УДК 622.0:622.02

Л.К.ГОРШКОВ, В.Г.ГОРЕЛИКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ ПОРОД В СТЕНКАХ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН

Устойчивость вязкопластичных пород (глин, солей, льда) в стенках глубоких скважин может быть оценена на основе теории старения (установившейся ползучести), для чего предлагается проверенная на практике методика определения напряжений на контуре сечения ствола скважины, радиальных перемещений точек этого контура и их скорости.

The competence of viscoplastic rocks (clay, salt, ice) in the walls of deep boreholes can be estimated in terms of aging theory (stationary creep), and field – proven method is offered for the stressing calculation of configuration of excavated dimension of borehole; the radial motion of these points and its speed.

Вязкопластичная порода представляет собой тело, способное накапливать как не исчезающую (остаточную) мгновенную деформацию при разгрузке, так и деформацию во времени при постоянном напряжении или снижать напряжение во времени при постоянной деформации (глина, соль, лед).

Напряженное состояние таких пород на контуре сечения скважины может быть оценено при следующих допущениях.

Начальное (до бурения) напряженное состояние массива определяется боковым $\sigma_r^0, \sigma_\theta^0 = -\lambda\Delta P_г$ и осевым $\sigma_{z1}^0 = -\Delta P_г$ напряжением, где $P_г$ – гравитационная сила, $P_г = \rho_п g z$; $\rho_п$ – плотность пород; z – текущая глубина скважины; g – ускорение силы тяжести. При этом

$$\Delta P_r = \rho_п g z - P_п,$$

где $P_п$ – поровое давление в породе; λ – коэффициент бокового обжатия, $\lambda = \mu/(1-\mu)$; μ – коэффициент Пуассона.

В начальный момент бурения в горизонтальных направлениях имеем нулевое смещение контура сечения, т.е. $u_r = v_\theta = 0$, где u_r и v_θ – смещения в радиальном и тангенциальном направлении.

Скважина представляется бесконечной круглой вертикальной цилиндрической выработкой, заполненной жидкостью с плотностью $\rho_ж$.

Решение задачи об устойчивости скважины в вязкопластичном массиве может быть получено на базе теории старения (установившейся ползучести горного массива [3]), согласно которой выражения для напряжений в полярной системе координат имеют вид

$$\sigma_r = -\Delta P_c - (\lambda\Delta P_r - \Delta P_c)\left[1 - \left(\frac{R_c}{r}\right)^{2m}\right];$$
$$\sigma_\theta = -\Delta P_c - (\lambda\Delta P_r - \Delta P_c)\left[1 + (2m-1)\left(\frac{R_c}{r}\right)^{2m}\right], \quad (1)$$

где σ_r – нормальное напряжение в массиве на контуре сечения скважины в радиальном направлении; σ_θ – нормальное напряжение в тангенциальном направлении; ΔP_c – необходимый перепад давления буровой жидкости в скважине; R_c – радиус скважины; r – текущее значение радиуса; m – безразмерный параметр, определяющий вид изохронной кривой согласно теории старения.

В этом случае радиальное перемещение стенок скважины под действием напряжений σ_r и σ_θ будет зависеть от времени:

Таблица 1

Параметры процесса ползучести и результаты расчетов потребного давления в скважине для предотвращения ее заплывания в вязкопластичных массивах

Порода, μ	Плотность породы $\rho_п$, кг/м^3	Плотность буровой жидкости $\rho_ж$, кг/м^3	Глубина скважины, м	Время выдержки открытого ствола T, ч	Допускаемая радиальная деформация $[\varepsilon]_r$	Параметры процесса ползучести					$P_г$, МПа	$P_с$, МПа
						K, МПа	λ	m	δ, ч$^{-n}$	n		
Каменная соль μ ≈ 0,5*	2500	1225	4000	80	0,05	$1{,}5\cdot10^3$	1	0,9	0,15	0,25	100	49
Лед (ст. Восток, Антарктида), μ ≈ 0,28	960	920	3600**	80	0,02	$0{,}8\cdot10^3$	0,5	0,3	0,09	0,2	35	28

* Для маломощных пластов.
** При бурении электромеханическим снарядом на кабеле.

