

ПРОГНОЗ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТКАЧКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Доцент, канд. техн. наук З. Г. ТЕР-МАРТИРОСЯН¹

Реферат. В настоящее время в связи с ростом интенсивности инженерной деятельности человека из недр земли извлекаются огромные количества подземных вод, нефти и газа. В связи с этим резко изменяется физическое состояние верхних слоев литосферы, нарушаются многие равновесные процессы, в том числе и механические, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния и в конечном итоге к осадкам земной поверхности. Для прогноза напряженно-деформированного состояния горных массивов в связи с откачкой жидкости из недр земли может быть использована теория консолидации и ползучести многофазных грунтов. В статье даются решения ряда задач для прогнозирования оседания земной поверхности при откачке жидкости из недр земли.

Интенсивное использование подземных вод, откачка нефти и газа из пластов приводят к большим осадкам земной поверхности, что является областью исследований геомеханики (Тер-Степанян, 1967; Цытович, 1971).

Наблюдения за осадками земной поверхности в районах эксплуатации водозаборов и месторождений нефти и газа показывают (Гармонов и др., 1965), что эти осадки достигают величин от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Вследствие этого нарушаются нормальные условия эксплуатации инженерных сооружений, происходит затопление и заболачивание больших территорий.

В связи с актуальностью этой проблемы по инициативе ЮНЕСКО регулярно проводятся международные симпозиумы. В опубликованных докладах участников этих симпозиумов рассматриваются различные аспекты проблем оседания земной поверхности в связи с откачкой воды, нефти и газа и подземных выемок грунта. В них сделаны попытки дать решения ряда задач для инженерного прогноза.

В работе Гармонова и др. (1965) дан полный обзор опубликованных исследований по проблеме оседания земной поверхности в связи с интенсивной откачкой подземных вод, нефти и газа и освещены некоторые вопросы теории прогноза оседания земной поверхности.

Однако значительное развитие теории консолидации грунтов в последние годы (Тер-Мартиросян и Цытович, 1965; Цытович и др., 1967; Зарецкий, 1967) дает возможность поставить эти задачи в более общем виде с полным учетом свойств отдельных фаз грунта. Отметим, что в этом направлении в гидрогеологии также сделаны попытки, учитывающие упругие свойства пористой среды и жидкости.

В этих работах рассматриваются неустановившиеся режимы фильтрации (Лейбензон, 1947; Скабаланович, 1960) для определения только

¹ Доцент Московского инженерно-строительного института.

функции понижения напора при постоянном дебите скважины. Вопросы осадок в них не рассмотрены.

В настоящей статье даются решения ряда задач консолидации многофазных грунтов в наиболее общей постановке с учетом ползучести скелета грунта и неполного насыщения его пор жидкостью, а также переменностью режима нагружения. Задачи, рассмотренные нами ранее (Ter-Martirosyan and Ferronsky, 1969), здесь развиты, дополнены и обобщены.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для оценки напряженно-деформированного состояния многофазного грунта в процессе консолидации в качестве исходных положений принимаем:

- а) принцип эффективных напряжений Терцаги;
- б) принцип ламинарной фильтрации Дарси;
- в) принцип наследственной ползучести Больцмана;
- г) принцип сжимаемой жидкости Лейбензона.

Процесс уплотнения многофазного грунта, как известно (Тер-Мартirosян, 1965), может быть описан дифференциальным уравнением консолидации вида:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + ea_1 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1 + \bar{e}}{\gamma_1} k \nabla^2 u, \quad (1)$$

где $\bar{e}$, e — средний и изменяющийся во времени коэффициент пористости; γ_1 — объемный вес жидкости; a_1 — коэффициент сжимаемости жидкости; ∇^2 — оператор Лапласа; k — коэффициент фильтрации; u — давление в поровой жидкости, t — время.

В качестве реологического уравнения состояния, для описания деформаций уплотнения пористого скелета возьмем интегральное уравнение наследственной ползучести Маслова—Арутюняна (Арутюнян, 1952) в виде:

$$e(\tau_1) - e(t) = \sigma(t) \cdot a(t, t) - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial t} a(t, \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $e(\tau_1)$, $e(t)$ — начальный и изменяющийся во времени коэффициент пористости; $\sigma(t)$ — изменяющееся во времени напряжение в скелете (эффективное напряжение); τ_1 — момент начала загрузки скелета; $a(t, \tau)$ — обобщенный коэффициент сжимаемости, определяемый выражением вида

$$a(t, \tau) = a_m + a_1 \{1 - \exp[-\eta(t - \tau)]\}, \quad (3)$$

где a_m — коэффициент мгновенного (упругого) уплотнения; a_1 — коэффициент длительного (вязкого) уплотнения; η — параметр ползучести.

Уравнения (1), (2) и (3) даны в форме записи В. А. Флорина (1961).

