

И. И. Леонович, Т. К. Богданович
 (Белорусский технологический институт
 им. С. М. Кирова)

РАСЧЕТ ОСАДКИ НАСЫПИ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ

При воздействии насыпей автомобильных лесовозных дорог на слабом основании важным вопросом является определение осадки насыпей во времени. Деформация основания во времени под воздействием насыпи определяется [2]:

- свойствами данного грунта, в частности коэффициентом фильтрации K ;
- величиной уплотняющей нагрузки;
- мощностью уплотняемого слоя.

Нами рассматривается метод нахождения осадки насыпи с учетом перечисленных факторов на установке ЭГДА.

Для решения вопроса о ходе осадки во времени используются

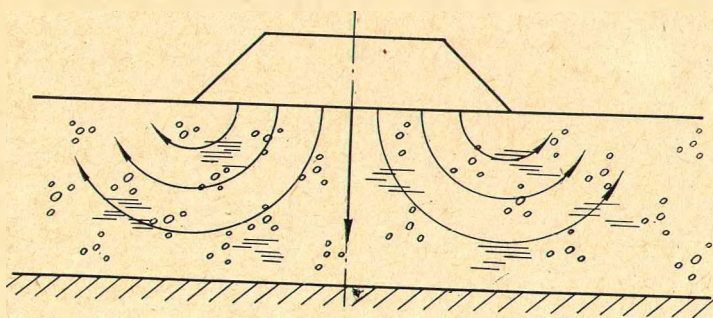


Рис. 1. Линии тока воды.

положения теории фильтрационной консолидации. Как известно, в начальный момент после приложения нагрузки к грунтовой массе избыточное давление полностью воспринимается водой, и в силу законов гидростатики она перемещается из зоны, где имеется повышенный гидростатический напор, в зону с пониженным давлением. Это перемещение воды происходит по соответствующим линиям токов (рис. 1).

Объем выжатой воды соответствует величине осадки насыпи по оси, зависящей от времени.

Таким образом, при экспериментальных исследованиях необходимо создать такие условия, при которых можно было бы воспроизвести движение воды в грунте под насыпью и измерить количество выжатой воды, а затем рассчитать величину и скорость осадки.

Наиболее просто можно определить искомые величины, проводя опыты не с грунтом, а с электропроводной бумагой. Через бумагу пропускают постоянный ток посредством особых шин, имеющих вид кривых равных напряжений, возникающих в основании под действием насыпи. Форма этих кривых меняется по мере удаления от места загрузки. Подавая от источника тока на эти шины различные потенциалы, мы получим движение электрического тока по соответствующим силовым линиям. Эти силовые линии имеют то же направление, что и линии тока при выжимании воды из грунтовой массы.

Изготовленная по описанному принципу [3] электрическая модель дает возможность определить все константы, необходимые для расчета осадки насыпи на водонасыщенном основании.

Чтобы получить для этой модели шины, имеющие форму изостатических кривых, по которым распределяются напряжения, надо изучить напряженное состояние основания насыпи. Искомую величину суммы напряжений можно определить опять-таки с помощью установки ЭГДА.

ЭГДА предназначена для решения задач, описываемых уравнением Лапласа. Из теории упругости известно, что сумма нормальных напряжений $\Sigma = \sigma_x + \sigma_z$ при загрузке края полуплоскости является гармонической функцией, т. е. удовлетворяет уравнению Лапласа $\nabla^2 \Sigma = 0$. Поэтому для определения напряжений в основании земляного полотна с успехом можно использовать метод ЭГДА.

Для нахождения кривых равных напряжений была изготовлена модель основания заданной насыпи из электропроводной бумаги.

Внешние границы модели должны быть геометрически подобны внешним границам изучаемой области [1].

В случае конечной глубины T водопроницаемого однородного слоя грунта длина L моделируемой части изучаемой области принимается:

$$L = B + (3 \div 4) T, \quad (1)$$

где B — ширина поперечного сечения насыпи.

