А.М.ШКУРКО
Санкт-Петербургский горный институт,
Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БУРЕНИЯ СКВАЖИН ВО ЛЬДУ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗГРУЖАЮЩЕЙ ЩЕЛИ

Устойчивость стенок скважин, пройденных в горном массиве, зависит от напряженного состояния пород, их физико-механических и реологических характеристик, технологии проводки скважины. Потеря устойчивости ствола является причиной целого ряда тяжелых осложнений и аварий в скважинах.

При решении задачи устойчивости стенок ствола скважины, пробуренной в ледовом массиве, сделана попытка учесть все основные факторы, влияющие на процесс деформирования ствола и при этом получить математическое описание последнего, удобное для практического использования в инженерных расчетах.

Для решения задачи рассмотрим скважину радиуса R_0, глубиной H. Учитывая симметричность скважины,будем решать одномерную задачу. Для этого начало координат совместим с устьем скважины, ось z направим вдоль оси скважины к забою.

Учитывая, что лед является упругопластической средой, обладающей свойствами ползучести, включает упругую деформацию ε_e и вязкоупругую ε_{el}: $\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_{el}$, выбор базового упругого или упруговязкого решения задачи определяется предельной глубиной упругих деформаций [1]. При $\varphi = 0$ и $\varphi \neq 0$ соответственно

$$H_e = k/\gamma \quad \text{и} \quad H_e = \frac{k\cos\varphi}{\gamma(1-\sin\varphi)},$$

где φ – угол внутреннего трения, град.; H_e – предельная глубина упругих деформаций, м; k – сцепление, Па; γ – удельный объемный вес среды, Н/м^3.

При глубине $z \le H_e$ радиальные составляющие смещения стенок скважины могут быть определены по формуле С. Г. Лехницкого [4]

$$u_r = \frac{R_0}{2G}\gamma z,$$

где u_r – смещение стенок скважины, м; R_0 – начальный радиус скважины, м; z – текущая глубина скважины, м; G – модуль упругости при сдвиге, Па.

Воспользовавшись известным в теории упругости и пластичности правилом А.Надаи [6], когда упругое решение идентично вязкому решению, если перемещения u, v, w заменить на скорости перемещений du/dt, dv/dt, dw/dt, а модуль сдвига G на коэффициент вязкости μ, имеем

$$du/dt = R\gamma z/2\mu,$$

где μ – коэффициент вязкости, Па·с; t – время, с.

За время dt радиус скважины уменьшается на

$$dR = -du = -\frac{\gamma R z}{2\mu}dt,$$

откуда

$$R(t) = R_0 e^{-\frac{\gamma z}{2\mu}t}.$$

Полученная зависимость радиуса скважины от глубины, удельного объемного веса льда, времени и вязкости (реологических свойств льда) характеризует поведение скважины в зоне упругих деформаций.

При $z > H_e$ вокруг скважины образуется область неупругих деформаций. При $\varphi = 0$ радиальное перемещение в массиве определяется выражением

$$u_r = \frac{kR}{2G}\exp\left(\frac{\gamma z}{k} - 1\right).$$

Для льда φ = 0,001÷0,0001°, поэтому им можно пренебречь и считать $\varphi = 0$.

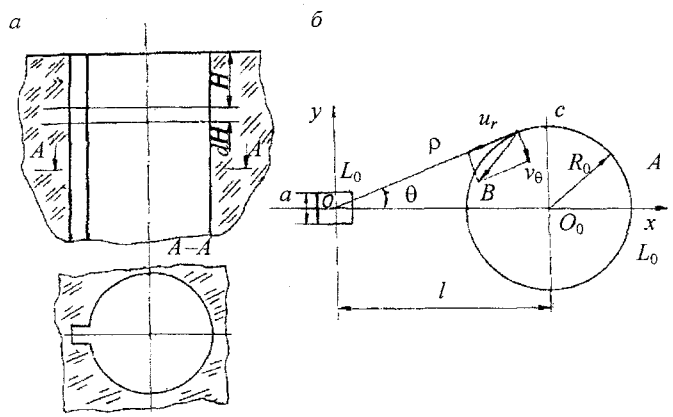
Преобразовав упругое решение по правилу А.Надаи в вязкое, имеем