Жидкость и газы, заполняющие поры, представим, следуя Лейбензону (1947), в виде эквивалентной сжимаемой жидкости. Ранее было показано (Цытович и др., 1967), что для практических расчетов и в

небольшом диапазоне изменения давлений, уравнение состояния такой жидкости можно представить в виде:

$$-\frac{1}{V} \frac{dV}{du} = \frac{1 - S_r}{P_a} = a_r,$$

где V —рассматриваемый объем жидкости; S_r —коэффициент заполнения пор жидкостью; a_r —коэффициент объемной сжимаемости эквивалентной жидкости; P_a —атмосферное давление.

В процессе уплотнения пористой среды будем пользоваться условием равновесия

$$q(t) = \sigma(t, z) + u(t, z), \quad (4)$$

где q —общее напряжение на пористую среду.

Будем считать, что вследствие понижения уровня жидкости пористая среда, освобожденная от взвешивающего эффекта жидкости, в каждом единичном объеме становится тяжелее на величину

$$\gamma^* = \gamma_d - \gamma'_d,$$

где γ_d —объемный вес скелета; γ'_d —объемный вес скелета, взвешенный в воде, определяемый по формуле

$$\gamma'_d = \frac{\gamma_s - \gamma_f}{1 - e},$$

где γ_s —объемный вес минеральных частиц; γ_f —объемный вес жидкости.

Для решения конкретных краевых задач остается подобрать соответствующие начальные и граничные условия.

ОБОБЩЕННАЯ ОДНОМЕРНАЯ ЗАДАЧА КОНСОЛИДАЦИИ

В практике производства добычи подземных вод часто встречаются случаи, когда из многочисленных скважин, расположенных на большой площади, производится одновременная откачка. В этом случае процесс снижения уровня жидкости на большой территории можно рассматривать как одномерный, что эквивалентно одномерной задаче консолидации (рис. 1) с заданной скоростью нагружения и изменения граничного напора.

Дифференциальное уравнение одномерного уплотнения на основе (1) можно представить в виде:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + a_1 \bar{e} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1 + \bar{e}}{\gamma_f} k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (5)$$

Рассматривая (5) совместно с (2) и учитывая уравнение равновесия (4), получим следующее дифференциальное уравнение состояния:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a \frac{\partial u}{\partial t} - F(t) = c_v \left[\frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right], \quad (6)$$

где $F(t) = b\ddot{q}(t) + e\dot{q}(t)$; $a = \frac{\eta(a_m + e\bar{a}_1 + a_1)}{a_m + e\bar{a}_1}$; $b = \frac{a_m}{a_m + a_m e}$;

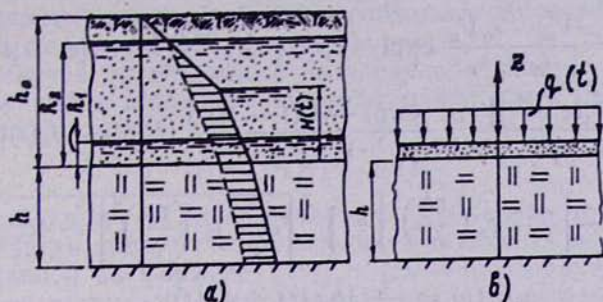


Рис. 1. Расчетная схема осадки земной поверхности при равномерном водопонижении: а) эпюра природного давления в скелете грунта до и после водопонижения; б) эквивалентная схема консолидации.

Նկ. 1. Գետնի մակերեսի համաճեմամբ հաշվարկային սխեման հավասարաչափ զերեալը քիչեցման ժամանակ: ա) գրունտի կմախքում բնական ճնշման էպյուրը զերեալը քիչեցումից առաջ և հետո: б) միառանցքային կոնսոլիդացիայի համարժեք սխեման:

Fig. 1. Calculation scheme of earth surface subsidence by uniform lowering of the water table: a) chart of the pressure in soil skeleton before and after the water lowering; b) equivalent scheme of the uniaxial consolidation

$$c_v = \frac{(1 + \bar{e})k}{\gamma_1(a_m + a_1\bar{e})}; \quad d = \frac{\gamma(a_m + a_1\bar{e})}{a_m + a_1\bar{e}}$$

Начальные и граничные условия для решения (6) в общем случае будут следующие:

$$\left. \begin{aligned} u(0, t) &= \mu_1(t) \\ u(h, t) &= \mu_2(t) \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} u(z, 0) &= \varphi(z, 0) \\ \dot{u}(z, 0) &= \psi(z, 0) \end{aligned} \right\}$$

Первое и второе начальные условия определяются из условия отсутствия фильтрации жидкости из пор грунта. Тогда первое и второе начальные условия будут иметь вид:

$$u(\tau_1) = q(\tau_1)b; \quad \frac{\partial u(\tau_1)}{\partial t} = \dot{q}(\tau_1)b + q(\tau_1)d'(1 - b), \quad (7)$$

$$\text{где } d' = \frac{\gamma a_e}{a_m + a_1 \bar{e}_a}.$$

Следует отметить, что В. А. Флорин (1961) в качестве второго начального условия предлагает взять уравнение другого вида, учитывающее наличие фильтрации в начальный момент, что, на наш взгляд, противоречит первому начальному условию. Кроме того, по Флорину (1961), начальные напоры оказываются зависящими от координат, что невозможно.

