной толщины (T), однако на основаниях большой мощности не даются рекомендации по определению фиктивной величины проницаемого слоя (T), хотя такой вид сопряжения грунтовой плотины с основанием одинакового коэффициента фильтрации встречается достаточно часто (плотина изготовлена из грунта основания).

По способу, разработанному под руководством В.П. Недриги, для расчета параметров фильтрационного потока предлагается использовать следующую методику:

1) относительный фильтрационный расход для земляных плотин на водопроницаемом основании с приблизительным равенством коэффициентов фильтрации тела и основания плотины (см. рис. 1) определяется:

$$\frac{q}{k} = \frac{H_1^2 - H_2^2}{2L_p + \Delta L_b} + \frac{(H_1 - H_2)T}{L_p + 0.44T}, \quad (2)$$

где k — коэффициент фильтрации тела плотины и $L_p = L + L_n$; $L_b = 0,4(H_1 + T)$;

$$L_n = \frac{m_d}{3} H_2.$$

В уравнении (2) относительный фильтрационный расход рассматривается отдельно для тела плотины (первое слагаемое уравнения) и основания (второе слагаемое уравнения);

2) ординаты кривой депрессии рассчитываются по следующему уравнению: между сечением 1-1 и дренажем:

$$h_x = \sqrt{h_c^2 - (h_c^2 - H_2^2) \left(\frac{x - L + T/2}{\frac{T}{2} + L_n} \right)}, \quad (3)$$

между сечением 1-1 и осью ординат:

$$h_x = \sqrt{2 \frac{q}{k} \left(L - \frac{T}{2} - x \right) + (T + h_c)^2} - T \quad (4)$$

в вышеперечисленных формулах h_c определяется по зависимости:

$$h_c = \sqrt{(H_1 + T)^2 - 2 \frac{q}{k} \left(L_p - \frac{T}{2} \right)} - T \quad (5)$$

$I_{\text{ВЫХ}}$ определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{T \sqrt{e^{\pi/T} - 1}} \frac{q_H}{k_{\text{ос}}}, \quad \text{где } \frac{q_H}{k_{\text{ос}}} = \frac{h_c - H_2}{\frac{m}{2} + 0,4m} \quad (6)$$

где $k_{\text{ос}}$ — коэффициент фильтрации основания плотины, h_c — ордината кривой депрессии в сечении 1-1, которое расположено на расстоянии $T/2$ от точки пересечения внутреннего откоса дренажной призмы с основанием плотины.

Проведя расчеты по всем приведенным формулам для основных параметров фильтрационного потока (q , $I_{\text{ВЫХ}}$, кривых депрессии) на различных по толщине основаниях большой мощности (T) были получены следующие результаты.

Для определения положения кривой депрессии (рис. 2) при различных толщинах водопроницаемого слоя были приняты следующие возможные толщины водопроницаемого слоя основания ($T = 15$ м; 30 м; 50 м и 100 м), так как по рекомендации некоторых исследователей можно принимать значение (T) равное половине ширины основания плотины ($S/2$) до половины длины проекции кривой депрессии ($L_p/2$). Принятые значения водопроницаемых слоев соответствуют этим рекомендациям:

а) с увеличением толщины (T) изменяется пологость кривых депрессии в меньшую сторону, т.е. градиент скорости в теле плотины должен уменьшаться с ростом толщины водопроницаемого слоя;

б) с ростом значений толщины водопроницаемого слоя ординаты положения кривых депрессий понижаются, особенно в начале (на 15—20)%, а в конце плотины, практически, в пределах влияния дренажа, все кривые сходятся в один жгут, т.е. влияние толщины (T) практически не сказывается (см. рис. 2).

Таким образом, исследуя кривые, построенные по рекомендованным формулам можно сделать вывод, что толщина водопроницаемого слоя (T) значительно влияет не только на положение кривых депрессий, но и на скоростные параметры потока, поэтому точность в определении (T) очень важна.

Так как относительный фильтрационный расход (q/k), рассчитанный по уравнению (2), можно выразить отдельно: для тела плотины (кривая 1) и для основания (кривая 2), был проведен данный расчет (рис. 3). Анализ полученных результатов показывает, что значения q/k через тело плотины незначительно уменьшается (кривая 1) с ростом толщины водопроницаемого (T), а все приращение q/k происходит за счет водопроницаемого основания (кривая 2). Суммарное значение расходов (кривая 3) также пропорционально значению (T) и в основном зависит от толщины водопроницаемого слоя, т.е. параметр (T) значительно влияет на фильтрационный расход и точность в его определении очень важна в расчетах.

