

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПРЕДЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ СКВАЖИНЫ****Н. У. Алиев, д.х.н., М. А. Баймухаметов, к.т.н., Р. Ш. Ягудеев****Казахский национальный технический университет  
им. К. И. Сатпаева**

Каверна түзілу құбылысы зерттелген. Ұңғыманың каверна түзіле бастайтын тереңдік шегі анықталған.

**Түйінді сөздер:** ұңғыма тереңдігі, каверна даму үрдісі, каверна түзілу.

Research on the phenomenon of formation of cavities was conducted. We got the maximum depth of a chink on which development process of cavities begins.

**Key words:** depth of a chink, development process of cavities, formation of cavities.

Под действием горного давления и давления бурового раствора в результате обменных процессов, происходящих на поверхности стенок, химического и термического взаимодействий ствол скважины может подвергаться различным необратимым деформациям: кавернообразованию, обвалам и осыпям, трещинообразованию, сужению ствола, образованию грифонов и т. д. В катастрофических случаях вследствие нарушения стенок скважины она может прекратить существование. Как правило, эти процессы развиваются тем интенсивнее, чем больше глубина скважины. Разумеется, многое зависит от свойств горных пород и промывочного раствора. Постоянный рост средней глубины разведочных и эксплуатационных скважин, планы строительства сверхглубоких и наклонно-направленных скважин делают особенно актуальной разработку теоретических аспектов проблемы устойчивости стенок глубоких скважин.

Важнейший фактор в таких условиях – горное давление от вышележащих пород. Поэтому определение предельной глубины является актуальной задачей.

Полученные ранее результаты позволяют дать следующую картину развития каверн из начальных скважин. В данной постановке задачи аналогом времени будет глубина скважины  $H$  – параметр нагружения. При заданных параметрах  $\sigma_c, \eta, \delta, \nu, \rho g, \rho_n g$  процесс развития каверн определяется величиной  $H$ . Рассмотрим этот процесс.

Напряженное состояние на стенках «равнопрочной» скважины равно [1, 2]:

$$\sigma_n = -p; \sigma_t = -2\eta q + p; \sigma_z = -q, \quad (1)$$

где  $(2\eta - \delta)q = \sigma_c + p(1 + \delta)$  при  $2\eta q - p \geq q \geq p$ ;

$$(1 - 2\eta q)q = \sigma_c \text{ при } q \geq 2\eta q - p \geq p \quad (2)$$

Здесь через  $q$  обозначено невозмущенное вертикальное горное давление, а через  $\eta q$  – невозмущенное боковое горное давление; коэффициент бокового распора  $\eta$  в зависимости от геотектонических условий может быть как меньше, так и больше единицы.

При этом напряженное состояние на стенке полости будет иметь вид [1, 2]:

$$\sigma_n = \sigma_t = -p; \sigma_z = -q + 2\nu(\eta q - p), \quad (3)$$

причем при  $q(1 - 2\nu\eta) > p(1 - 2\nu)$

$$q(1 - 2\nu\eta) + 2p(\nu - \delta) = \sigma_c. \quad (4)$$

Поэтому возможны следующие 3 варианта разрушения:

вариант I  $(2\eta - \delta)\rho g H - (1 + \delta)(\rho_n g H + p_a) = \sigma_c;$  (5)

вариант II  $(1 - 2\eta\delta)\rho g H = \sigma_c;$  (6)

вариант II  $(1 - 2\nu\eta)\rho g H + 2(\nu - \delta)(\rho_n g H + p_a) = \sigma_c$   
 $(q = \rho g H, p = \rho_n g H + p_a).$  (7)

где  $p_a$  – добавочное давление бурового раствора.

Этим вариантам разрушения отвечают следующие значения глубины  $H$ :

$$H_I = \frac{\sigma_c + p_a(1 + \delta)}{\rho g(2\eta - \delta) - \rho_n g(1 + \delta)}; \quad (8)$$

$$H_{II} = \frac{\sigma_c}{\rho g(1 - 2\eta\delta)}; \quad (9)$$

$$H_{III} = \frac{\sigma_c - 2p_a(v - \delta)}{\rho g(1 - 2v\eta) + 2\rho_n g(v - \delta)}. \quad (10)$$

Физический смысл имеют лишь положительные значения  $H$ . Поэтому при отрицательном значении  $H_I$ ,  $H_{II}$  или  $H_{III}$  соответствующий вариант разрушения не реализуется.

