

ПЛОТИНА ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

I. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

Ю.Я. Гольцов, М.Ю. Гольцова

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации
им. А.Н.Костякова, г. Москва, Россия*

Понимание фильтрационных процессов в насыщенно-ненасыщенных грунтах и определение их количественных характеристик является крайне необходимым для решения проблем, связанных с безопасностью гидротехнических сооружений, в частности плотин из грунтовых материалов. Однако для оценки риска их разрушения, с целью его предотвращения, важно провести моделирование движения воды через плотину с достаточной степенью достоверности. В современных условиях при наличии отлаженной математической модели, соответствующей вычислительной техники и качественной исходной информации проведение вычислительных экспериментов может оказаться одним из основных методов исследования и проектирования. Они, в какой-то мере, даже экономически несравнимы с любыми другими альтернативными методами исследований до компьютерной эпохи. Например, физическим моделированием или методом ЭГДА, которые, в то же время, не предоставляют достаточный спектр информации для анализа рассматриваемого процесса и для принятия соответствующего решения. Теоретической основой для описания процессов, связанных с движением воды в грунтах, характеризующихся различной степенью насыщения, служит уравнение предложенное Ричардсом [1]. Предлагаемый в данной статье метод фильтрационных расчетов плотин из грунтовых материалов позволяет по-новому взглянуть на существующую методику [2,3,4]. Для этого ограничимся рассмотрением плоскостной задачи 2D (профильной, двумерной в вертикальной плоскости).

1. При создании любой математической модели (далее по тексту модели), имитирующей различные природные процессы, стремятся к упрощению условий реальной действительности. Снижение сложности модели осуществляется за счет выделения и выбора основополагающих факторов рассматриваемого процесса и пренебрежение случайными деталями. Математическая модель, с одной стороны, должна оставаться достаточно простой для понимания и использования, с другой стороны, она должна быть достаточно сложной, чтобы адекватно отражать реальную действительность.

Рассмотрим плотину из грунтовых материалов и выделим основополагающие факторы, которым должна отвечать модель, предлагаемая для выполнения фильтрационных расчетов:

геометрия (поперечный внешний контур) плотины, элементы её составляющие, их водно-физические свойства;

высачивание (фильтрационных потоков вод) и граничные условия на откосах;

зона неполного насыщения;

дренажные мероприятия;

литологическое строение грунтов в основании плотины;

Следует заметить, что выделенные факторы, в какой-то степени, не являются окончательными и модель может быть уточнена. Например, учет консолидации грунтов или температурного режима [2], последний играет немалую роль в достоверности

фильтрационных расчетов плотин из грунтовых материалов, возводимых в северной строительной-климатической зоне.

2. Прежде всего, проведем схематизацию реальных гидрогеологических условий и проектируемых мероприятий в виде фильтрационной и расчетной схем. Как они будут представлены, и насколько возможно обойтись без упрощений? Расчетная схема составляется под рассматриваемую проблему, а затем уже выбирается математическая модель.

В первую очередь проанализируем профиль плотины, отмечая при этом, что её геометрия и геометрия элементов её составляющих сохраняются. Учитывая этот фактор, мы определяем реальную область фильтрационных потоков в зонах полного и неполного насыщения. Эта область составлена верховым и низовым откосами, с произвольным числом берм, и гребнем плотины. В соответствии с этим введем обозначения: G_1 – верховой откос, G_2 – гребень плотины, G_3 – низовой откос, что определяет поперечный внешний контур плотины (граница $G_1 + G_2 + G_3$, см. рисунок).

В теле плотины, при необходимости (для уменьшения её фильтрационной способности), проектируются ядро или экран (не только из грунтовых материалов), водопроницаемость которых, как правило, значительно меньше водопроницаемости грунтов основной части плотины. Они учитываются, как и дренажная призма, которая, наоборот, по своему функциональному назначению, обладает большей водопроницаемостью. Рассматривается кольматаж ложа водохранилища и верхового откоса плотины при его развитии во времени [2].

