

АХУНДОВ М.Б.

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ВОКРУГ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

Одним из важнейших инженерных задач нефтемеханики является расчет устойчивости стенок скважины в течении заданного периода времени, который представляет собой процесс, зависящий от многих факторов, от физико-механических свойств горной породы до выбора плотности бурового раствора, его реологии. В [2] приведены примеры подобных расчетов на кратковременную и длительную устойчивость, используя соответственно критерий прочности Мора и критерий длительной прочности Бейли. В предлагаемой работе приводится методика исследования начала и процесса развития разрушения горной породы вокруг вертикальной скважины, позволяющие проследить как за стадией «скрытого» разрушения, так и стадией «явного» - неоднородного разрушения.

Исходные предпосылки следующие: начальное (до бурения скважины) напряженное состояние горного массива определяется гравитационной силой  $p_r = \rho g z$ , поровым давлением  $p_n(z)$  и условием нулевого смещения в горизонтальной плоскости; горная порода - однородное изотропное упруго-повреждающееся тело; скважина - это полубесконечная круглая вертикальная цилиндрическая полость в горном массиве, заполненная жидкостью плотностью  $\rho_c$ ; инерционные силы пренебрежимо малы.

Совмещая плоскость  $xy$  декартовой системы координат с плоскостью поверхности земли, и направляя ось  $z$  вертикально вниз, для начального состояния будем иметь:

$$\begin{cases} u_x^{(0)} = u_y^{(0)} = 0; \\ \sigma_{xx}^{(0)} = \sigma_{yy}^{(0)} = -\delta \Delta p_r; \sigma_{zz}^{(0)} = -\Delta p_r, \\ \sigma_{xz}^{(0)} = \sigma_{yz}^{(0)} = \sigma_{xy}^{(0)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta p_r = \rho_r g z - p_n$ ,  $\rho_r$  - средняя плотность вышележащих пород,  $z$  - рассматриваемая глубина,  $\delta = \nu / (1 - \nu)$  - коэффициент бокового горного давления,  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

В силу осевой симметрии задачи будем в дальнейшем пользоваться цилиндрической системой координат, в которой равны нулю напряжения и деформации сдвига.

Представим нормальные эффективные напряжения и перемещения в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \sigma_{rr}^{(0)} + \sigma_{rr}^{(1)}; \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}^{(0)} + \sigma_{\theta\theta}^{(1)}; \sigma_{zz} = \sigma_{zz}^{(0)} + \sigma_{zz}^{(1)} \\ u_r = u_r^{(1)}; u_\theta = 0; u_z = u_z^{(0)} \end{cases} \quad (2)$$

где индексом «1» отмечены дополнительные эффективные напряжения и перемещения, обусловленные образованием скважины.

Согласно представлениям (2) и принятым начальным допущениям относительно дополнительного напряженно-деформированного состояния имеем

задачу о плоской деформации. Определение же только напряжений приводит к соответствующей задаче Ляме при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \sigma_r^{(1)} = -\Delta p_c + \delta \Delta p_r; & r = R_c \\ \sigma_r^{(1)} = 0; & r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta p_c = \rho_c g z - p_n$ ;  $R_c$  - радиус скважины.

Приведем получаемые формулы [2] для полных напряжений (2) с учетом решения задачи Ляме (3):

$$\begin{cases} \sigma_r = -\Delta p_c - (\delta \Delta p_r - \Delta p_c) \left[ 1 - \left( \frac{R_c}{r} \right)^2 \right] \\ \sigma_{\theta\theta} = -\Delta p_c - (\delta \Delta p_r - \Delta p_c) \left[ 1 + \left( \frac{R_c}{r} \right)^2 \right] \\ \sigma_z = -\Delta p_r \end{cases} \quad (4)$$

В качестве модели примем модель упруго-повреждающейся среды [1]. Для случая монотонного нагружения оператор повреждаемости совпадает с видом наследственного оператора вязкого течения. Это обуславливает возможность использования для рассматриваемой задачи принципа соответствия Вольтерра - Работнова. Напряжения, как известно, для первой основной граничной задачи, будут такими же, как и для упругого тела (4). Критерий длительной прочности имеет вид:

$$\sigma_u + M^* \sigma_u = \sigma_0, \quad (5)$$

где  $\sigma_u$  - интенсивность напряжений:

$$\sigma_u = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_{\theta\theta})^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

В своего очередь  $M^*$  - оператор повреждаемости наследственного типа,  $\sigma_0$  - прочность бездефектного материала.

