

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА
ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СКОРОСТИ ОСАДКИ
НАСЫПИ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ**

*И.И. ЛЕОНОВИЧ, Т.К. БОГДАНОВИЧ
(Белорусский технологический институт
им. С.М. КИРОВА)*

Многие физические явления описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями. Это обстоятельство позволяет провести формальную математическую аналогию между различными физическими процессами.

Такая аналогия существует, например, между течением электрического тока в проводящей среде и фильтрацией жидкости в пористых средах и описывается уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Метод решения заданного уравнения путем экспериментального изучения какого-либо физического явления, описываемого этим уравнением, получил название метода аналогий [1].

При моделировании уравнения (1) наиболее удобным является экспериментальное изучение движения электрического тока в проводящей среде — метод электроаналогий.

Так как скорость уплотнения водонасыщенных грунтов обуславливается в основном скоростью выжимания воды из пор грунта, т.е. фильтрацией жидкости, то ме-

тод електроаналогій можна використовувати для визначення швидкості осади основи лабораторним шляхом на установці ЕГДА.

Перед тим моделювати швидкість осади насипу, треба знати картину розподілу напружень під насипом.

Якщо прикласти до краю напівплощини, обмеженої основою земляного полотна, вертикальну навантаження (вага насипу), розподілену за законом $f(x)$, то $\Sigma = \sigma'_x + \sigma'_z$ буде, як відомо [2], гармонічною функцією, т.е. буде задовольняти рівнянню Лапласа $\nabla^2 \Sigma = 0$.

Це положення дозволяє нам визначити функцію експериментально, методом ЕГДА.

Допустимо, що ґрунт під насипом однорідний. Зробити модель однорідної області можна з будь-якого електропровідного матеріалу. В нашому випадку це електропровідна папір.

Зовнішні межі моделі повинні бути геометрично подібні досліджуваній області природи.

Масштаб моделі визначають виходячи з технічних можливостей її виготовлення і зручності проведення експериментів. Рациональні розміри моделі вибираємо таким чином, щоб краї моделі були в достаточній мірі віддалені від шини, через яку передається "тиск". Модель звичайно приймається [3] в формі прямокутника з розмірами $H \approx 2,5 B$ і $L = 2H$, де B - ширина насипу у основі, H і L - висота і довжина прямокутника моделі (рис.1).

Граничні умови для тиску і для електричного потенціалу φ досліджуваній області природи і моделі повинні бути відповідно аналогічними. На поверхнях моделі, де тиск постійний, електричний потенціал повинен бути також постійним, відповідно, названі поверхні моделі повинні в усіх точках торкатися до шини, т.е. до провідників електричного струму. На ділянці моделі, де пе -

редается давление от насыпи на основание, приклады - ваем шину с максимальным значением приведенного потенциала, равным 1.

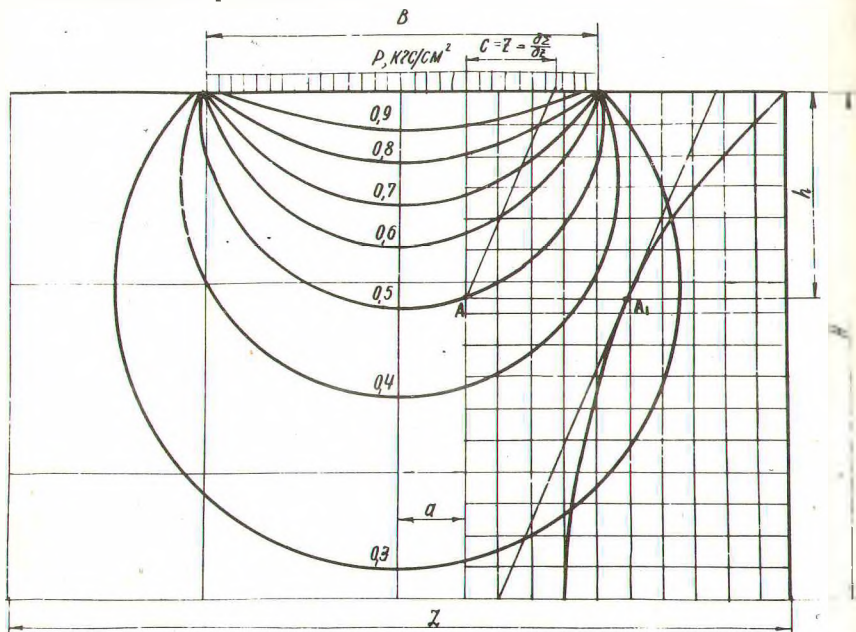


Рис.1. Распределение напряжений в основании земляного полотна

По сторонам насыпи, где нет давления, приклады - ваем на модель шину с нулевым значением приведен - ного потенциала ($\psi = 0$).