$$\frac{du}{dt} = \frac{kR}{2\mu k}\exp(\gamma z - 1).$$

Проинтегрировав с учетом, что $dR = -du$, и проделав ряд преобразований, получим

$$R(t) = R_0 \exp\left(-\frac{\gamma^2 z^2 + k^2}{4\mu k}\right)t.$$

Решив данное уравнение относительно времени t, имеем



Сопряженные выработки круглого и квадратного сечений (*а*) и схема к расчету перемещений (*б*)

$$t = \frac{4\mu k}{\gamma^2 z^2 + k^2}(\ln R(t) - \ln R_0).$$

Таким образом, задаваясь временем проходки, можем определить минимальный допустимый радиус для безаварийной проходки скважины и, наоборот, задаваясь $R(t)$, можем определить время безаварийного сооружения скважины.

Расчетный анализ зависимости показывает хорошее совпадение полученных результатов с практическими замерами диаметра скважины 1-2бис, полученными методами кавернометрии на ст. Восток в течение 7 лет. Разброс фактических данных от расчетных не превышает погрешности замеров каверномера ±3 мм.

С целью борьбы с заплыванием ствола предлагается щелевой способ защиты скважин. Для упрощения решения задачи о деформации ствола скважины будем считать, что вдоль стенки скважины на всю ее глубину параллельно оси пройдена разгрузочная выработка квадратного сечения (см. рисунок, *а*). Ограничимся упругим решением задачи о напряженно-деформированном состоянии горного массива, ослабленного скважиной и разгружающей щелью. Полученные результаты позволяют перейти к упруговязкопластическим решениям по правилу А.Надаи [6].

В качестве критерия, характеризующего конвергенцию контуров выработок, введем коэффициент затекания $k_з$, равный отношению площади затекания ΔS к первоначальной площади выработки S_0:

$$k_э = \Delta S / S_0 .$$

Для решения задачи воспользуемся методом Колосова – Мусхелишвили [2, 5] – применения комплексной переменной в плоской задаче теории упругости, а также принципом суперпозиции и методом комформных отображений [1-3], которые широко используются в теории упругости при решении задач о распределении напряжений в упругой плоскости, ослабленной двумя выработками разных сечений, а затем упругое решение преобразуем в вязкоупругое.

Рассмотрим упругий изотопный массив с двумя вертикальными выработками круглого и квадратного сечений (см. рисунок). Примем $R_0 = 3{,}5a$ (где R_0 – радиус скважины, м; a – сторона квадратной выработки, м). Задача о напряженном состоянии такого массива приводится к плоской задаче теории упругости для бесконечной области с двумя концентраторами напряжений, когда на бесконечности действуют сжимающие усилия $q = \gamma H$ и $p = \lambda q$ (где γ – удельный объемный вес льда, Н/м^3; H – глубина выработки, м; λ – коэффициент бокового распора в массиве породы). Контуры отверстий обозначим через L_0 – круглого сечения и L_1 – квадратного, расстояние между центрами симметрии выработок l. Система координат показана на рисунке,*б*. Ось z направлена вдоль оси симметрии квадратной выработки в сторону забоя.

Целью нашего исследования является нахождение векторов перемещений на контуре сопряженных выработок u_r и v_θ.

Для определения компонент вектора перемещений в прямоугольной системе координат воспользуемся формулой Колосова [2]

$$2G(u_x + iv_y) = \chi\varphi(z) - z\overline{\varphi}'(z) - \overline{\psi}(z), \qquad (1)$$

где $\chi = 3 \div 4\nu$ – коэффициент плоской деформации; ν – коэффициент Пуассона; u_x и v_y – компоненты вектора перемещений, м; $\varphi(z)$, $\psi(z)$ – комплексные функции, удовлетворяющие граничному условию

$$\varphi(z) + z\overline{\varphi}'(z) + \overline{\psi}(z) = \frac{p+q}{2} z + \frac{q-p}{2} \overline{z}\,; \tag{2}$$

p и q – горизонтальная и вертикальная составляющие горного давления, Па.

