

П. ФИЛЬЧАКОВ

ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ В РАЗНОРОДНОМ ГРУНТЕ

(Представлено академиком М. А. Лаврентьевым 1 IV 1949)

Задачи движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями являются задачами большой практической важности. В настоящей заметке излагается метод электро моделирования плоских задач фильтрации в разнородных грунтах при произвольном очертании гидротехнических сооружений — напорных и безнапорных (со свободной поверхностью), т. е. тех случаев, которые еще не имеют эффективного теоретического решения.

Для однородного грунта Н. Н. Павловским ⁽¹⁾ был предложен простой и эффективный метод электро-гидродинамических аналогий (ЭГДА), основанный на том факте, что уравнения движения грунтовых вод тождественны уравнениям движения электричества в проводящей среде.

Однако при моделировании разнородных грунтов возникали трудности технического порядка, и метод должного развития не получил.

Практический интерес представляет случай грунта, состоящего из отдельных зон с постоянным коэффициентом фильтрации k (аналогом которого в методе ЭГДА является коэффициент электропроводности). При этом условные значения k могут изменяться от величин порядка единиц до величин порядка сотен, и для моделирования необходима среда, удовлетворяющая следующим требованиям:

- 1) электропроводность среды должна быть стабильна во времени;
- 2) коэффициент электропроводности должен быть легко регулируемым в широких пределах с достаточной для практики точностью;
- 3) среда должна допускать установку надежного стабильного контакта между отдельными зонами;
- 4) механическая обработка должна быть легкой.

В качестве такой среды мы применили однородный картон, пропитываемый электролитами различной концентрации, но приготовленными из одних и тех же веществ (для уменьшения диффузии). Для устранения испарения электролиты готовятся на водно-глицериновых растворах из гигроскопических солей, чем и обеспечивается стабильность.

Хорошие результаты дал следующий электролит: глицерина 60—95%, насыщенного раствора поваренной соли 5—40%, соляной кислоты 0—2%.

Изменяя состав данного электролита, можно его электропроводность менять в пределах от 1 до 500 условных единиц. Соляная кислота вводится только в том случае, если надо создать большую разность в электропроводности различных зон.

Картон, пропитанный этим электролитом, в течение 72 час. изменял электропроводность на 10% и после 15 мес. хранения еще имел некоторую проводимость.

При моделировании разнородных грунтов, для уменьшения диффузии электролитов различной концентрации пластины соединяются в накладку при помощи вязкого клея, приготовленного из того же электролита с добавкой желатины. При наличии картона хорошего качества достижима точность $\pm 5\%$. Для более высокой точности необходима и среда повышенного качества. Таковой может являться картон с графитным наполнением, который вообще обладает рядом преимуществ по сравнению с мокрыми картонами. Но его изготовление требует специального оборудования.

Питающий ток при работе с электролитами должен быть переменным. Для уменьшения влияния контактного потенциала вольтаж следует брать по возможности более высоким. Наилучший результат дает ток звуковой частоты (50—100 в). При питании установки от сети переменного тока (50 периодов) следует брать вольтаж порядка 20—50 в.

Измерительное устройство — типа измерительного устройства сеточного электроинтегратора, описанного в книге Л. И. Гутенмахера ⁽⁴⁾.

Приведем некоторые результаты, полученные моделированием на электропроводном картоне.

Задача 1. Фильтрация через однородную перемычку прямоугольного сечения. Задача эта имеет теоретическое решение и заимствована нами из статьи С. М. Проскурникова * ⁽²⁾. Для нас она явилась контрольной задачей.

Размеры контура $H_1 = 174,8$; $H_2 = 32,4$; $l = 127,2$.

Основная трудность в этой задаче — отыскание свободной поверхности грунтового потока (линии депрессии), которая определяется следующими условиями: а) линия депрессии есть линия тока, т. е. вдоль нее $dh/dn = 0$, где $h = y + p/\rho g$ — пьезометрический напор; б) на линии депрессии $p = \text{const}$ и может быть принято $p = 0$, т. е. напор падает на ней по линейному закону $h = y$.

Взяв в качестве линии депрессии некоторую кривую и обрезав картон по этой линии, мы тем самым при электромоделировании удовлетворим условию а). Построив затем линии равного напора (эквипотенциали), контролируем, насколько хорошо выполняется второе условие, а также получаем указание, как провести второе приближение линии депрессии. После 3, 4 шагов удается удовлетворить и условию б). Как только кривая депрессии найдена, задача обращается в обыкновенную краевую задачу со смешанными граничными условиями. Весь процесс решения длится 1—2 часа вместе с подготовительными работами.

Кривая депрессии выходит обыкновенно на откос нижнего бьефа выше уровня вод, образуя так называемую ступеньку высотой H_c . Вдоль этой ступеньки должно быть выполнено только условие $h = y$, что моделируется установкой особой „линейной шины“.

Линейную шину изготавливаем, намотав манганиновую проволоку (ПШО или ПШД, $d \approx 0,5$) на гибкую изолированную пластинку и сняв после пропитки лаком намотки изоляцию на нижнем ребре. Задав на концы этой шины требуемые потенциалы, получаем вдоль ее ребра линейное распределение потенциала.