Решение дифференциального уравнения (6) с приведенными начальными и граничными условиями, полученное нами, имеет вид:

$$u(z, t) = u(0, t) + \frac{z}{h} [u(h, t) - u(0, t)] + \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} V_n(t) \sin \frac{\pi n z}{h}, \quad (8)$$

где

$$V_n(t) = \frac{\dot{V}_n - \lambda_2 V_n}{\lambda_2 - \lambda_1} \exp(-\lambda_1 t) + \frac{\dot{V}_n + \lambda_1 V_n}{\lambda_1 - \lambda_2} \exp(-\lambda_2 t) + \int_0^t \left\{ \frac{\exp[-\lambda_1(t-\tau)]}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{\exp[-\lambda_2(t-\tau)]}{\lambda_1 - \lambda_2} \right\} [F_n(\tau) - f_n(\tau)] d\tau, \quad (9)$$

$$\text{где } \lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left\{ - \left[a + c_v \left(\frac{\pi n}{h} \right)^2 \right] \pm \sqrt{\left[a + c_v \left(\frac{\pi n}{h} \right)^2 \right]^2 - 4c_v \gamma_1 \left(\frac{\pi n}{h} \right)^2} \right\}$$

$$F_n(t) = \frac{4}{\pi n} [b\ddot{q}(t) + d\dot{q}(t)];$$

$$f_n(t) = \frac{4}{\pi n} [\ddot{u}(0,t) + a\dot{u}(0,t)] + \frac{2}{\pi n} \{ [\ddot{u}(h,t) - \dot{u}(0,t)] + a[\dot{u}(h,t) - \dot{u}(0,t)] \}$$

$$\dot{V}_n = \frac{4}{\pi n} [\dot{q}(\tau_1)b - q(\tau_1)d'(1-b) - \dot{u}(0,\tau_1)] - \frac{2}{\pi n} [\dot{u}(b,\tau_1) - \dot{u}(0,\tau_1)];$$

$$V_n = \frac{4}{\pi n} [bq(\tau_1) - u(0,\tau_1)] - \frac{2}{\pi n} [u(h,\tau_1) - u(0,\tau_1)].$$

Таким образом, поставленная обобщенная одномерная задача консолидации с учетом ползучести скелета и сжимаемости поровой жидкости и переменности граничных нагрузок и напоров полностью решена.

Частные решения, отвечающие заданным режимам снижения уровня жидкости, могут быть получены на основе (8) путем интегрирования (9).

Для расчета величин осадок слоя грунта, как известно (Цытович, 1963), необходимо интегрировать уравнения вида

$$s(t) = \int_0^h \frac{e(\tau_1) - e(z,t)}{1 + e(\tau_1)} dz. \quad (11)$$

Подставляя сюда значение $e(\tau_1) - e(z,t)$ из (2) и учитывая уравнение равновесия (4), получим

$$s(t) = \frac{1}{1 + e(\tau_1)} \int_0^R \left\{ [q(t) - u(z,t)] a_m + \int_{\tau_1}^t [q(t) - u(z,t)] \frac{\partial}{\partial \tau} d\tau \right\} dz. \quad (12)$$

Осадка верхних слоев грунта без учета консолидационных процессов может быть определена также по формуле (11), предполагая, что напряжение в скелете грунта в обезвоженной части растет прямо пропорционально глубине, а ниже переменного уровня грунтовых вод — постоянно, т. е. имеем

$$\sigma(z,t) = [h_2 - H(t)] \gamma^*.$$

Подставляя это выражение в (11), получим

$$s(t) = \frac{\gamma^*}{1 + e(\tau_1)} \left\{ \frac{3}{2} \int_0^H \left\{ \frac{h_2 - H(t)}{2} \right\} a_m - \int_{\tau_1}^t [h_2 - H(\tau)] \frac{\partial}{\partial t} a(t,\tau) d\tau \right\} dH.$$

В заключение настоящего параграфа отметим, что прогнозирование осадки во времени в ряде случаев необходимо производить с учетом так называемой «вторичной консолидации».

В этом случае общая осадка во времени с учетом консолидации в фильтрационный и вторичный периоды может быть представлена в виде следующей суммы:

$$s(t) = s_I(t) + s_{II}(t),$$

где $s_I(t)$ — осадка грунта, протекающая в период фильтрационного уплотнения с учетом ползучести скелета и сжимаемости поровой жидкости, определяемой по формуле (12); $s_{II}(t)$ — осадка грунта, протекающая в период вторичной консолидации и определяемая следующим образом:

$$s_{II}(t) = \frac{qh}{1 + e(\tau_1)} a_s \ln \frac{t}{t_1},$$

где t_1 — момент окончания фильтрационной консолидации, определяемой графическим или аналитическим путем; a_s — коэффициент вторичной консолидации, определяемый по наклону прямой экспериментального графика осадка—время, построенного в полулогарифмическом масштабе.