Отмечая высачивание фильтрационных потоков вод, как фактор, приводящий к нежелательным деформационным процессам на откосах плотины, необходимо, чтобы в результате расчетов по данной модели, была возможность определения участка высачивания, если таковой существует.

В предлагаемой модели учитывается взаимодействие между зонами полного и неполного насыщения в теле плотины, где действуют градиенты гравитационных и капиллярных сил, определяющих характер насыщения и водоотдачи. Неполное насыщение существенным образом проявляется в зоне откосов плотины над кривой депрессии, когда, в определенный период, накладываются фильтрационный (полное насыщение), грунтовый (инфильтрационный) и склоновый (поверхностный) сток, и где конструктивно проектируется дренажная призма. Фундаментальное значение при описании движения воды в ненасыщенных зонах плотины имеют функции водоудерживающей способности $W(\psi)$ и ненасыщенной гидравлической проводимости $K(W)$ грунта [5].

Дренаж, горизонтальный ленточный, который оказывается одним из самых эффективных мероприятий в вопросе понижения кривой депрессии в теле плотины, учитывается без введения «классических» дополнительных сопротивлений, часто используемых в практике расчетов. Отметим при этом, что самотечный горизонтальный дренаж может, в настоящее время, оказаться наиболее эффективным и экономически целесообразным.

Сохранение литологического строения грунтовой толщи, полученного в результате изысканий, при всей своей пестроте проявляющееся и в наличии линз (грунта), произвольных как по протяженности, так и по водопроницаемости, вовлекаемой в рассматриваемый фильтрационный процесс, является необходимым. Причем без проведения «классической» схематизации, которая, как правило, приводит к горизонтальной слоистости. В итоге не исключается, что нижняя граница (G_4) рассматриваемой области фильтрационных потоков (ниже которой лежит водоупор), будет криволинейной. Зуб, завеса или шпунт в грунтах основания плотины учитываются со своими характерными особенностями.

Слева и справа, на расстоянии определяемом реальными условиями, отмечаем вертикальные линии границ: Γ_5 – справа и Γ_6 – слева. Добавим еще часть поверхности ложа водохранилища Γ_7 и зону задания отметки уровня нижнего бьефа Γ_8 . В итоге границу (см. рис.) выделенной области рассматриваемых фильтрационных процессов в теле и основании плотины составляет $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 + \Gamma_5 + \Gamma_6 + \Gamma_7 + \Gamma_8$.

Особого внимания требуют граничные условия на откосах. Уровень воды в верхнем бьефе водохранилища носит неустановившейся характер и определяет напорное питание по смачиваемому периметру верхового откоса (граница Γ_1). Во всей оставшейся части внешнего контура плотины (часть Γ_1 и границы $\Gamma_2 + \Gamma_3$) предполагаются условия испарения или инфильтрационного питания, определяемые климатической зоной расположения плотины. Это могут быть районы, где интенсивность осадков не превышает инфильтрационную способность грунта на откосах. В районах с повышенной степенью интенсивности осадков, в виде дождя или снега (в период его таяния), на откосах необходимо привлечение модели, оперирующей процессами инфильтрации (подземного) и поверхностного (склонового) стока.

3. Необходимость учета выделенных факторов, как и неустановившегося режима фильтрационных процессов в теле и основании плотины и влагопереноса в зоне неполного насыщения плотины, из-за происходящего изменения уровня воды в верхнем бьефе возможно с помощью нелинейного дифференциального уравнения в частных производных [2] (профильная задача)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(W) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(W) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q(x, z, t), \quad (1)$$

где W – влажность почвы, дол.ед; $H = -\psi - z$ – гидравлический напор, м; $K(W)$ – коэффициент влагопроводности, м/сут; $Q(x,z,t)$ – функция источников-стоков, 1/сут; x, z – пространственные координаты, м; t – время, сут.

