

П. О. БОЙЧЕНКО

УРАВНЕНИЕ СКОРОСТИ УПЛОТНЕНИЯ СЛОЯ
ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГРУНТА ПОД НАГРУЗКОЙ

(Представлено академиком Л. С. Лейбензоном 7 VII 1948)

При постоянной пористости грунта и при постоянном гидравлическом напоре фильтрация воды подчиняется закону Дарси:

$$\frac{q}{tF} = -k \frac{H}{l}; \quad (1)$$

q — расход воды за время t ; F — площадь сечения образца; k — коэффициент фильтрации; H — гидравлический напор (разность напоров); l — длина пути фильтрации.

Применим эту формулу для случая фильтрации воды в результате уплотнения слоя водонасыщенного грунта, сжимаемого в условиях невозможности его бокового расширения (например, при уплотнении в кольце компрессионного прибора) некоторой добавочной нагрузкой p кг/см², приложенной практически мгновенно к грунту, ранее уплотненному нагрузкой p_1 . Для этого необходимо заменить величины, фигурирующие в формуле (1), величинами, им соответствующими по условиям опыта. При этом будем иметь в виду установление функциональной зависимости последних величин для приращения времени на dt от некоторого значения t .

При уплотнении из образца удаляется вода (перемещающаяся только в вертикальном направлении), объем которой равен общему уменьшению объема слоя грунта. За промежуток времени dt высота слоя h изменится на величину dh и расход воды будет $dq = F dh$.

Дифференцируя известную в механике грунтов формулу $h_0 = \frac{h}{1 + \varepsilon}$ (см., например, (3)), получаем: $dh = h_0 d\varepsilon$ (h_0 — приведенная высота слоя грунта; ε — коэффициент пористости). Тогда расход воды за время dt можем представить в виде

$$dq = F h_0 d\varepsilon. \quad (2)$$

Выжимание воды из грунта происходит под влиянием только части добавочной нагрузки p , так как другая часть этой нагрузки p_z , возрастающая в процессе уплотнения, воспринимается твердыми частицами грунта. Заменяя давление, передающееся на воду, соответствующим столбом воды, можем написать:

$$H = \frac{p - p_z}{\Delta_0}. \quad (3)$$

(Δ_0 — объемный вес воды).

Давление, воспринимаемое скелетом грунта, p_z , находится из компрессионной кривой для любых степеней уплотнения по соответствующим значениям коэффициента пористости, приблизительно — по графику, более точно — по логарифмическому уравнению компрессионной кривой (рис. 1).

При фильтрации воды через грунт, при неизменной пористости последнего расход в любых сечениях образца одинаков. В этом случае, как известно, принимают за длину пути фильтрации полную толщину слоя h . Расход же воды при ее движении в результате уплотнения грунта различен в различных сечениях слоя — равен нулю на поверхности слоя, прилегающей к непроницаемому основанию (фильтрация односторонняя), и достигает наибольшей величины у поверхности выхода воды. При этих условиях за величину l принимаем величину условную — эквивалентную длину пути фильтрации. Последняя будет представлять собой такой отрезок полной мощности слоя, при котором расход воды будет одинаковым на всем его протяжении и равным максимальному расходу dq . Учитывая сказанное, эквивалентную длину пути фильтрации можем представить выражением:

$$l = \omega h = \omega h_0 (1 + \epsilon). \quad (4)$$

Значения коэффициента ω могут быть получены с помощью уравнения гидродинамических давлений Н. М. Герсеванова (4) и Терцаги (5). По этому уравнению необходимо вначале построить изохроны давлений в скелете грунта p_z , а затем,

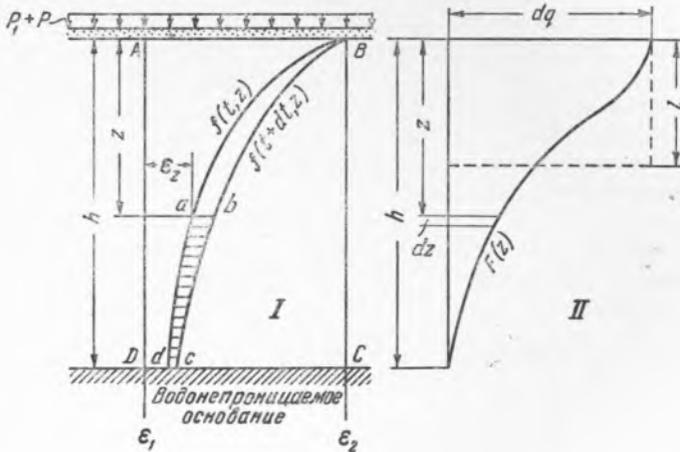


Рис. 2

пользуясь уравнением компрессионной кривой (рис. 1), и соответствующие изохроны изменения коэффициента пористости ϵ_z .