В полярных координатах уравнение (1) с учетом (2) преобразуется к виду

$$2G(u_r + iv_\theta) = qR_1 e^{-i\theta}\left\{-\frac{\rho e^{i\theta} - l}{2R_0} + \frac{3}{7}\frac{R_0}{\rho e^{i\theta} - l} - \frac{R_0^3}{4(\rho e^{i\theta} - l)^3} - \rho e^{i\theta}\left[-\frac{1}{2R_0} + \frac{3}{7}\frac{R_0}{(\rho e^{-i\theta} - l)^2} + \right.\right.$$

$$\left. + \frac{3}{4}\frac{R_0^3}{(\rho e^{i\theta} - l)^4}\right] - \frac{3}{7}\frac{\rho e^{i\theta} - l}{R_0} - \frac{3}{2}\frac{R_0}{\rho e^{i\theta} - l} + \frac{R_0^4}{2(\rho e^{i\theta} - l)^4 + R_0^4}\left[\frac{4}{21}\frac{\rho e^{i\theta} - l}{R_0} - \frac{5}{4}\frac{(\rho e^{i\theta} - l)^3}{R_0^3} + \right.$$

$$\left.\left. + \frac{6}{7}\frac{(\rho e^{i\theta} - l)^5}{R_0^5} + \frac{1}{6}\frac{(\rho e^{i\theta} - l)^7}{R_0^7} + \frac{3}{2}\frac{R_0}{\rho e^{i\theta} - l} + \frac{1}{12}\frac{R_0}{(\rho e^{i\theta} - l)^3}\right]\right\}.$$

Определим перемещения контура L_0 в точках A и C при $l = R_0 + 0{,}5a$: в точке A

$$u_r = -\frac{4{,}5}{2G} qR_1 = -\frac{0{,}77}{2G} qR_0\,; \quad v_\theta = 0\,;$$

в точке C

$$u_r = 0{,}15\frac{qR_0}{2G}\,; \quad v_\theta = -0{,}22\frac{qR_0}{2G}\,.$$

Вектор перемещения в точке C будет иметь модуль

$$\left|\overline{U}\right|_c = 0{,}27qR_0 / 2G\,.$$

Напомним, что для одиночной скважины круглого сечения

$$u_r = \frac{qR_0}{2G}\,; \quad v_\theta = 0\,.$$

Тогда коэффициенты затекания для одиночной скважины и скважины, сопряженной со щелью, соответственно

$$k_з' = \frac{q}{G}\left(1 - 0{,}25\frac{q}{G}\right)$$

$$k_з'' = \frac{q}{G}\left(0{,}655 - 0{,}104\frac{q}{G}\right). \tag{3}$$

С учетом реальных глубин бурения имеет место условие $q << G$, поэтому вторым слагаемым можно пренебречь ($G = 3{,}4 \div 3{,}8 \cdot 10^9$ Па, $q = 3{,}6 \cdot 10^6$ Па при $h = 4000$ м), тогда

$$k_з' = \frac{q}{G} \quad \text{и} \quad k_з'' = 0{,}655\frac{q}{G}\,. \tag{4}$$

Сравнивая $k_з'$ и $k_з''$, видим, что при наличии разгружающей щели упругое деформирование сечения скважины уменьшается почти на 34 %.

Преобразовав уравнения (3) и (4) по правилу А.Надаи, получим коэффициенты затекания для упруговязкопластичной среды:

$$k_з' = \frac{qt}{\mu}(1 - 0{,}25\frac{qt}{\mu});$$

$$k_{з(t)}'' = \frac{qt}{\mu}(0{,}655 - 0{,}104\frac{qt}{\mu}).$$

Расчетный анализ коэффициента $k_з$ во времени показывает, что скважина на глубине 1000 м без щели, например, полностью затечет через 14,1 года, а со щелью – через 22,1 года. На глубине 500 м – соответственно через 27,7 года и 50,5 лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982. 272 с.
2. *Колосов Г.В.* Применение комплексной переменной в плоской задаче теории упругости. Л.: ОНТИ, 1935.
3. *Корн Г.* Справочник по математике / Г.Корн, Т.Корн. М.: Наука, 1970. 720 с.
4. *Лехницкий С.Г.* Определение напряжений в упругом изотропном массиве вблизи вертикальной цилиндрической выработки кругового сечения // ИЗО АН СССР ОТН. 1938. № 7. С. 69-76.
5. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.
6. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир, 1969, Т.2. 863 с.