В предложенной схеме разделение прогнозирования осадки во времени связано с физическими процессами, протекающими в грунте в процессе консолидации. В первый период консолидации скорость ее в основном будет определяться фильтрационными свойствами грунта, так как уплотнение скелета протекает довольно интенсивно. Во втором периоде консолидации скорость деформации скелета настолько мала, что не вызывает больших напорных градиентов в поровой жидкости и процесс полностью контролируется ползучестью скелета.

Отметим, что внесение добавочного члена для прогноза осадки не вносит особых трудностей при определении параметров ползучести по результатам компрессионных испытаний. Более того, в этом случае облегчается методика определения как основных реологических параметров a_m , a_1 , η , так и самого a_s , так как отпадает необходимость проведения опытов до полной (условно) стабилизации. Действительно, полагая, что в фильтрационный период осадки ползучесть скелета может быть учтена основными параметрами (a_m , a_1 , η), а в период вторичной консолидации — параметром a_s , можем ограничиться кратковременными экспериментами. Первые три параметра легко определяются по величинам начальной и фильтрационной осадки, а параметр вторичной консолидации по наклону прямой осадка — время.

Таким образом, получаем возможность прогнозировать поровое давление и осадку в процессе фильтрационной консолидации с учетом реологических свойств скелета и чисто вторичную консолидацию.

ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ЗАДАЧИ КОНСОЛИДАЦИИ

Рассмотрение задачи уплотнения грунтов напорного пласта мощностью h , из которого производится одновременная откачка жидкости из нескольких скважин диаметром $2R_0$ и расстоянием $2R$ (рис. 2), приводит к решению осесимметричной задачи консолидации, описываемому на основании (1) уравнением вида:

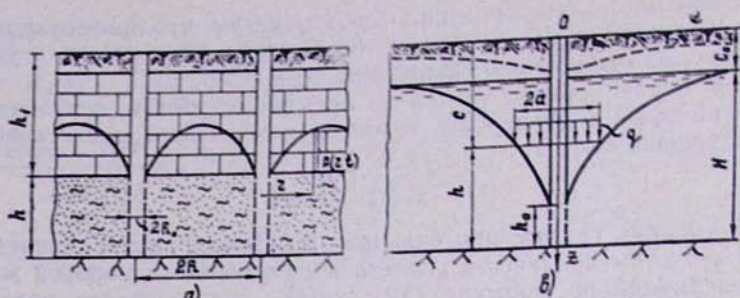


Рис. 2. Расчетная схема осадки земной поверхности: а) при откачке жидкости из напорного пласта; б) при образовании депрессионной воронки.

Նկ. 2. Գեանքի մակերեսի համահստման հաշվարկային սխեման՝ ա) ճնշային տակ գտնվող շերտից հեղուկի արտամղման ժամանակ. բ) դեպրեսիոն ձաղարի առաջացման ժամանակ:

Fig. 2. Calculation scheme of earth surface subsidence: a) by water pumping out from a pressure stratum; b) by formation of a depression funnel.

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \bar{e} a_i \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1 + \bar{e}}{\gamma_i} k_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right). \quad (13)$$

Как известно (Цытович и др., 1967; Tsytoovich et al., 1971), постановка и решение осесимметричной задачи консолидации существенно зависит от принятой расчетной схемы и полноты учета свойств отдельных фаз грунта. Существующие расчетные схемы основаны на принципе «свободных деформаций». Применение той или иной расчетной схемы зависит от жесткости уплотняющей нагрузки (сооружения или пласта). Как в первом, так и во втором случае предполагается компрессионное сжатие грунтов, т. е. одноосное сжатие без возможности бокового расширения. Кроме того, существенную роль в методике решения этого уравнения играет второй член слева, т. е. сжимаемость поровой жидкости. Так, например, учет сжимаемости поровой жидкости делает невозможным использовать теорему Карилло не только в принципе «равных деформаций», но и в принципе «свободных деформаций».

Рассмотрим решение осесимметричной задачи консолидации по принципу свободных деформаций в предположении, что уплотнение грунта происходит под действием постоянной, равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q .

Тогда совместное решение уравнений (13) и (2) с учетом условий равновесия дает

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a \frac{\partial u}{\partial t} = c_v \left[\frac{\partial^3 u}{\partial r^2 \partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial t} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right]. \quad (14)$$

Первое и второе начальные условия по аналогии с (7) определяем из условия отсутствия отжатия жидкости из пор, т. е. имеем

$$u(\tau_1) = qb; \quad \dot{u}(\tau_1) - qd'[q - u(\tau_1)] = qd'(1 - b),$$

где

$$b = \frac{a_m}{a_m + a_i e(\tau_1)}; \quad d' = \frac{\eta \cdot a_i}{a_m + a_i e(\tau_1)}.$$

