

О. В. Малов

РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЕ С УЧЕТОМ СЛОИСТОСТИ ГРУНТА

При строительстве современных высоких каменно-земляных плотин в тело плотины требуется уложить большое количество грунта. При этом приходится использовать грунты различных месторождений, отличающихся друг от друга по проницаемости. Поэтому тело плотины может состоять из нескольких слоев с различными коэффициентами фильтрации, а также с различными законами течения в них.

Одним из самых распространенных типов земляных плотин являются плотины, состоящие из противофильтрационного элемента и прилегающих к нему с двух сторон переходных зон, выполненных из более проницаемого грунта, чем материал противофильтрационного элемента. Кроме того, фильтрация может подчиняться нелинейным законам в центральном ядре или переходных зонах.

В данной работе на основе числовых расчетов, проведенных с использованием численного метода, описанного в работе [1], проведено исследование фильтрационных характеристик для двух типов плотин, представленных выше.

1. Плотины с горизонтальными слоями. Рассмотрим фильтрацию в прямоугольной перемычке с двумя горизонтальными слоями, одинаковыми по толщине (рис. 1). Будем предполагать, что в верхнем слое фильтрация подчиняется закону Дарси, а нижний слой представляет из себя анизотропную среду с двумя

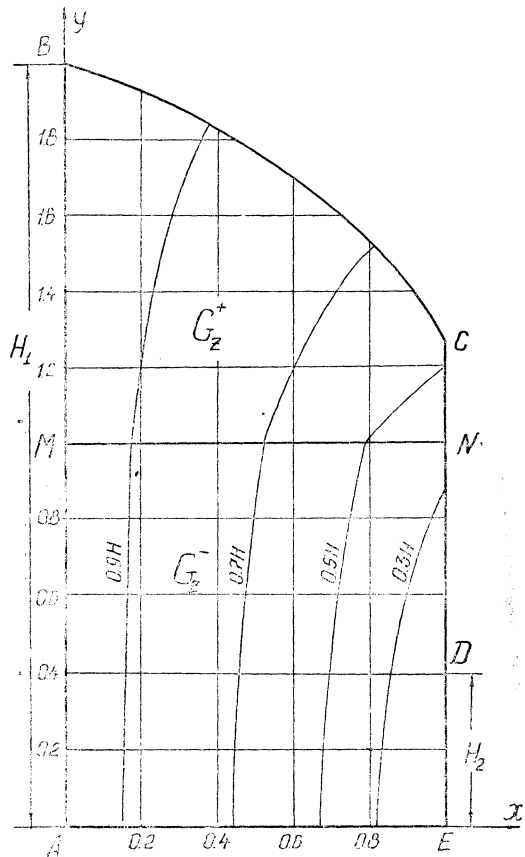


Рис. 1.

главными взаимно-перпендикулярными направлениями. Вдоль горизонтального направления фильтрация подчиняется квадратичному закону $|\nabla h| = f_1(v) = bv^2$, а по вертикальному направлению — закону Дарси $|\nabla h| = f_2(v) = av$, где h — напор, v — скорость фильтрации, a и b — постоянные.

Основные уравнения плоской установившейся фильтрации в анизотропной пористой среде запишем в форме С. Н. Нумерова [2]

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{f_1(v)}{v} v_x, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{f_2(v)}{v} v_y, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где v_x, v_y — составляющие вектора скорости.

Для верхнего слоя, грунт в котором изотропен, $f_1(v) = f_2(v) = v$. Исключая v_x и v_y из системы (1) и (2), получим для функции $\varphi(x, y) = H_2 - h$ дифференциальное уравнение в частных производных

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0, \quad (3)$$

где $K_1 = K_2 = 1$ для верхнего слоя и $K_1 = 1/(bv)$, $K_2 = 1/a$ для нижнего слоя.

На границе области фильтрации $G_z = G_z^+ \cup G_z^-$ (G_z^+ — верхний слой, G_z^- — нижний слой) функция φ должна удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} \varphi &= -(H_1 - H_2) = -H \text{ на } AB; \quad \varphi = 0 \text{ на } DE; \\ \varphi &= -y, \quad \partial\varphi/\partial n = 0 \text{ на } BC; \quad \varphi = -y \text{ на } CD; \\ &\partial\varphi/\partial y = 0 \text{ на } AE. \end{aligned} \quad (4)$$

На линии раздела грунтов MN должно выполняться условие сопряжения $\varphi^+ = \varphi^-$.

Решение уравнения (3) по условиям (4) проводилось численным методом при следующих данных: $H_1 = 2$ (все параметры здесь и в дальнейшем приводятся в безразмерных величинах); $H_2 = 0,4$; $AE = 1$; $AM = MB = 1$; $a = 1$; $b = 5$. При замене области непрерывного изменения аргументов дискретной областью линия раздела грунтов должна совпадать с линией сетки.

По результатам числовых расчетов на рис. 1 построены кривая депрессии и линии равных напоров. Из рисунка видно, что линии равных напоров претерпевают излом на линии раздела грунтов. Фильтрационный расход через перемычку равен 1,02. В случае, если фильтрация во всей перемычке подчиняется закону Дарси, то при тех же размерах плотины фильтрационный расход равен 1,92. Если же фильтрация во всей перемычке бу-

дет подчиняться тем же законам, что и в нижнем слое, то расход будет равным 0,73. Таким образом, можно считать, что грунт нижнего слоя является менее проницаемым, чем грунт верхнего слоя.