На границах изучаемой области природы и ее модели давление P и электрический потенциал ϕ должны быть соответственно аналогичными. На поверхности изучаемой области, где давление постоянное, электрический потенциал на модели должен быть также постоянным. Следовательно, эти поверхности модели должны во всех точках прикасаться к шинам. На участке модели, где имеет место давление насыпи на основание, прикладываем шин с максимальным значением приведенного потенциала $\phi = 1$. По сторонам

насыпи, где нет нагрузки, прикладываем на модели шины с нулевым значением приведенного потенциала $\varphi=0$. Остальные стороны прямоугольника на модели оставляем свободными, так как при моделировании на электропроводной бумаге роль изолятора выполняет воздух. Готовая модель подключается к гнездам питающего устройства интегратора.

После реализации и проверки граничных условий находят эквивалентные потенциалы внутри поля моделируемой области. Имея точки равных потенциалов φ , вычислим сумму нормальных напряжений в этих же точках по следующей формуле:

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

где Σ_{\min} — минимальное значение суммы напряжений, соответствующее нулевому давлению;

Σ_{\max} — максимальное значение суммы напряжений, равное удельному давлению;

φ — электрический потенциал.

Изготовив модель с нанесенными на нее линиями равных сумм напряжений, рассчитаем скорость осадки основания под воздействием насыпи. Схема модели, с помощью которой определяется скорость осадки, приведена на рис. 2, где упомянутые криволинейные шины обозначены буквами A_1, A_2, A_3, A_4 .

Подавая на эти шины различные приведенные потенциалы, например 0,9; 0,8; 0,7; 0,6 и т. п. (закон изменения потенциалов связан с изменением напряжения по глубине основания), мы получим движение электрического тока от шин с большим потенциалом к шинам с меньшим потенциалом по соответствующим силовым линиям. Эти силовые линии имеют то же направление, что и линии тока при выжимании воды из грунтовой массы; они замыкаются на сборных шинах с отрицательным потенциалом (принятым эквивалентным нулевому напряжению), как указано на схеме, приведенной на рис. 2.

Теоретическое определение скорости осадки основания фундамента посредством гидроэлектрических аналогий было разработано Г. И. Покровским и И. В. Федоровым [3]. Воспользуемся конечной формулой их расчетов и применим ее для определения скорости осадки насыпи:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{v_0 P k b_0}{v_1 l_0 i_0' m} \sum_i^n \frac{i_i'}{b_i}, \quad (3)$$

где v_0 — напряжение в призматическом стандарте;

P — удельное давление от насыпи;

k — коэффициент фильтрации;

b_0 — длина шин стандарта;

v_1 — напряжение в 1-й шине;

- l_0 — расстояние между шинами призматического стандарта;
 m — масштаб модели;
 i_i' — сила тока в криволинейных шинах;
 b_i — длина криволинейных шин.

Для простоты расчета определение расхода воды в случае плоской задачи производится для модели, представляющей собой призму из грунта с таким коэффициентом фильтрации и размерами, чтобы общий фильтрационный расход воды при заданном напоре на погонную единицу был одинаков как для этой призмы, так и для сооружения в натуре. Этот момент отражен в формуле посредством призматического стандарта.

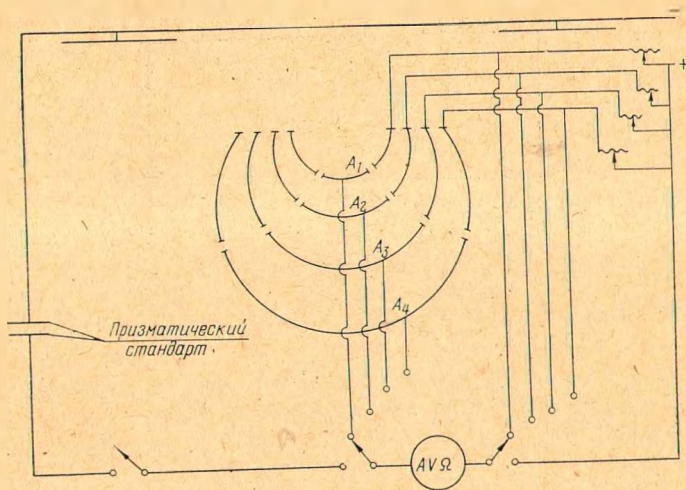


Рис. 2. Схема для определения скорости осадки методом ЭГДА.