Результаты решения задачи 1 приведены на рис. 1, где для проверки выполнения условия б) действующий напор $H_1 - H_2$ разбит пунктирными линиями на 10 равных частей. Каждая линия равного

* С. М. Проскурников в своей статье ⁽⁵⁾ указывает, что методика электромоделирования, опубликованная в работе Девисона, принадлежит ему, а не Девисону.

напора должна оканчиваться на линии депрессии и на строго определенной для нее высоте $y = h$. Кривками изображены результаты, полученные теоретическим путем; при этом точность вычислений в некоторых случаях падала до 7%, т. е. была не лучше точности метода ЭГДА.

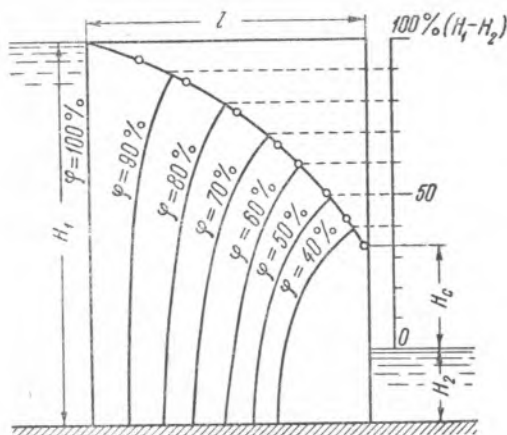


Рис. 1

Задача 2. Фильтрация через двойной слой. Задача поставлена исключительно для проверки качества контакта между двумя пластинами различной проводимости. Результаты даны на рис. 2.

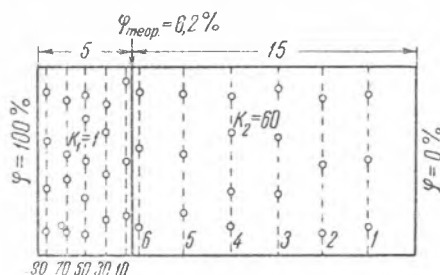


Рис. 2

Пунктиром нанесены теоретические эквипотенциали, а значения, обозначенные кружками, получены из эксперимента.

Задача 3. Фильтрация через земляную перемычку с глиняным экраном. Геометрические размеры те же, что и в задаче 1, причем $l_1 = 0,1 l$, $l_2 = 0,9 l$. Коэффициент фильтрации экрана k_1 принят условно равным 1, а для основного тела перемычки $k_2 = 100$. Результаты представлены на рис. 3.

Для контроля воспользуемся остроумной идеей „виртуальных длин“ Н. Н. Павловского (3). Для того чтобы учесть потерю напора в экране (но не сам вид кривой депрессии в экране), заменим экран фиктивным слоем с коэффициентом фильтрации k_2 виртуальной длины $l_v = l_1 (k_2 / k_1)$. Этим самым сведем задачу к однородной. Решив последнюю, найдем участок кривой депрессии в основном теле перемычки. На рис. 3 кривая депрессии, полученная методом виртуальных длин, изображена прерывистой кривой.

Как видим, совпадение в пределах точности эксперимента. Найдя участок кривой депрессии в основном теле перемычки, задачу фильтрации через экран решаем как самостоятельную, считая высоту воды

в нижнем бьефе равной H_2 . Оба участка кривой депрессии соединены между собой достаточно тонким потоком грунтовых вод, стекающим по вертикальной линии раздела. Питается этот поток водами, профиль-

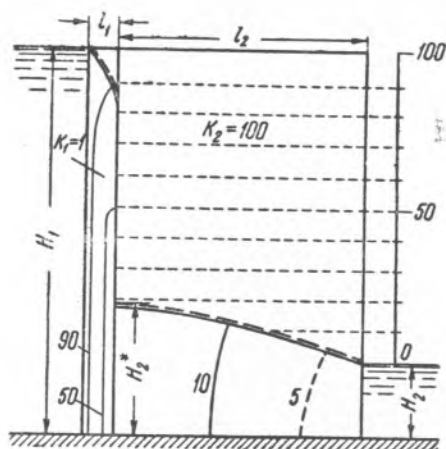


Рис. 3

трававшимися через экран. Таким образом, кривая депрессии является непрерывной линией, вопреки мнению некоторых исследователей, считающих, что при наличии экрана имеет место разрыв сплошности движения.

Институт математики
Академии наук УССР

Поступило
15 X 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. Н. Павловский, Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями, 1922. ² С. М. Проскурников, Решение гидромеханических задач по методу ЭГДА в книге "Некоторые новые вопросы механики сплошной среды", изд. АН СССР, 1938. ³ Н. Н. Павловский, Фильтрация через земляные плотины, 1931. ⁴ Л. И. Гутенмахер, Электроинтегратор, 1943. ⁵ С. Н. Проскурников, Тр. Гос. гидролог. ин-та, в. 8, 188 (1948).