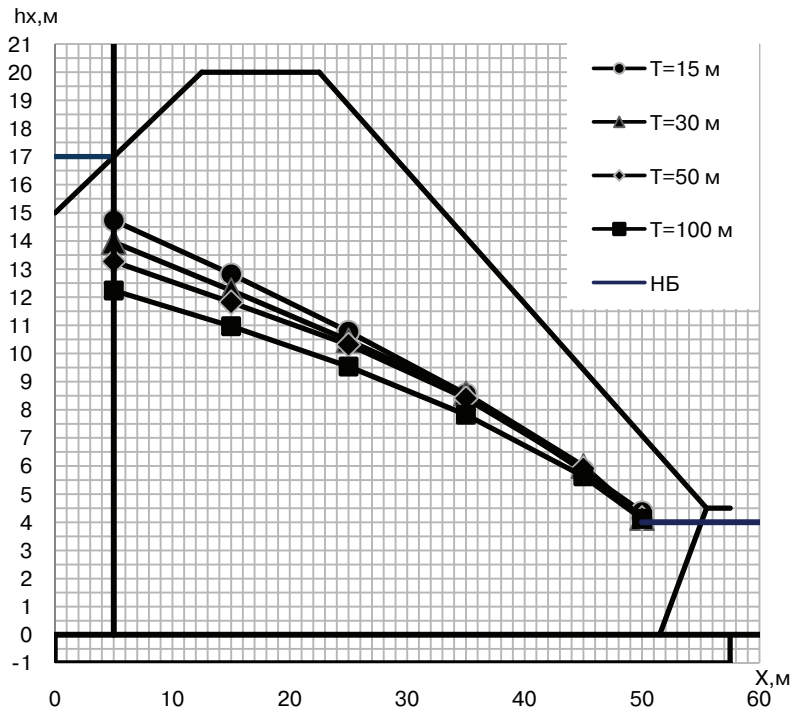


Рис. 2. Положение кривых депрессий при различных T

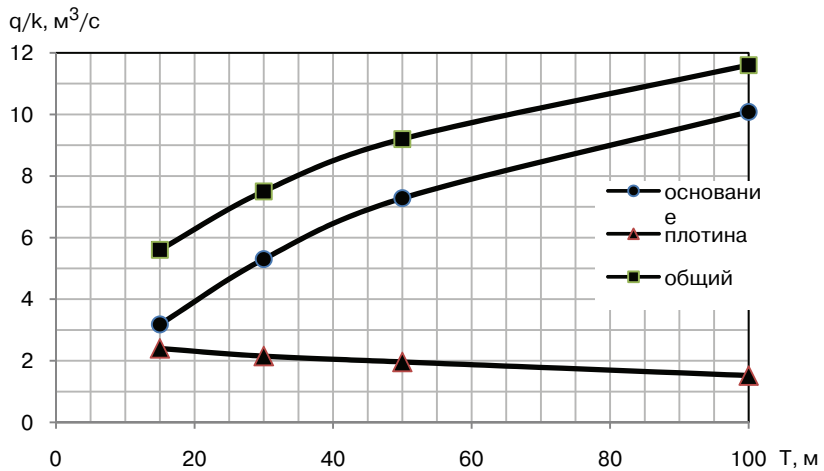


Рис. 3. Фильтрационные расходы при различных T

И последний очень важный параметр фильтрационного расхода — это выходной градиент ($I_{\text{вых}}$), который определяет фильтрационную прочность грунтов основания в Н/Б плотины. Были проведены расчеты градиента на выходе на расстоянии (l) 12, 15 и 20 м от точки пересечения верхового откоса дренажной призмы с основанием тела плотины. Данные расчета представлены в виде графика $I_{\text{вых}}$ на рис. 4 при различных значениях l.