В качестве материала шин был использован медный провод. Шины приклеивались по кривым, нанесенным на бумагу при определении суммы напряжений. Помимо криволинейных, к модели присоединяются две сборные шины с нулевым значением приведенного потенциала. Приклеенные криволинейные шины разрезаны по соответствующим линиям тока. Этим выделяется лишь та область электропроводящей среды, относительно которой ведется подсчет. На рис. 2 это сделано для расчета осадки по оси насыпи. Отрезки шин за пределами линий тока представляют собой экраны для направления силовых линий. Для измерения силы тока и напряжения в цепь включается авометр интегратора.

Для определения силы тока в призматическом стандарте его шины приклеивались на этот же лист, где находились и криволинейные шины.

Обработка результатов опыта сводилась к нахождению средней арифметической величины из трех показаний миллиамперметра и вольтметра. После этого данные вводятся для определения скорости осадки в формулу (3).

В отличие от общепринятых соотношений размерность коэффициента фильтрации в выражении (3) составляет $см^4/сек \cdot кг$. Это не соответствует обычно применяемой размерности коэффициента фильтрации и является результатом применения метода аналогий.

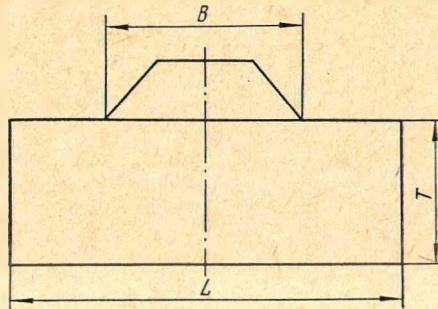


Рис. 3. Размеры модели.

В результате опытов, проведенных для модели насыпи на водонасыщенном торфяном основании при действии на него равномерной нагрузки, были получены данные, приведенные в табл. 1.

Подставляя величины, приведенные в табл. 1, в формулу (3) и предполагая, что напряжение под насыпью передается в первый момент осадки полностью на воду, получим скорость осадки для данных условий.

Рассмотрим пример со следующими исходными данными. Насыпь: высота $H=2$ м; ширина опорной площадки $B=8$ м; откосы с заложением 1 : 1,5; грунт песчаный; объемный вес материала насыпи $\gamma=1,71$ г/см³. Основанием является слой торфа мощностью $T=5$ м, ниже которого расположена плотная супесь, для торфа $K=10^{-4}$ см/сек.

Материал модели — электропроводная бумага. Материал криволинейных шин — медный провод $\varnothing 0,5$ мм, ГОСТ 2112—62. Материал шин призматического стандарта — медная фольга толщиной 0,08 мм. Удельное давление от веса насыпи на основание

$$p = \frac{\gamma H}{1000} = \frac{1,71 \cdot 200}{1000} = 0,34 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжение, соответствующее месту расположения первой шины, $p_1=0,9 \cdot 0,34=0,31$ кг/см². Размеры насыпи (рис. 3): $B=8$ м; $T=5$ м; $L=B+3T=23$ м. Размеры модели с учетом масштаба $m=50$; $B=16$ см; $L=46$ см; $T=10$ см.