Таблица 2

Скорость заплывания скважины 5Г

Глубина, м	Диаметр скважины, мм		$\varepsilon_r \cdot 10^{-5}$	Время выдержки открытого ствола, ч	Скорость ползучести льда, мм/ч		Параметр B, МПа
	начальный	конечный			расчетная по формуле (4)	измеряемая	
952	183	175	16,4	63	0,17	0,162	3,4
2200	152	102	15,9	35	0,30	0,291	3,0
2500	139	86	15,0	24	0,44	0,435	2,5
3500	137	60	14,6	19	0,55	0,528	2,1

$$u_r = \frac{R_c}{2}\left[\frac{m}{K}(\lambda\Delta P_r - \Delta P_c)(1+\delta t^n)\right]^{\frac{1}{m}}, \quad (2)$$

где K – параметр процесса ползучести, имеющий размерность напряжения и по своей физической сущности идентичный объемному модулю пластичности; δ, n – другие параметры, определяющие вид изохронной кривой (δ – размерная величина, ч$^{-n}$).

Тогда критерием устойчивости стенок в контуре сечения скважины может быть неравенство вида

$$P_c \geq P_п + \lambda\Delta P_c - \frac{K}{m}\frac{(2[\varepsilon]_r)^m}{1+\delta T^n}, \quad (3)$$

где P_c – необходимое давление в скважине, обеспечиваемое столбом буровой жидкости в скважине заданной плотности $\rho_ж$; T – время выдержки ствола скважины от момента окончания бурения в данном интервале глубин до крепления скважины обсадными трубами; $[\varepsilon]_r$ – допускаемое значение поперечной деформации стенок скважины, определяемое технологическими особенностями бурения.

Расчеты по условию (3) с учетом данных, полученных по выражениям (1) и (2), а также необходимые для расчетов параметры процесса ползучести, приведены в табл.1, для построения которой привлечены данные производственного бурения на соляных куполах [1, 3] и бурения глубокой скважины во льдах на ст. Восток [2, 4].

Для проверки корректности предлагаемой методики были проведены замеры скорости заплывания глубокой скважины на ст. Восток на различных глубинах: 952, 2200, 2500 и 3500 м при температуре льда от –50 до –5 °С (скважина 5Г) [3]. Замеренные данные по скоростям заплывания скважины 5Г сравнивались (табл.2) с расчетными данными, полученными из выражения для скорости радиальных смещений точек контура сечения скважины:

$$v_r = \frac{R_c\varepsilon_r m}{2}\left(\frac{\lambda\Delta P_г - \Delta P_c}{B}\right), \quad (4)$$

где ε_r – относительная поперечная деформация; B – параметр, имеющий размерность напряжения и идентичный прочности льда при сдвиге.

Как следует из табл.2, расчетные и измеренные данные близки по величине (ошибка не более 4-5 %), что свидетельствует о корректности формулы (4) и всей методики в целом, так как формула (4) является логическим продолжением приведенной методики: выражений (1)-(3).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Войтенко В.С.* Управление горным давлением при бурении скважин. М.: Недра, 1985.

2. *Горшков Л.К.* Предупреждение конвергенции ствола скважины при бурении в мощных ледовых отложениях / Л.К.Горшков, Н.И.Слюсарев // Экология и развитие общества / МАНЭБ. СПб, 2003. С.46-50.

3. *Рабинович Н.Р.* Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. М.: Недра, 1989.

4. Теория и практика бурения – протаивания в Антарктиде / Б.Б.Кудряшов, Н.Е.Бобин, Н.И.Слюсарев и др. // Материалы гляциологических исследований. М., 1973. Вып.22. С.71-77.