Для реализации граничных условий используются специальные шины-зажимы. С помощью коммутацион - ных шнуров шины подключают к гнездам 0% и 100% питающего устройства интегратора.

После реализации и проверки граничных условий на - ходим эквипотенциальные точки внутри поля моделиру - емой области. Соединив плавными кривыми точки с

одинаковыми потенциалами Ψ , получим линии равных потенциалов (см.рис.1).

Пользуясь формулой

$$\Sigma = \Sigma_{min} + (\Sigma_{max} - \Sigma_{min}) \Psi, \quad (2)$$

где Σ_{min} и Σ_{max} - минимальное и максимальное давления,

по заданным минимальному и максимальному значениям давлений и известному потенциалу находим интересующее нас значение суммы нормальных напряжений.

Затем по сумме нормальных напряжений путем графического построения и формул

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{2} \Sigma + \frac{1}{2} z \frac{\partial \Sigma}{\partial z} \\ \sigma_z &= \frac{1}{2} \Sigma - \frac{1}{2} z \frac{\partial \Sigma}{\partial z}; \\ \tau_{xz} &= -\frac{1}{2} z \frac{\partial \Sigma}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

определяем в любой точке основания составляющие сумму напряжений σ_x , σ_z и τ_{xz} .

Полученную картину распределения напряжений принимали за основу при изготовлении модели для изучения скорости осадки насыпи.

Схема модели для определения скорости осадки по методу ЭГДА сводится к воспроизведению движения воды в грунтовой массе в тех случаях, когда нагрузка от насыпи передается не только на скелет грунта, но частично или полностью и на воду, заключенную в его порах.

Цель проведенных исследований - определить скорость осадки основания на модели.

Через бумагу пропускали постоянный ток посредст -

вом особых проволочных шин, наклеенных на линии равных напряжений, с учетом глубины активного сжатия.

Теоретическое определение скорости осадки /4/ насыпи посредством гидроэлектрических аналогий распадается на две части:

- 1) определение общего расхода воды;
- 2) расчет по общему расходу воды скорости осадки насыпи.

Для удобства моделирования расход воды в случае плоской задачи определяли для модели, представляющей собой призму из грунта с таким коэффициентом фильтрации K и размерами, чтобы общий фильтрационный расход воды при заданном напоре на погонную единицу был одинаков как для этой призмы, так и для насыпи в натуре.

Эквивалентную призму моделировали наклейкой на модель двух параллельных шин призматического стандарта, которые также подключали к питающему устройству интегратора.

Формула для определения скорости осадки фундаментов посредством гидроэлектрических аналогий была выведена проф. Г. И. Покровским /4/:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{U_0 \rho K b_0}{U_1 \ell_1 i_0 m} \sum_1^n \frac{i_i}{b_i}, \quad (4)$$

- где U_0 - напряжение в шинах призматического стандарта;
- ρ - удельное давление;
- K - коэффициент фильтрации;
- b_0 - длина шин призматического стандарта;
- U_1 - напряжение в первой шине;
- ℓ_0 - расстояние между шинами призматического стандарта;
- i_0 - сила тока в шинах призматического стандарта;
- m - масштаб модели;

i_i - сила тока в криволинейных шинах;
 l_i - длина криволинейных шин.

Подав от источника тока на проволочные шины различные приведенные потенциалы, получаем движение электрического тока от шин с большим потенциалом к шинам с меньшим потенциалом по соответствующим силовым линиям. Они имеют то же направление, что и линии тока воды в основании под действием веса насыпи.

Измерив силу тока и напряжение в криволинейных шинах модели в призматическом стандарте, получим данные, позволяющие установить скорость осадки.

В табл.1 приведены результаты моделирования для четырех сечений опытного участка. Дорога на опытном участке проходит через болото. Насыпь возводили на водонасыщенном основании, объемный вес насыпи $\gamma = 1,75 \text{ г/см}^3$, коэффициент фильтрации $K = 3 \cdot 10^{-7} \text{ см/сек}$. Коэффициент фильтрации и величину стабилизированной осадки определяли путем компрессионных испытаний.