Граничные условия на основе принятой расчетной схемы будут иметь вид:

$$u(R_0, t) = 0 \quad \frac{\partial u(R, t)}{\partial r} = 0.$$

Решение уравнения (14) при заданных начальных и граничных условиях имеет вид:

$$u(r, t) = u(\tau_1) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{I_1^2(z_i R)}{I_1^2(z_i R) - I_0^2(z_i R_0)} \frac{\dot{u}(\tau_1) - u(\tau_1) \lambda_{i1}}{u(\tau_1) \lambda_{i2} - \dot{u}(\tau_1)} \frac{V_0(z_i r)}{Y_0(z_i R_0)} \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{u(\tau_1) \lambda_{i2} - \dot{u}(\tau_1)}{\dot{u}(\tau_1) - u(\tau_1) \lambda_{i1}} \exp(\lambda_{i1} t) + \exp(\lambda_{i2} t) \right],$$

где $V_0(z_i r) = I_0(z_i r) Y_0(z_i R_0) - I_0(z_i R_0) Y_0(z_i r)$

$$\lambda_{i1,2} = \frac{1}{2} \left\{ -[a + c_v z_i^2] \pm \sqrt{[a + c_v z_i^2]^2 - 4c_v \gamma z_i^2} \right\}.$$

Характеристическое уравнение для определения z_i будет иметь вид:

$$I_1(z_i R) Y_0(z_i R_0) - I_0(z_i R_0) Y_0(z_i R) = 0,$$

где I_0, I_1, Y_0, Y_1 — функции Бесселя.

Для определения величины осадки во времени в таких случаях рассчитывают среднее значение порового давления

$$\bar{u}(r, t) = \frac{1}{R - R_0} \int_{R_0}^R u(r, t) dr.$$

Среднюю осадку по величине среднего порового давления можно определить по формуле:

$$\bar{s}(t) = \frac{h}{1 + e(\tau_1)} \left\{ [q - u(\tau_1)] a_m - \int_{\tau_1}^t [q - \bar{u}(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} a(t, \tau) d\tau \right\}.$$

На этом решение задачи можно считать законченным, так как оно доведено до нахождения Бесселевых функций целого порядка, для которых составлены обширные таблицы.

Для рассмотренной нами задачи оседания земной поверхности при откачке жидкости из напорного пласта полученное решение следует упростить, так как начальные напоры необходимо рассматривать как сформировавшиеся в течение длительного времени.

Обозначая интенсивность нагрузки от веса вышележащей толщи через q и его распределение между скелетом и поровой жидкостью, стабилизированное и известное будем иметь

$$q = \sigma(\tau_1) + u(\tau_1) \quad (16)$$

Очевидно, что для второго начального условия получим нулевое значение, так как исходный момент считается установившимся, т. е. имеем

$$\dot{u}(\tau_1) = 0 \quad (17)$$

$$u(r,t) = u(\tau_1) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{I_1^2(\alpha_i R)}{I_1^2(\alpha_i R) - I_0^2(\alpha_i R_0)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{Y(\alpha_i r)}{Y_0(\alpha_i R_0)} \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \exp(\lambda_1 t) - \exp(\lambda_2 t) \right]$$

ОСЕДАНИЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ДЕПРЕССИОННОЙ ВОРОНКИ

При откачке жидкости из безнапорных горизонтов, как известно, в подземном пространстве образуется депрессионная воронка (рис. 2,б), вследствие чего в окружающем массиве наблюдается оседание земной поверхности. Это связано с изменением веса скелета грунта внутри депрессионной воронки вследствие освобождения от взвешивающего эффекта. Изменение напряженного состояния в полупространстве, сложенном из пористой сжимаемой водонасыщенной среды, в которой образуется депрессионная воронка, может быть описано с помощью задачи Миндлина (Mindlin, 1950) в предположении, что по всему объему депрессионной воронки действует дополнительная равномерно-распределенная нагрузка.

Как известно, осадка поверхностных точек по Миндлину при действии сосредоточенной силы P на глубине C определяется выражением

$$W = \frac{P}{8\pi E} \left[\frac{8(1-\nu^2)}{R} + \frac{4C^2(1-\nu)}{R^3} \right], \quad (18)$$

где R — расстояние от места приложения силы до поверхностной точки полупространства, ν — коэффициент Пуассона.

Определим осадку в произвольной точке на свободной поверхности грунта от действия равномерно-распределенной нагрузки интенсивностью по площади круга радиусом a на глубине C . Из геометрических соображений можно записать, что

$$R^2 = r^2 + \rho^2 + 2r\rho \cos \varphi + C^2.$$

Тогда осадка поверхностной точки M на основании (18) определится интегралом вида

$$W_M = \frac{F}{8\pi E} \iint_F \left[\frac{8(1-\nu^2)}{R} + \frac{4C^2(1-\nu)}{R^3} \right] \rho \cdot d\varphi d\rho.$$

Решение этого уравнения приводит к взятию эллиптических интегралов, что затруднительно.