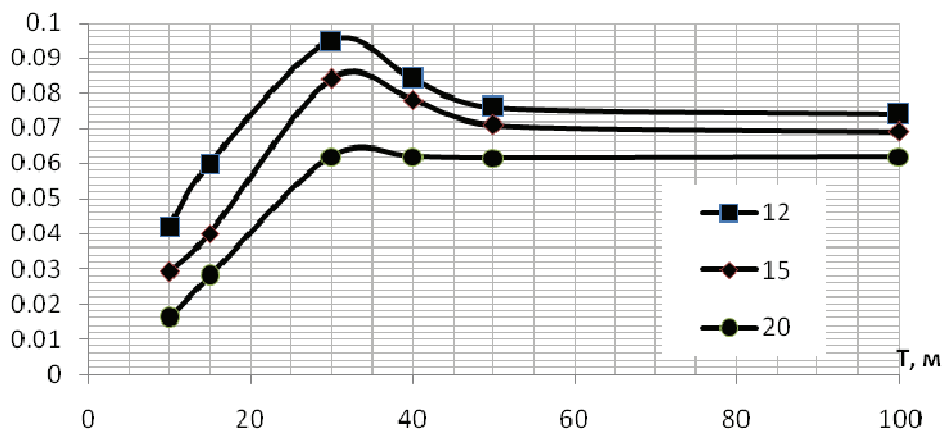


Рис. 4. Выходные градиенты фильтрационного потока

Из полученных графиков видно, что параметры фильтрационного потока в значительной степени зависят от толщины водопроницаемого слоя (Т).

Расчет положения кривых депрессии по рекомендованным методам (см. рис. 2) показывает, что положение кривой депрессии значительно зависит от глубины залегания водоупора (Т), причем эта зависимость увеличивается к началу координат, и относительная ошибка составляет 25% и уменьшается к дренажной призме и на расстоянии 0,35 Н от точки пересечения внутреннего откоса с основанием земляной плотины эта ошибка становится равна (1,5—2)%.

Так как в начале координат положение кривой депрессии значительно снижается по оси ординат при росте (Т), а ее задняя часть, находящаяся рядом с дренажем, остается практически на месте, пологость кривой депрессии увеличивается и градиент скорости фильтрационного потока уменьшается (от 0,24 до 0,14).

С увеличением толщины водопроницаемого слоя фильтрационный расход, проходящий через основание, увеличивается (см. рис. 3, кривая 2), а расход, проходящий через тело плотины (см. рис. 3, кривая 1) уменьшается, так как положение кривой депрессии уполаживается. Общий расход, проходящий через тело плотины и основание (см. рис. 3, кривая 3) увеличивается и стремится к бесконечности с ростом (Т).

Используя формулы для определения выходных градиентов, получили, что они также зависят от толщины водопроницаемого слоя и наибольший градиент получается при значениях (Т) равным 30 м для точек различной удаленности от конца плотины (рис. 4). При толщине водопроницаемого слоя более 50 м величина градиентов не зависит от (Т).

Для получения более точных характеристик фильтрационного потока (положения кривых депрессии, относительных фильтрационных расходов, выходных градиентов) необходимо при назначении толщины водопроницаемого слоя (Т) иметь более четкие рекомендации, зависящие не только от размера основания грунтовой плотины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Анахаев К.Н.* Расчет фильтрации через земляные плотины на непроницаемом основании разной мощности // Гидротехническое строительство. — 2011. — № 2.
- [2] *Анахаев К.Н.* Фильтрационный расчет земляных плотин. — Нальчик: КБГСХА, 1998.
- [3] Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов. — Л., 1976.
- [4] *Учингус А.А.* Расчет фильтрации через земляные плотины. — М.; Л., 1960.
- [5] Справочник проектировщика. Гидротехнические сооружения. — М.: Стройиздат, 1982.

EFFECT OF WATER-PERMEABLE FOUNDATION LAYER THICKNESS ON FILTRATION FLOW DATA WITH APPROXIMATE EQUALITY OF DAM BODY AND ITS FOUNDATION FILTRATION FACTORS

V.I. Elfimov, D.E. Kumerov

Department hydraulic and hydraulic engineering
People's Friendship University of Russia
Mikluho-Maklay str., 6, Moscow, Russia, 117198

Hydraulic (approximate) method is used to analyze filtration flow data of earth dams emplaced on water-permeable foundation of different thickness with approximate equality of dam body and its foundation filtration factors. Redetermination necessity of filtration flow data was discovered as a result of comparative analysis of water-permeable foundation layer thickness effect on filtration flow data.

Key words: filtering calculation, earth dams, permeable base.