4. Зададим необходимые граничные условия, при которых рассматривается решение уравнения (1). По смачиваемой части верхового откоса (Γ_1)

$$H(x, z, t) / \Gamma_1 = H_0(t), \quad (2)$$

где $H_0(t)$ учитывает изменения уровня воды в водохранилище. В случае проведения фильтрационных расчетов $H_0(t) = \text{const}$, (НПУ). В остальной части профиля плотины: зона верхового откоса выше уровня воды, на гребне (Γ_2) и низовом откосе (Γ_3) принимается условие потока

$$\left[K(W) \frac{\partial H}{\partial n} \right]_{\Gamma_{1,2,3}} = E, \quad (3)$$

где n – определяет направление нормали к соответствующей граничной линии во внутрь области. При испарении $E = E_u$, где E_u – интенсивность физического испарения влаги. Величина E_u рассчитывается по следующей эмпирической формуле [6]

$$E_u = \begin{cases} E_0, & \text{если } W \geq W_{кр} \\ E_0 \frac{W - W_*}{W_{кр} - W_*}, & \text{если } W_* < W < W_{кр} \\ 0, & \text{если } W \leq W_{кр} \end{cases}, \quad (4)$$

где $W_{кр}$ – критическое значение влажности, определяющее начало процесса падения скорости испарения; W_* – равновесная влажность, при которой интенсивность испарения практически равна нулю; E_0 – испаряемость. В случае осадков в виде дождя $E = E_{ос}$, где

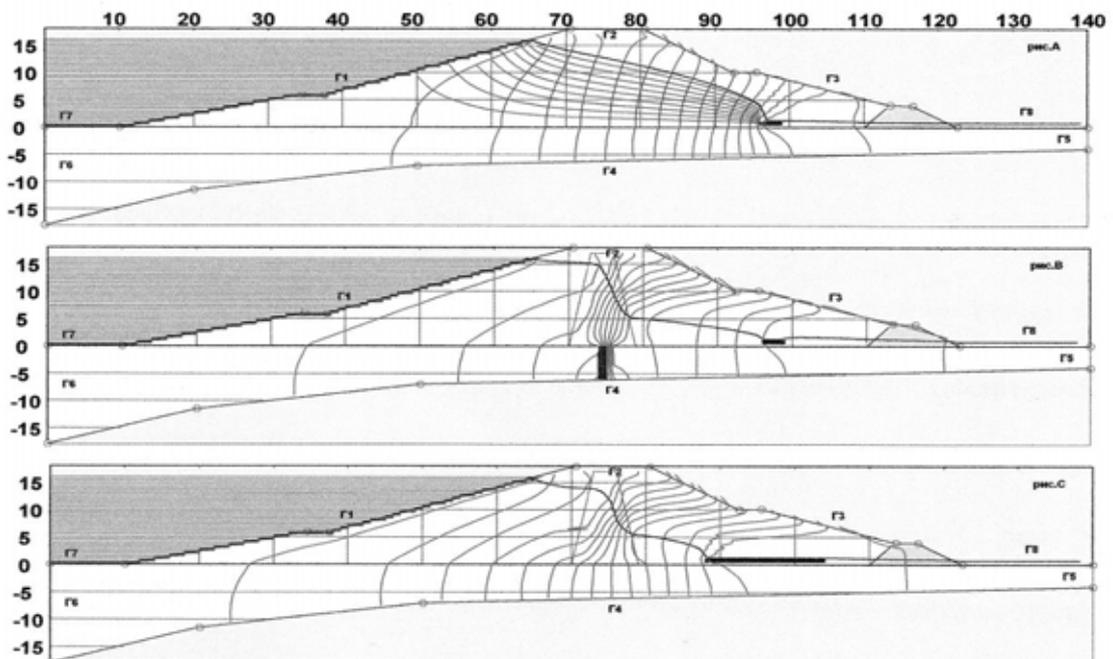
E_{oc} – интенсивность дождя. Будем считать, что интенсивность дождя не превышает впитывающую способность грунта по откосам и гребню плотины. Такое условие исключает из рассмотрения склоновый (поверхностный) сток по откосу. На вертикальных линиях границы (Γ_5, Γ_6) могут быть заданы условия напора или потока. По граничной линии (Γ_8) задаётся уровень воды нижнего бьефа. По нижней границе грунтов основания (Γ_4) задается условие водоупора, то есть поток отсутствует, что аналогично (3), где $E = 0$.