В случае определения максимальной осадки в точке с координатами $(0, 0, 0)$ от действия нагрузки по площади круга после интегрирования приходим к выражению вида

$$W_0 = \frac{q}{4E} \left\{ 8(1-\nu)^2 (\sqrt{C^2 + a^2} - \sqrt{C^2 + R_0^2}) + 4C^2(1-\nu) \left[\frac{1}{\sqrt{(C^2 + R_0^2)}} - \frac{1}{\sqrt{(C^2 + a^2)}} \right] \right\}.$$

Для определения осадки в точке $(0, 0, 0)$ от нагрузки, действующей по всему объему депрессионной воронки, необходимо интегрирование провести также по направлению от C_0 до h_0 , принимая a зависящим от Z .

Так как в большинстве случаев кривые депрессионных воронок являются сложными, то избежать решения эллиптических интегралов не удастся. Поэтому интегрирование целесообразно заменить суммированием, разделяя всю толщу на элементарные слои. В этом случае получили

$$W_0 = \frac{\gamma^*}{4E} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta C_i \left\{ 8(1-\nu^2)(\sqrt{C_i^2 + a_i^2} - \sqrt{C_i^2 + R_0^2}) + \right. \\ \left. + 4C_i^2(1-\nu) \left[\frac{1}{\sqrt{C_i^2 + R_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{C_i^2 + a_i^2}} \right] \right\},$$

где ΔC_i — толщина элементарного слоя.

В случае, когда среда обладает наследственной ползучестью, описываемой зависимостью вида (2), осадка во времени определяется следующим образом

$$W_0(t) = \frac{\gamma^*}{4E(t)} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta C_i \left\{ 8(1-\nu)^2(\sqrt{C_i^2 + a_i^2} - \sqrt{C_i^2 + R_0^2}) + \right. \\ \left. + 4C_i^2(1-\nu) \left[\frac{1}{\sqrt{C_i^2 + R_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{C_i^2 + a_i^2}} \right] \right\},$$

где $\frac{1}{E(t)} = \frac{1}{E_m} [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}]$, E_m — модуль мгновенной деформации,

E_l — модуль длительной деформации, остальные обозначения прежние. Если ввести обозначения $\alpha = a/C$ и $\beta = R_0/C$, то осадка на основе (19) может быть определена по формуле

$$W_0 = \frac{qC}{E} A, \quad (20)$$

где $A = 2(1-\nu^2)(\sqrt{1+\alpha^2} - \sqrt{1+\beta^2}) + (1-\nu) \left(\frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2}} \right)$

$$q = \gamma^* \Delta C.$$

Значения $A(\nu, \alpha, \beta)$ приведены в табл. 1.

В случае неоднородных напластований при использовании формулы (20) следует для всей уплотняемой толщи определить приведенный модуль и приведенный коэффициент Пуассона по формулам:

$$E_{np} = \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2 + \dots + E_n h_n}{h};$$

$$\nu_{np} = \frac{\nu_1 h_1 + \nu_2 h_2 + \dots + \nu_n h_n}{h^2},$$

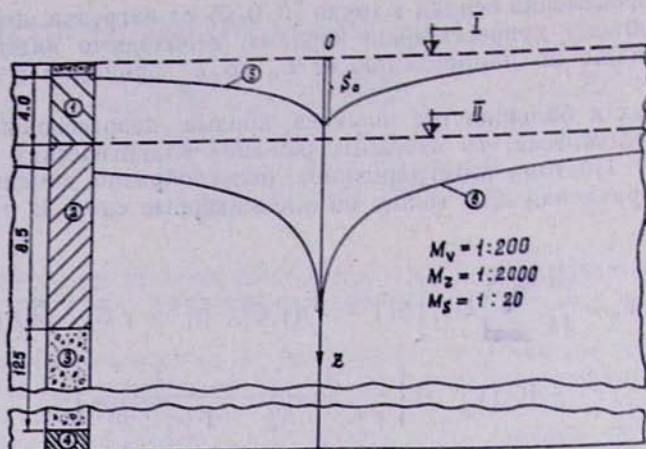


Рис. 3. Результаты расчета осадки поверхности земли вследствие водо-
понижения в районе г. Масис Арм. ССР. 1) суглинки тяжелые; $\gamma =$
 $= 1,67 \text{ т/м}^3$; $E = 126 \text{ кг/см}^2$; 2) супеси легкие; $\gamma = 1,85 \text{ т/м}^3$; $E = 97 \text{ кг/см}^2$;
3) пески среднезернистые; $\gamma = 1,9 \text{ т/м}^3$; $E = 275 \text{ кг/см}^2$; 4) глины плотные,
водоупорные; 5) кривая осадки поверхности земли; 6) депрессионная
кривая. I. начальный уровень грунтовых вод; II. конечные (проектируе-
мый) уровень грунтовых вод.