Подставляя величины, приведенные в табл.1, в формулу (4), получим скорость осадки, найденную моделированием (табл.2).

В отличие от общепринятых соотношений размерность коэффициента фильтрации в формуле (4) будет

$$[K] = \frac{\text{см}^4}{\text{сек.кг}}$$

Это не соответствует обычно применяемой размерности коэффициента фильтрации и является результатом применения электрогидродинамических аналогий.

Полученные результаты позволяют определить изменение величины осадки во времени:

$$s^t = s_{max} \left(1 - e^{-\frac{vt}{s_{max}}} \right), \quad (5)$$

Результаты моделирования

Номер шин	Длина шин, см	Удельное давление от насыпи, кгс/см ²							
		0,5		0,75		1,0		2,0	
		Сила тока, тА	Напряжение, в	Сила тока, тА	Напряжение, в	Сила тока, тА	Напряжение, в	Сила тока, тА	Напряжение, в
1	4,1	26,8	1,9	27,3	1,9	28,0	1,7	29,0	1,6
2	4,2	36,0	-	37,0	-	36,0	-	37,0	-
3	4,4	36,0	-	37,0	-	39,6	-	40,0	-
4	4,7	35,0	-	39,0	-	40,0	-	40,0	-
5	5,1	-	-	40,0	-	40,0	-	41,0	-
6	5,5	-	-	32,0	-	32,0	-	33,0	-
7	6,3	-	-	35,0	-	28,0	-	29,0	-
8	7,1	-	-	-	-	20,0	-	21,0	-
9	8,0	-	-	-	-	-	-	20,0	-
10	10,0	-	-	-	-	-	-	19,0	-
Призматический стандарт	12,0	2,5	7,0	2,6	10,0	4,1	10,0	4,0	10,0
Глубина активного сжатия, м		3,4		4,9		5,5		7,6	

- где S - осадка насыпи;
 $S_{та.э}$ стабилизированная осадка, найденная путем компрессионных испытаний;
 t - время, годы;
 e - основание натуральных логарифмов;
 v - скорость осадки, найденная моделированием на установке ЭГДА.

Таблица 2
Осадка во времени

Удельное давление насыпи, кгс/см ²	Скорость осадки, найденная моделированием, см/год	Величина стабилизированной осадки, см	Осадка насыпи во времени
0,5	3,2	7,1	$S = 7,1(t - e^{-0,451t})$
0,75	6,9	10,8	$S = 10,8(t - e^{-0,638t})$
1,0	10,9	13,2	$S = 13,2(t - e^{-0,826t})$
2,0	26,4	21,3	$S = 21,3(t - e^{-1,239t})$

Выражения осадки насыпи во времени, полученные для различных удельных давлений насыпи, приведены в табл. 2 и представлены графически на рис.2.

Таким образом, моделирование в сочетании с компрессионными испытаниями грунтов дает возможность определять скорость осадки основания, что имеет большое практическое значение при

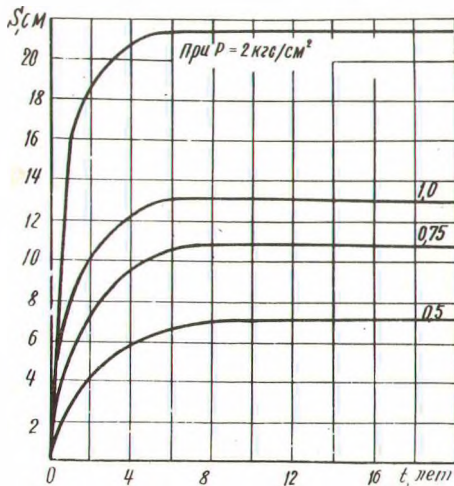


Рис.2. Кривые стабилизированной осадки насыпи опытного участка

возведении земляного полотна и строительстве дорожной одежды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фильчаков П.Ф., Панчишин В.И. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге, 1961.
2. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т.1.М., Госстройиздат, 1959.
3. Дружинин Н.И. Метод электрогидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации. М.-Л., Госэнергоиздат, 1956.
4. Покровский Г.И., Федоров И.В. Моделирование осадок оснований. М., Госстройиздат, 1939.