Если поменять слои местами, то расход получается равным 1,62, т. е. больше, чем в первом случае. Но одним из важнейших требований, предъявляемых к плотинам, является уменьшение фильтрационных расходов. Поэтому второй случай для практики неприемлем.

Следует отметить, что численный метод расчета фильтрации можно применять для перемычек с большим числом слоев и различными законами фильтрации.

2. Плотины с переходными зонами. Рассмотрим фильтрацию в прямоугольной перемычке с переходными зонами, одинаковыми по толщине (рис. 2.). Пусть в переходных зонах фильтрация подчиняется закону Дарси, а в центральном ядре — закону $|\nabla h| = f_1(v) = bv^2$ по горизонтальному направлению и закону Дарси $|\nabla h| = f_2(v) = av$ по вертикальному направлению.

На границе области фильтрации $G_z = G_z^1 \cup G_z^2 \cup G_z^3$ (G_z^1 — верхняя переходная зона, G_z^2 — центральное ядро, G_z^3 — нижняя переходная зона) функция φ также удовлетворяет условиям (4). На линиях раздела грунтов должны выполняться условия сопряжения: на $A'B'$ $\varphi^1 = \varphi^2$, на $G'E'$ $\varphi^2 = \varphi^3$.

При проведении числовых расчетов размеры перемычки выбирались те же, что и в задаче пункта 1. При этом ширина переходных зон выбиралась равной 0,2. На основании числовых расчетов на рис. 2 построены кривая депрессии и линии равных напоров (сплошной линией). Кривая депрессии и линии

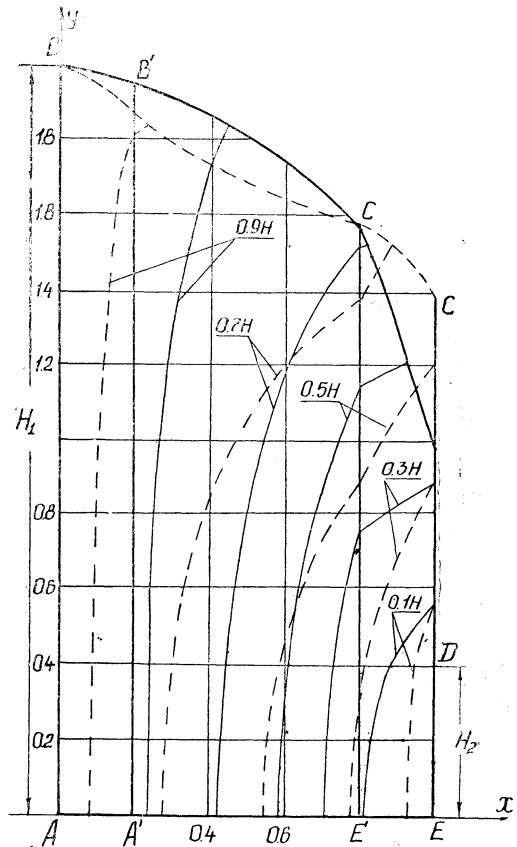


Рис. 2.

равных напоров претерпевают излом на линиях раздела грунтов. Фильтрационный расход равен 0,89. В рассмотренном случае грунт центрального ядра является менее проницаемым, чем в переходных зонах.

Интересный эффект наблюдается, если грунт в центральном ядре будет более проницаемым, чем в обеих переходных зонах. В этом случае кривая депрессии становится гогнутой, а линии равных напоров претерпевают излом в другую сторону (на рис. 2 изображены пунктирной линией). Однако, для практики такой случай не представляет интереса.

При строительстве каменно-земляных плотин переходные зоны обычно выполняются в виде трапеций. Для расчета таких плотин можно применить тот же самый численный метод. Для этого необходимо построить согласованную сетку при переходе от области непрерывного изменения аргументов к дискретной области (см. [1]), т. е. линии сетки должны пересекаться на границе области. При этом шаг сетки по x и по y оказываются неравномерными и на каждом шаге внешнего итерационного процесса будут переопределяться, так как будет изменяться положение кривой депрессии.

Для расчета трапециoidalной плотины требуется машинного времени в 3—4 раза больше, чем для прямоугольной плотины. Это зависит от нескольких причин. Во-первых, увеличивается число узлов сетки. Во-вторых, увеличивается число арифметических операций на каждом шаге внешнего итерационного процесса ввиду того, что приходится переопределять шаг сетки по x и по y . В третьих, вследствие измельчения шагов сетки с изменением положения кривой депрессии уменьшается скорость сходимости итерационного процесса. Поэтому плотину с крутыми откосами нужно привести к прямоугольному профилю [3] и считать по программе, созданной для прямоугольной перемычки. Таким образом, из приведенных числовых расчетов видно существенное влияние слоистости грунта и переходных зон на фильтрационные характеристики грунтовой плотины.

В заключение выражаю благодарность Е. Г. Шешукову за внимание к работе и полезные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малов О. В., Шешуков Е. Г. Численный метод расчета нелинейной анизотропной фильтрации в прямоугольном ядре грунтовой плотины.— Труды семинара по крайевым задачам.— Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1983, вып. 19, с. 107—114.
2. Numerov S. N. Nonlinear seepage in anisotropic media.— 15 th. Congr. Int. Assoc. Hydraul. Res., Istanbul, 1973, 3, p. 39—46.
3. Михайлов Г. К. О фильтрации в трапециoidalных плотинах на горизонтальном водоупоре.— Гидротехника и мелiorация, 1952, № 1.

Доложено на семинаре 26 января 1984 года.