Образование каверны начинается с глубины  $H=H^*$ , равной

$$H^* = \min(H_I, H_{II}). \quad (11)$$

В процессе развития при  $H=H^*$  каверна из начальной круговой формы проходит через множество непрерывно изменяемых и локально-неустойчивых равновесных форм. Скорость развития каверны на этом этапе определяется скоростью вымывания разрушенных частиц буровой жидкостью. В настоящей постановке задачи эту скорость можно считать бесконечно большой. При больших отклонениях от начальной круговой формы неустойчивые равновесные формы с бесконечными становятся нереальными вследствие наличия больших зон самопересечения. Естественно предположить, что конечным этапом развития каверны при  $H=H^*$  будут локально-устойчивые равновесные формы с точками возврата. Очевидно, этот этап будет устойчивым и равновесным в целом, если  $H_{III} > H^* = \min(H_I, H_{II})$ . При этом система придет в одно из устойчивых состояний. В этом случае образовавшаяся каверна не будет развиваться до тех пор, пока увеличивающаяся глубина скважины не достигнет величины  $H=H_{III}$ . Дальнейшее увеличение глубины, большее  $H_{III}$ , невозможно, так как оно будет сопровождаться непрерывным и безграничным разрушением стенок каверны согласно

критерию (7). Таким образом, в рассматриваемом случае предельная глубина скважины  $H=H^{**}$  будет равна  $H_{III}$ ; большая глубина бурения невозможна для рассматриваемой технологии.

Если  $H_{III} < H^* = \min(H_I, H_{II})$ , то развитие каверны при  $H=H^{**}$  будет безостановочным, так как другие состояния согласно (7) будут неравновесными, закритическими. В этом случае предельная глубина скважины  $H^{**}$  будет равна  $H^*$ .

Таким образом, имеем следующий общий результат:

$$H^{**} = \max(H_{III}, H^*) = \max[H_{III}, \min(H_I, H_{II})]. \quad (12)$$

Пусть  $\eta=1/2$ ;  $\nu=1/3$ ;  $\delta=1/2$ ;  $\rho_a=0$ . Тогда согласно (7)–(10) имеем:

$$H_I = \frac{2\sigma_c}{(\rho - 3\rho_n)g},$$

$$H_{II} = \frac{2\sigma_c}{\rho g},$$

$$H_{III} = \frac{3\sigma_c}{(2\rho - \rho_n)g}.$$

Как видно, вариант I разрушения может реализоваться лишь при  $\rho > 3\rho_n$ , а вариант III – лишь при  $2\rho > \rho_n$ . Отсюда по формулам (11) и (12) находим начальную глубину кавернообразования и предельную глубину бурения:

$$H^* = \frac{2\sigma_c}{\rho g}; \quad (13)$$

$$H^{**} = \frac{2\sigma_c}{\rho g} \quad \text{при } \rho > 2\rho_n \text{ и } \rho < 0,5\rho_n. \quad (14)$$

$$H^{**} = \frac{3\sigma_c}{(2\rho - \rho_n)g} \quad \text{при } 2\rho_n > \rho > 0,5\rho_n. \quad (15)$$

Анализ полученных формул (13) и (14) показывает, что глубина кавернообразования и предельная глубина бурения равны между собой  $H^* = H^{**} = 2/3 y_c \cdot 10^2$  м при  $c = 3000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_n = 1500$  кг/м<sup>3</sup>, где  $y_c$  в МПа.

Отсюда для гранита предельная глубина бурения составит  $H^{**}=20$  км при  $\sigma_c=300$  МПа и для песка предельная глубина бурения соответственно  $H^{**}=2$  м при  $\sigma_c=0,03$  МПа.

Таким образом, на основании проведенного выше аналитического исследования подтверждается, что прочность породы играет основную роль при проектировании сверхглубоких скважин. Поэтому это необходимо также учитывать при разработке технологии наклонно-горизонтального бурения.

### Литература

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974.
2. Черепанов Г. П., Ершов Л. В. Механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1977.