Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXXVI, 1981 г.

УДК 622.245.3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТВОЛА ГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ В ЛЕДОВОМ МАССИВЕ

В.М.ПАШКЕВИЧ, В.К.ЧИСТЯКОВ

Одной из проблем глубокого бурения является сохранение устойчивости горных пород, слагающих стенки скважины, как непосредственно в процессе проходки, так и при проведении последующих исследований и работ. Трудности обеспечения устойчивости ствола обостряются с увеличением глубины бурения и интенсивности проявления реологических свойств пород в условиях возрастающих давлений и температур. Этим вопросам в последнее время уделяется все большее внимание [2, 4].

Явление „текучести" отмечено для всех пород, даже для таких, как граниты, вскрытые сверхглубокими скважинами [4]. В скальных породах явление „текучести" затухает во времени по мере деформационного упрочнения породы в стенках скважины. В пластичных породах (глина, каменная соль и др.) это явление развивается существенно дольше, пластические деформации распространяются на окружающую ствол зону пород значительно бо́льшего радиуса. Особенно сильно „текучесть" проявляется при вскрытии скважиной ледовых толщ.

Накопленный, главным образом советскими исследователями, опыт „сухого" (без применения заливочных жидкостей) бурения скважин во льдах [2, 8] показывает, что даже в исключительно низкотемпературном леднике Центральной Антарктиды (-57 °С у поверхности) уже с глубин порядка 500 м наблюдается постепенное сужение ствола скважины. С каждым последующим рейсом закономерно возрастают затраты времени на дохождение до забоя. Даже после непродолжительных перерывов в бурении (двое-трое суток) требуется разбурка призабойного интервала скважины. Сужение ствола, помимо нерациональных затрат времени, энергии и труда на его проработку, может вызывать серьезные осложнения и даже аварии. До настоящего времени рекордной остается „сухая" скважина глубиной 952,5 м, пройденная в 1972 г.

на советской внутриконтинентальной антарктической станции Восток. В более теплых ледниках, например, Гренландии или Северной Земли, сужение ствола резко сказывается уже в процессе бурения первых сотен метров глубины.

В настоящее время в ЛГИ ведутся исследования и разработки по применению низкотемпературных незамерзающих заливочных жидкостей для создания гидростатического противодавления в стволе скважины как единственного пока реального технологического средства преодоления 1000-метрового рубежа глубин и достижения подледниковых пород в Центральной Антарктиде, где мощность ледовой толщи достигает 3,5–4 тыс.м.

Для решения целого ряда конкретных технических, технологических и организационных вопросов, связанных с реализацией проекта глубокого (до породного ложа) бурения в Центральной Антарктиде существенно важное значение имеет выявление закономерностей деформации стенок скважины, пройденной в ледниковом массиве, и количественная оценка совместного влияния на этот процесс основных определяющих его параметров (начального диаметра и глубины скважины, вязкостных свойств и температуры льда, величины гидростатического противодавления и времени).

В общем случае процесс деформации стенок скважины, пробуренной в ледяном массиве, происходит под действием силы тяжести и характеризуется вязкостными свойствами льда, которые проявляются в виде его способности к медленному „ползучему" течению при любой отличной от нуля нагрузке [6].

Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что скорость течения льда зависит от его температуры и структуры, а также от величины приложенной силы. Характер этой зависимости наиболее часто определяется следующим нелинейным законом [1, 3]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A\tau^{\alpha}, \qquad (1)$$

где $\frac{d\varepsilon}{dt}$ – скорость относительной деформации сдвига; τ – напряжение сдвига; A и α – параметры, зависящие от температуры и структуры льда.

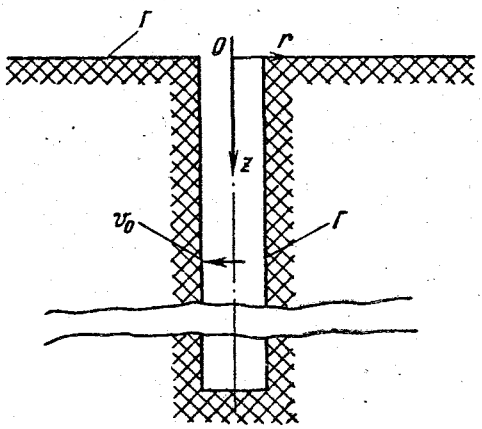


Рис.1. Схематический разрез скважины, пробуренной в ледниковом массиве

Для поликристаллического льда существуют два характерных значения напряжения сдвига, с помощью которых можно выделить три стадии течения льда [7]. Первое значение напряжения τ_f имеет очень малую величину и определяет область, в пределах которой скорость течения льда пренебрежимо мала. Второе значение напряжения τ_s характеризует область течения льда примерно с постоянной скоростью, для описания которой может быть использован линейный закон Ньютона с постоянной вязкостью, т.е. $A = const$ и $\alpha \neq 1$.