նկ. 3. Գետնի մակերևույթի համաճատման հաշվարկի արդյունքները գետնաջրերի
իջեցման հետևանքով, ՉՍՍՀ Մասիս Բաղաբի շրջանում. 1—ծանր մերձավազեր
 $\gamma = 1,67 \text{ տ/մ}^3$, $E = 126 \text{ կգ/սմ}^2$. 2—թեթև մերձավազեր $\gamma = 1,85 \text{ գ/սմ}^3$, $E = 97 \text{ կգ/սմ}^2$.
3—միջաճատիկ ավազներ $\gamma = 1,9 \text{ տ/մ}^3$, $E = 275 \text{ կգ/սմ}^2$. 4—խիտ չրամերժ կա-
վեր. 5—գետնի մակերևույթի համաճատման կոր. 6—գետնաջրերի վերջնական (նախա-
դրվող) մակարդակը. II—գետնաջրերի վերջնական (նախա-
դրվող) մակարդակը.

Fig. 3. Calculation results of earth surface subsidence due to lowering
of water table near Masis, Armenia. 1—clay loam, $\gamma = 1,67 \text{ g/cm}^3$, $E =$
 126 kg/cm^2 ; 2—sandy loam, $\gamma = 1,85 \text{ g/cm}^3$, $E = 97 \text{ kg/cm}^2$; 3—middle sand,
 $\gamma = 1,9 \text{ g/cm}^3$, $E = 275 \text{ kg/cm}^2$. 4—dense, watertight clay; 5—earth surface
after subsidence; 6—depression funnel; I—initial water ground level; II—
finite (suggested) ground water level.

где h_n —мощность n -го слоя, h —мощность всей толщи.

На основе полученного решения в этом параграфе и выше была прогнозирована максимальная величина осадки и чаша осадки вследствие понижения уровня грунтовых вод системой вертикальных скважин в районе строительства г. Мхчян Арм. ССР. Отметим, что искусственное водопонижение здесь было предусмотрено в связи с освоением территории для расширения города и озеленения. Расчетная схема приведена на рис. 3.

Максимальная осадка поверхности земли оказалась равной 35,4 см. Чаша прогиба поверхности земли построена из предположения подобия кривых осадки и депрессионной воронки (Герсеванов и Польшин, 1948).

В заключение настоящей статьи хочется отметить, что современный уровень развития теоретической механики грунтов позволяет ре-

шать многие проблемы прогнозирования поверхности земли вследствие откачки подземных вод, месторождений нефти и газа на высоком теоретическом уровне с большой точностью.

Полученные в настоящей статье решения нельзя использовать во всех случаях, так как они соответствуют определенным инженерно-геологическим и гидрогеологическим условиям.

Таблица 1

Значения коэффициента $A(\nu, \alpha, \beta)$

$\nu=0,1$						$\nu=0,2$				
$\beta \backslash \alpha$	00	0,05	0,1	0,2	0,5	00	0,05	0,1	0,2	0,5
0,0	0	—	—	—	—	0	—	—	—	—
0,25	0,084	0,084	—	—	—	0,080	0,080	—	—	—
0,5	0,333	0,333	0,278	0,275	0	0,315	0,315	0,265	0,260	0
0,75	0,675	0,675	0,618	0,317	0,286	0,638	0,638	0,588	0,306	0,276
1,0	1,081	1,081	1,026	0,872	0,687	1,027	1,027	0,977	0,780	0,660
1,25	1,521	1,521	1,475	1,463	1,188	1,448	1,448	1,406	1,394	1,133
1,5	1,995	1,995	1,931	1,829	1,651	1,902	1,902	1,844	1,751	1,577
2,0	2,952	2,952	2,943	2,895	2,620	2,822	2,822	2,804	2,769	2,508
3,0	2,947	2,947	4,838	4,835	4,560	4,695	4,695	4,645	4,641	4,381
5,0	8,667	8,667	8,655	8,583	8,512	8,518	8,518	8,348	8,476	8,204

$\nu=0,3$						$\nu=0,4$				
$\beta \backslash \alpha$	00	0,05	0,1	0,1	0,5	00	0,05	0,1	0,2	0,5
0,0	0	—	—	—	—	0	—	—	—	—
0,25	0,078	0,078	—	—	—	0,067	0,067	—	—	—
0,5	0,292	0,292	0,248	0,241	0	0,264	0,264	0,226	0,219	0
0,75	0,593	0,593	0,549	0,290	0,259	0,538	0,538	0,500	0,266	0,238
1,0	0,956	0,956	0,912	0,741	0,620	0,870	0,870	0,831	0,727	0,293
1,25	1,351	1,351	1,313	1,301	1,059	1,230	1,230	1,198	1,184	0,966
1,5	1,776	1,776	1,725	1,642	1,476	1,619	1,619	1,575	1,501	1,347
2,0	2,643	2,643	2,636	2,594	2,351	2,414	2,414	2,398	2,369	2,150
3,0	4,411	4,411	4,367	4,360	4,119	4,040	4,040	4,002	3,995	3,776
5,0	8,027	8,027	7,878	7,806	7,735	7,372	7,372	7,244	7,175	7,106

ԵՐԿՐԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՆՍՏՄԱՆ ԿԱՆԽԱԳՈՒՇԱԿՈՒՄԸ ՍՏՈՐԵՐԿՐՅԱ
ՋՐԵՐԻ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Դոցենտ, տեխն. գիտ. թեկնածու ԶԱՎԵՆ ՏԵՐ-ՄԱՐՏՐՈՍՅԱՆ՝

Ռ. Լ. Ֆ. Ե. Ր. Մ. Մարդկանց ինժեներական գործունեության ինտենսիվության աճման հետևանքով ներկայումս երկրի ընդերքից արտադրվում են մեծ քանակությամբ ջուր, նավթ ու գազ, նաև կապակցությամբ լիտոսֆերայի վերին շերտերում տեղի են ունենում ֆիզիկական վիճակի փոփոխություններ, խախտվում են մի շարք հավասարակշռված պրոցեսներ (այդ թվում նաև մեխանիկական), որոնք բերում են լարվածային վիճակի փոփոխմանը և վերջին հաջովը երկրի մակերևույթի նստմանը։ Ստորերկրյա հեղուկների արտադրման կապակցությամբ լիտոսֆերայի լարվածային վիճակը կանխագուշակելու համար կարելի է օգտվել բազմաֆազ գրունտների կոնսոլիդացիայի և սողքի տեսություններից։ Հղվածում արվում են մի շարք խնդիրների լուծումը, որոնք անհրաժեշտ են երկրի մակերևույթի նստման նախագուշակման համար ստորերկրյա հեղուկների արտադրման հետևանքով։

¹ Մոսկվայի ինժեներա-շինարարական ինստիտուտի դոցենտ։

EARTH'S SURFACE SUBSIDENCE FORECAST WHEN PUMPING OUT UNDERGROUND WATER

ZAVEN G. TER-MARTIROSYAN, Cand. Sc. (Eng.)¹

Synopsis. At present, huge amounts of underground water, petroleum and gas are being extracted from the depths of the earth following intense activities in engineering. This brings about a sharp change in the physical condition of the upper layers of the lithosphere, disturbs the equilibrium and alters the stress-strain state which leads eventually to subsidence of the earth's surface. The theory of consolidation and creep of multiphase soils can be used to forecast the stress-strain state of rocks due to the pumping out of liquids from the depths of the earth. The paper deals with the solution of a number of problems on the forecast of the subsidence of the earth's surface in this conditions.

ՀԱՐԱՇԱՆՈՒԹՅՈՒՆ — ЛИТЕРАТУРА — REFERENCES

- Арутюнян Н. Х., 1952. Некоторые вопросы теории ползучести. М., Гостехтеориздат.
 Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н., 1961. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов вод для водоснабжения. М., Гостройиздат.
 Герсевич Н. М., Польшин Д. Е., 1948. Теоретические основы механики грунтов. М., Гостройиздат.
 Гармонов И. В., Коноплянец А. А. и Котлов Ф. В., 1965. Оседание земной поверхности в связи с интенсивной откачкой подземных вод, эксплуатацией месторождений нефти и газа. ОНТИ ВНИИ, вып. 17, № 1, М.
 Зарецкий Ю. К., 1967. Теория консолидации грунтов. М., «Наука».
 Лейбензон А. С., 1947. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М., Гостехиздат.
 Скабаланович И. А., 1960. Гидрогеологические расчеты. М.
 Тер-Мартirosyan З. Г., Цытович Н. А., 1965. О вторичной консолидации глин. Ж. «Основания, фундаменты и механика грунтов», № 5, М.
 Тер-Степанян Г. И., 1967. Ближайшие задачи геомеханики. Проблемы геомеханики, Ереван, 1:1 — 15.
 Флорин В. А., 1961. Основы механики грунтов, т. II. М. — Л., Стройиздат.
 Цытович Н. А., Зарецкий Ю. К., Малышев М. В., Абелев М. Ю. и Тер-Мартirosyan З. Г., 1967. Прогноз скорости осадков оснований сооружений. М., Гостройиздат.
 Цытович Н. А., 1963. Механика грунтов. М., Гостройиздат.
 Цытович Н. А., 1971. О геомеханике. «Основания, фундаменты и механика грунтов», № 5.
 Mindlin R. and Cheng P., 1950. Nuclei of strain in semi-Infinite solid. Journal of Applied Physics, vol. 21, № 9.
 Ter-Martirosyan Z. and Ferronsky V., 1969., Some problems of time-soil compaction in pumping liquid from a bee. Proceedings of III Symposium on Land Subsidence, Internat. Hydrolog. Decade, UNESCO, Tokyo.
 Tsytoich N., Ter-Martirosyan Z. and Kulkarni K., 1971. Certain problems in consolidation of clay soils vertical and horizontal drainage under condition of equal deformation. Proceedings IV ARCSME, Bangkok, Thailand, Vol. 1, p. 81—86.

¹ Associate Professor of the Moscow Institute of Civil Engineering.