

---

---

УДК 622.24

МРНТИ 52.13.25

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПРЕДЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ СКВАЖИНЫ**

**Н. У. Алиев, д.х.н., М. А. Баймұхаметов, к.т.н., Р. Ш. Ягудеев**

Казахский национальный технический университет  
им. К. И. Сатпаева

---

---

Каверна түзілу құбылысы зерттелген. Ұнғыманың каверна түзіле бастайтын төрнөндік шегі анықталған.

Түйінді сөздер: ұнғыма төрнөндігі, 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 осипям, 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 выше-лежащих 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  $\sigma_c$ ,  $\eta$ ,  $\delta$ ,  $v$ ,  $\rho g$ ,  $\rho_a g$  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]:

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

причем при  $q(1-2v\eta) > p(1-2v)$

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

Поэтому возможны следующие 3 варианта разрушения:

$$\text{вариант I} \quad (2\eta - \delta)\rho g H - (1 + \delta)(\rho_a g H + p_a) = \sigma_c; \quad (5)$$

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

$$\text{вариант III} \quad (1 - 2v\eta)\rho g H + 2(v - \delta)(\rho_a g H + p_a) = \sigma_c \\ (q = \rho g H, p = \rho_a g H + p_a). \quad (7)$$

где  $\rho_a$  – добавочное давление бурового раствора.

Этим вариантам разрушения отвечают следующие значения глубины  $H$ :

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

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

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

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 самопрессечения. 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  $H_{III} > H^* = \min(H_I, H_{II})$ . Причем 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 упругие 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  $\eta=1/2$ ;  $v=1/3$ ;  $\delta=1/2$ ;  $p_a=0$ . Тогда согласно (7)–(10) имеем:

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

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

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

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

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

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

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

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  $c = 3000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c_H = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$ , где  $y_c$  в МПа.

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