При напряжениях, превышающих τ_s, течение развивается с возрас-

ЛГИ Библиотека

102096

тающей скоростью и описывается нелинейным законом.

Рассматривая процесс деформации стенок скважины в ледяном массиве как течение вязкой несжимаемой жидкости при малых числах Рейнольдса и пренебрегая инерционными членами в общих уравнениях механики сплошных сред [7], получим систему уравнений ползущего течения или уравнений Стокса [5]:

$$\begin{aligned} \nabla \vec{\vec{P}} + \rho \vec{g} &= 0, \\ \nabla \vec{v} &= 0, \end{aligned} \tag{2}$$

где ∇ - дифференциальный оператор градиента; $\vec{\vec{P}}$ - тензор напряжений; ρ - плотность льда; $\vec{g}$ - ускорение свободного падения; $\vec{v}$ - вектор скорости.

Тензор напряжений представим в виде

$$\vec{\vec{P}} = -p\vec{\vec{I}} + \vec{\vec{\tau}}, \tag{3}$$

где p - давление; $\vec{\vec{I}}$ - единичный тензор; $\vec{\vec{\tau}}$ - тензор сдвиговых напряжений.

Введем цилиндрическую систему координат (r, φ, z), начало которой расположим на устье скважины, а ось z направим вдоль оси скважины (рис.I).

В силу осевой симметрии течения льда для скважины

$$v_\varphi = \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} = \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} = \frac{\partial P}{\partial \varphi} = 0,$$

а тензор напряжений в цилиндрическом теле вращения имеет четыре составляющих, из которых τ_{rr}, $\tau_{\varphi\varphi}$ и τ_{zz} - нормальные, а τ_{rz} - касательное.

Тогда на границе Γ при $r = R$ и $0 < z < H$,

$$\vec{P}_n = -p\vec{n} + \tau_{rr}\vec{n} = -g\rho_{\text{Ж}} z\vec{n}, \tag{4}$$

$$\vec{P}_\tau = \vec{\varepsilon}\tau_{zr} = 0, \tag{5}$$

где $\vec{P}$ - вектор напряжений; $\vec{n}$ - внутренняя нормаль.

Можно показать, что для квазилинейной реологической модели течения льда тензор напряжений $\vec{\vec{\tau}}$ является функцией второго инварианта тензора скоростей $\vec{\vec{v}}$ и для случая деформации стенок скважины с учетом выражения (I) эту зависимость можно представить в виде [7]

$$\vec{\vec{\tau}} = 2\mu\vec{\vec{v}}, \tag{6}$$

где

$$\mu = \frac{B}{2^{\frac{\beta+1}{2}}}\left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{v_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2\right]^{\frac{\beta-1}{2}}, \tag{7}$$

$$B = A^{-\frac{1}{\alpha}}, \quad \beta = \frac{1}{\alpha}.$$

Тогда, в соответствии с выражением (6), можно записать

$$\tau_{rr} = 2\mu\frac{\partial v_r}{\partial r} \tag{8}$$

и

$$\tau_{zr} = \mu\left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right) = 0 . \qquad (9)$$

Окончательно на границе Γ выражение для давления на стенки скважины с учетом соотношений (8) и (9) получим в следующем виде:

$$P = \frac{2B}{2^{\frac{\beta+1}{2}}}\left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{v_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2\right]^{\frac{\beta-1}{2}} \frac{\partial v_r}{\partial r} + g\rho_{\text{ж}} z . \qquad (10)$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{v_r}{r} - \frac{\partial v_z}{\partial z} . \qquad (11)$$

Исследования задачи (10)-(11) в линейной постановке ($\mu = const$) показали, что на стенках скважины при $H/R \gg 1$ $\frac{\partial v_z}{\partial z} \ll \left|\frac{v_r}{r}\right|$. Кроме того, для мощных ледниковых покровов справедливо предположение о гидростатическом распределении давления льда на больших глубинах [1], т.е.

$$P\big|_{r=R} \simeq g\rho z . \qquad (12)$$

Таким образом, подставляя в уравнение (10) выражения (11) и (12), с учетом сделанного выше предположения получим

$$g(\rho - \rho_{\text{ж}})z \approx -B\frac{v_r}{R}\left|\frac{v_r}{R}\right|^{\beta-1} . \qquad (13)$$

Отсюда скорость деформации стенок скважины при $r = R$ составит

$$v_r\big|_{r=R} = -R\left[\frac{g(\rho-\rho_{\text{ж}})z}{B}\right]^{\frac{1}{\beta}} , \qquad (14)$$