Таблица 1

№ опыта	№ шин	Напряжение в шинах, в	Сила тока в шинах, т.А	Напряжение в шинах призматического стан-дарта, в	Сила тока в шинах призматического стан-дарта, т.А	Длина криволиней-ных шин	Длина призматиче-ского стан-дарта	Расстояние между шинами призматиче-ского стан-дарта	Скорость осадки насыпи, г.м/сут
1	1	9,0	18,0	2,0	6,0	6,0	16	2,5	47,2
	2	7,1	22,0		7,4	7,4			
	3	6,9	28,0		10,0	10,0			
	4	7,1	22,0		15,6	15,6			
2	1	9,0	18,0	5,0	18,0	6,0	16	2,5	40,6
	2	7,0	22,0		7,4	7,4			
	3	6,5	30,0		10,0	10,0			
	4	7,0	24,0		15,6	15,6			
3	1	9,0	18,0	7,0	28,0	6,0	16	2,5	37,1
	2	7,0	22,5		7,4	7,4			
	3	6,0	30,8		10,0	10,0			
	4	6,5	24,0		15,6	15,6			
4	1	8,5	18,5	9,8	40,0	6,0	16	2,5	40,0
	2	6,8	23,0		7,4	7,4			
	3	6,0	32,0		10,0	10,0			
	4	6,0	26,0		15,6	15,6			
5	1	8,0	19,0	12,0	52,0	6,0	16	2,5	39,7
	2	6,5	23,0		7,4	7,4			
	3	5,8	32,0		10,0	10,0			
	4	5,8	23,2		15,6	15,6			
6	1	8,0	19,0	14,5	64,0	6,0	16	2,5	40,4
	2	6,0	24,0		7,4	7,4			
	3	5,0	32,0		10,0	10,0			
	4	5,0	28,0		15,6	15,6			

Скорость осадки для первого опыта равна

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \frac{v_0 P_1 k b_0}{v_1 l_0 i_0 m} \sum_1^n \frac{i_i}{b_i} = \\ &= \frac{2 \cdot 0,31 \cdot 16}{9 \cdot 2,5 \cdot 6} \left(\frac{18}{6,0} + \frac{22}{7,4} + \frac{28}{10,0} + \frac{22}{15,6} \right) \frac{k}{m} = \\ &= \frac{0,748 \cdot 10^{-4} \cdot 3,16 \cdot 10^7}{50} = 47,2 \text{ см/год.} \end{aligned}$$

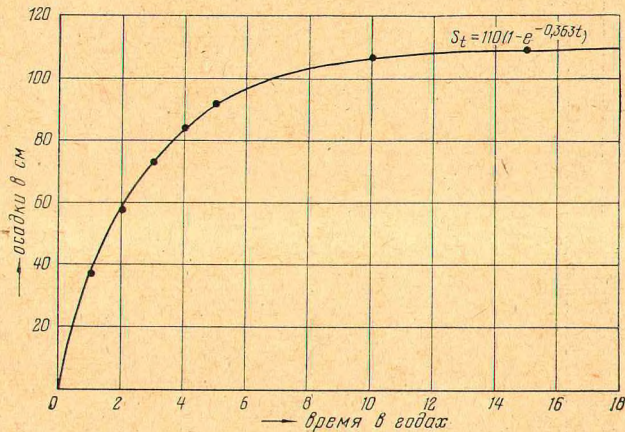


Рис. 4. Кривая осадки насыпи по времени.

Результаты других опытов сведены в табл. 1.

Полученные результаты дают возможность определить изменение величины осадки во времени, отыскав некоторые параметры, входящие в формулу Г. И. Покровского:

$$S_t = S_{\max} \left(1 - e^{-\frac{vt}{S_{\max}}} \right), \quad (4)$$

где S_{\max} — стабилизированная осадка, определенная на основании компрессионных испытаний;

t — время, выражаемое в годах;

e — основание натуральных логарифмов;

v — скорость осадки, полученная расчетным путем на ЭГДА для данного напряженного состояния и принимаемая в среднем равной 40 см/год.

Величина стабилизированной осадки определялась предварительно, исходя из компрессионных испытаний, и для нашего случая получается $S_{\max} = 110$ см.

Подставляя эти данные в уравнение (4), получим следующее выражение для осадки насыпи во времени:

$$s_t = 110(1 - e^{-0,363t}),$$

которое на рис. 4 представлено графически. Как видно из рис. 4, осадка насыпи продолжается довольно долго, но наиболее интенсивно она происходит в первые годы сооружения.

Литература

1. Дружинин Н. И. Метод электрогидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации. Госэнергоиздат. М., 1956.
2. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. «Высшая школа». М., 1968.
3. Покровский Г. И., Федоров И. В. «Моделирование осадок оснований». Госстройиздат. М., 1939.