На рис. 2, I дано изображение таких изоخرон коэффициента пористости, отличающихся по времени на величину dt , для случая односторонней фильтрации. Расход воды в каждом сечении на глубине z определится площадью $abcd$, расход dq — всей площадью, заключенной между двумя изохронами, а расход за все время уплотнения под данной нагрузкой, при изменении коэффициента пористости от ϵ_1 до ϵ_2

будет соответствовать площади $ABCD^*$. Кривая расходов представлена на рис. 2, II. Исходя из поставленного выше условия, принимая расход постоянным в различных сечениях слоя и равным dq , эквивалентная длина пути фильтрации изобразится следующей формулой (см. рис. 2, II):

$$l = \frac{1}{dq} \int_0^h F(z) dz. \quad (5)$$

По полученным величинам l коэффициент ω находится из равенства (4).

Коэффициент ω является функцией степени осадки Q и отношения начального коэффициента сжимаемости к конечному для данной ступени уплотнения β .

Найденные графическим путем значения ω представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента ω

Q β	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95
1	0,17	0,32	0,45	0,56	0,61	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,5	0,16	0,31	0,44	0,55	0,62	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
2	0,16	0,30	0,43	0,54	0,62	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64
3	0,15	0,29	0,42	0,53	0,62	0,65	0,66	0,65	0,64	0,64
5	0,15	0,29	0,41	0,52	0,62	0,66	0,67	0,66	0,64	0,64
10	0,15	0,28	0,40	0,52	0,62	0,67	0,68	0,67	0,65	0,64
15	0,15	0,28	0,40	0,51	0,61	0,67	0,69	0,68	0,66	0,64

После подстановки полученных величин из выражений (2) — (4) в формулу (1), памятуя, что q и t в этой формуле нами заменены дифференциальными величинами dq и dt , получим уравнение:

$$V_\varepsilon = - \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{k(p - p_2)}{\omega h_0^2 (1 + \varepsilon) \Delta_0}. \quad (6)$$

Уравнение (6) дано для случая односторонней фильтрации. При фильтрации двусторонней в числителе правой части формулы должно быть число 4.

Величина $V_\varepsilon = -d\varepsilon/dt$, выражая собой уменьшение коэффициента пористости в единицу времени, дает характеристику интенсивности уплотнения и поэтому может быть названа скоростью уплотнения или скоростью консолидации. В соответствии с этим и выражение (6), отображающее взаимную связь факторов, определяющих интенсивность сжатия слоя грунта, можно назвать уравнением скорости уплотнения слоя водонасыщенного грунта под нагрузкой.

Н. Н. Иванов получил свою формулу (1,2) в результате анализа конечных величин, причем им было предположено, что гидравлический напор в процессе уплотнения остается постоянным, соответствующим полной добавочной нагрузке p ; длина пути фильтрации была

* Пропорциональная зависимость между площадями эпюр коэффициента пористости и осадками слоя, а следовательно, и количеством выжатой из грунта воды, установлена автором (6).

принята также постоянной (равной половине толщины слоя при односторонней фильтрации).

Как видно из изложенного выше, при выводе уравнения (6) приняты во внимание существующие соотношения между дифференциальными величинами, что, несомненно, более отвечает действительности, и учтены как переменность гидравлического напора, так и переменность длины пути фильтрации. Кроме того, при переходе от односторонней фильтрации к двусторонней дано исправленное значение коэффициента (число 4 вместо числа 2).

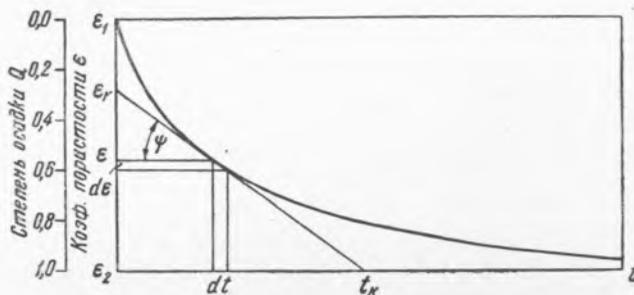


Рис. 3

Уравнение скорости уплотнения может быть использовано для расчета коэффициента фильтрации грунтов косвенным методом по кривой консолидации в широких пределах изменения степени осадки. Производная $d\varepsilon/dt$ легко находится по экспериментальным данным двумя способами: графическим путем, как тангенс угла ψ в точке кривой консолидации, отвечающей заданному ε ($\operatorname{tg} \psi = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_2}{t_k}$, рис. 3),

а также по зафиксированным при опытах конечным приращениям коэффициента пористости и времени, т. е. приняв $\operatorname{tg} \psi \approx \Delta\varepsilon / \Delta t$.

Кроме того, в результате графического интегрирования уравнения (6) возможно строить теоретические кривые осадок слоя грунта в зависимости от времени. Сопоставление экспериментальных кривых консолидации и теоретических показало, что последние весьма близки к первым.

Ленинградский государственный
университет

Поступило
8 VI 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. Н. Иванов и П. П. Пономарев, Строительные свойства грунтов, 1932. ² Н. Н. Иванов и В. В. Охотин, Дорожное почвоведение и механика грунтов, 1943. ³ Н. А. Цытович, Механика грунтов, 1940. ⁴ Н. М. Герсеванов, Основы динамики грунтовой массы, 1933. ⁵ К. Terzaghi, Erdbaumechanik, 1925 (русс. пер. К. Терцаги, Строительная механика грунта, 1933), ⁶ П. О. Бойченко, Научн. бюлл. Лен. гос. ун-та, № 18 (1947).