Начальное условие задается в виде

$$H(x, z, t) \Big|_{t=0} = H(x, z).$$

5. В силу своей нелинейности уравнение (1) при рассматриваемых выше краевых условиях не допускает получения аналитического решения. Кроме того, неоднородность по проводимости рассматриваемой области сложной геометрической формы может быть учтена только при численном методе решения указанного уравнения. В этом главное преимущество численных методов, когда с их помощью возможно решение многих вопросов, описываемых (в частности) дифференциальными уравнениями, и во многом позволительно исключить ряд упрощений рассматриваемого явления, вносимых при схематизации.

Для численного решения уравнения (1) используется метод суммарной аппроксимации, который позволяет формулировать краевые условия для схемы переменных направлений в случае ступенчатых областей [7]. Численное решение предполагает переход от непрерывной области фильтрации к дискретной. Покроем рассматриваемую область прямоугольной конечно-разностной сеткой, разбив ее, таким образом, на блоки, в центрах которых ищется решение уравнения. При этом рассматривается уже не функция $H(x, z)$, а блочная функция $H_{i,j}$ (в центрах блоков). Индексы i и j соответственно относятся к горизонтальной x и вертикальной z координатам. Граница расчетной области может не совпадать с центрами блоков, как и границы некоторых подобластей (откосы, ядро и т.п.), что требует для достижения требуемой точности решения задачи использования сетки (нерегулярная) с переменным шагом.



В рамках статьи можно показать результаты только некоторых вычислительных экспериментов (рисунок, размеры указаны в метрах), проведенных при установившемся режиме ($t \rightarrow \infty$), принятом в практике фильтрационных расчетов. Рассмотрен характерный профиль грунтовой плотины средней высоты. На рисунках (A, B, C) показаны положение кривой депрессии и распределение напора в теле и основании плотины при наличии противofильтрационных и дренажных устройств в зависимости от проводимости (коэффициентов фильтрации $K_{осн}$) грунтов, лежащих в основании. На рис. A показана гидродинамическая сетка, $K_{осн} = 0,005$ м/сут – практически водоупор. На рис. B при $K_{осн} = 3,5$ м/сут допустимое положение кривой депрессии обеспечивает ядро и завеса, а на рис. C показаны результаты расчета при тех же данных, но вместо завесы запроектирован ленточный дренаж (16 м.).

6. Предлагаемый метод отвечает современным требованиям [2], предъявляемым к фильтрационным расчетам гидротехнических сооружений из грунтовых материалов:

- нахождение кривой депрессии;
- определение напора и давления в различных точках тела плотины и ее основания;
- построение гидродинамической сетки (линии тока, линии равных напоров);
- фильтрационных потерь из верхнего бьефа плотины и частичных фильтрационных расходов;
- скоростей фильтрации в различных зонах тела плотины и ее основания.

Полученный спектр информации позволяет провести [2] определение фильтрационной прочности тела плотины и ее основания, расчет устойчивости откосов плотины, а также обоснование наиболее рациональных и экономических форм, размеров и конструкций плотины, ее противofильтрационных и дренажных устройств.

Библиографический список

1. Richards L.E. Capillary condition of liquids through porous medium.- Physics, 1931, v.1, N 5, 318-322.
2. СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов. <http://www.snip-info.ru> (Справочные ресурсы. СНиП и ГОСТ).
3. Железняков Г.В. и др. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. – М., Стройиздат, 1983. С. 543.
4. Аравин И.В., Нумеров С.Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Л.- М.: Стройиздат, 1955, С. 292.
5. Голованов А.И., Кожанов Е.С., Сухарев Ю.И. Ландшафтоведение. –М.: Колос, 2005. С. 216.
6. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. – М.: Гос. издат технико-теоретической литературы, 1954. С. 296.
7. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М., 1971. С. 552.