или

$$v_r\big|_{r=R} = -R A\left[g(\rho-\rho_{\text{ж}})z\right]^{\alpha} . \qquad (15)$$

Так как $v_r\big|_{r=R} = \frac{dR}{dt}$, то, обозначая через R_0 значение радиуса скважины в начальный момент времени, запишем уравнение (15) в следующем виде:

$$\frac{dR}{dt} = -RA\left[g(\rho-\rho_{\text{ж}})z\right]^{\alpha} , \qquad (16)$$
$$R\big|_{t=0} = R_0 .$$

Отсюда решением уравнения (16) будет выражение

$$R = R_0 e^{-A[g(\rho-\rho_{\text{ж}})z]^{\alpha}t} . \qquad (17)$$

Для вычислений по формуле (17) необходимы данные о значениях параметров A и α, которые могут быть получены экспериментально, например, при изучении скорости сужения ствола скважины по данным ее кавернометрии или деформометрии.

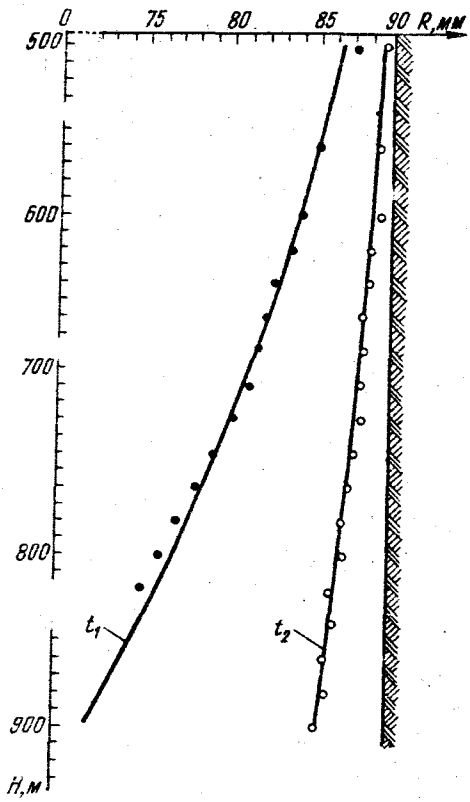


Рис.2. Сопоставление изменения во времени значений радиуса скважины 1-2-бис, измеренных методом кавернометрии и рассчитанных по формуле (17) для значений $t_1 = 6{,}2 \cdot 10^6$ с; $t_2 = 18{,}5 \cdot 10^6$ с

Так, при обработке результатов кавернометрии, проведенной в период с 13 февраля по 14 сентября 1974 г. в "сухой" (не залитой жидкостью) скважине 1-2-бис, пробуренной тепловым способом на внутриконтинентальной станции Восток в Антарктиде, для интервала 500-900 м были получены следующие значения постоянных коэффициентов для выражения (17): $A = 1{,}5 \div 2{,}5 \cdot 10^{-14}$, $\alpha = 3{,}0$.

На рис.2 представлены зависимости изменения диаметра скважины 1-2-бис, рассчитанные по формуле (17) с учетом конкретных значений входящих в нее параметров для условий ледникового покрова в районе станции Восток. Точками отмечены фактические величины изменения диаметра скважины по данным кавернометрии. Разброс фактических данных от расчетных почти везде находится в пределах погрешности кавернометрии и не превышает ± 3 мм.

Следует отметить, что в указанном интервале температура ледникового массива изменяется незначительно (от -53 до -50 °С), а поэтому ее влияние на характер деформации стенок скважины не имеет большого значения.

Для прогнозирования величины и скорости сужения ствола скважины на больших глубинах, где перепад температур может достигнуть нескольких десятков градусов, необходимо экспериментально оценить влияние температурного фактора на изменение коэффициентов A и α.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вялов С.С. Вязко-пластическое течение ледниковых покровов и закономерности деформирования льда. - В кн.: Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. М., изд-во АН СССР, № 4, 1961.

2. Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Бобин Н.Е. Бурение скважин тепловым способом в ледниковом покрове Антарктиды. М., ОНТИ ВИЭМС, 1977.

3. Патерсон У.С.Б. Физика ледников. М., Мир, 1972.

4. Сейд-Рэа М.К. Устойчивость горных пород при бурении скважин на большие глубины. М., Недра, 1972.

5. Хаппель Дж., Бренер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М., Мир, 1976.

6. Шумский П.А. Динамическая гляциология. М., Гидрометеоиздат, 1968.

7. Шумский П.А. О законе течения поликристаллического льда. - Научн. тр. ин-та механики МГУ, М., 1975, № 42.

8. Korotkevich Ye.S., Kudryashov B.B. Ice-Core Drilling, University of Nebraska Press, 1976.