Учитывая представления (4) в (6) получим следующую явную формулу для интенсивности напряжений:

$$\sigma_u = \Delta p_r \left[ (1 - \delta)^2 + 3 \left( \frac{\Delta p_c - \delta \Delta p_r}{\Delta p_r} \right)^2 \left( \frac{R_c}{r} \right)^4 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Максимальное значение оно достигает на контуре скважины, где накопление повреждений идет особенно интенсивно. Этот процесс приводят к зарождению там зоны разрушения в момент времени  $t_0$ , определяемый согласно критерию (5) из уравнения:

$$(1 + M^* \cdot 1) \sigma_u(R_c) = \sigma_0, \quad (8)$$

Далее граница зоны разрушения - фронт разрушения - будет двигаться со все возрастающей скоростью, оставляя за собой кольцевой (цилиндрический) слой разрушенной горной породы, сопротивлением которой будем пренебрегать. Давление в скважине перенесется на новый контур, определяемый положением фронта разрушения в рассматриваемый момент времени. Момент времени  $t_p$ , когда скорость движения фронта разрушения станет бесконечно большой можно рассматривать как время полного разрушения околоскважинного горного массива.



Введем безразмерную функцию  $\beta(t)$ , определяющую текущий радиус зоны разрушения- фронт разрушения:  $r = \beta(t)R_{\infty}$ . Соответствующее время когда фронт разрушения определяется радиусом  $R_c$  обозначим через  $\tau$  ( $\tau < t$ ). Тогда  $R_c = \beta(\tau)R_{\infty}$ . Здесь  $R_{\infty}$  - начальный радиус скважины. Тогда интенсивность напряжений (7) может быть выражена посредством лишь одной функции  $\beta(t)$ :

$$\sigma_u(t, \tau) = \Delta p_r \left[ (1 - \delta)^2 + 3 \left( \frac{\Delta p_c - \delta}{\Delta p_r} \right)^2 \left( \frac{\beta(\tau)}{\beta(t)} \right)^4 \right]^{1/2} \quad (9)$$

Причем  $\beta(t) = 1$ ; при  $0 < t \leq t_0$ . Теперь из (8), можно получить явное уравнение относительно продолжительности «скрытой» стадии разрушения - инкубационного периода  $t_0$ . Для определенности возьмем в качестве ядра оператора повреждаемости наипростейшее  $M(t, \tau) = \lambda e^{-\mu(t-\tau)}$ .

Введем следующие безразмерные величин:  $T_0 = \lambda t_0$ ,  $\chi = \frac{\mu}{\lambda}$ , а также;

$$\begin{cases} (1 - \delta)^2 = \alpha; & 3 \left( \frac{\Delta p_c - \delta}{\Delta p_r} \right)^2 = \gamma; & \Delta p_r (\gamma + \alpha)^{1/2} = \omega \\ \frac{\sigma_0}{\Delta p_r} - (\alpha + \gamma)^{1/2} = \eta; & f(\beta(t), \beta(\tau)) = \left[ \alpha + \gamma \left( \frac{\beta(\tau)}{\beta(t)} \right)^4 \right]^{1/2} \end{cases} \quad (10)$$

Тогда имеем:

$$T_0 = \frac{1}{\chi} \ln \left[ 1 - \chi \left( \frac{\sigma_0}{\omega} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

Из последней следуют ограничения на параметры, при которых возможен рассматриваемый процесс. Эти ограничения обусловлены положительностью правой части соотношения (11). Невыполнение их приводит либо к неосуществимости процесса разрушения, либо к его мгновенному осуществлению.

Для значений параметров [2]:  $\rho_r = 2300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $\rho_c = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $z = 3000$  м,  $p_c = 33$  МПа,  $p_r = 69$  МПа,  $p_n = 45$  МПа,  $\sigma_0 = 200$  МПа,  $\delta = 0,25$  ( $\nu = 0,2$ ), а также  $\chi = 0,1$  из (11) получим  $T_0 = 6,1$ .

Дальнейшее развитие процесса разрушения будет описываться согласно (5) и (7) интегральным уравнением:

$$\sigma_u(t, t) + \int_0^t M(t - \tau) \sigma_u(t, \tau) d\tau = \sigma_0 \quad (12)$$

Здесь под  $t$  и  $\tau$  дальнейшим будем подразумевать безразмерные времена, отнесенные к параметру  $\lambda$ . Согласно (7) и обозначениям (10) уравнение (12) примет вид:

$$\int_0^t e^{-\chi(t-\tau)} f(\beta(t), \beta(\tau)) d\tau = \eta \quad (13)$$

Это интегральное уравнение будем решать численно. Шаг определим из допустимой погрешности численной схемы при определении инкубационного периода. Расчеты показали, что шаг в одну десятую инкубационного периода даст

погрешность 11% в его определении, в то время как при шаге в одну пятнадцатую инкубационного периода погрешность не превышает 0,3 %. Пользуясь последним шагом численно последовательно решалось интегральное уравнение (13). По этим расчетным данным построена кривая зависимости безразмерного радиуса фронта разрушения от времени. Время выхода этой кривой на вертикальную асимптоту (бесконечно большая скорость распространения фронта разрушения) есть время полного разрушения  $t_p$ , которое для принятых расчетных данных оказалось равным 21. Таким образом оказалось, что время «скрытого» разрушения  $T_0$  составляет значительную часть времени «открытого» разрушения  $\Delta T_p = t_p - T_0$ , в нашем случае порядка 40%.

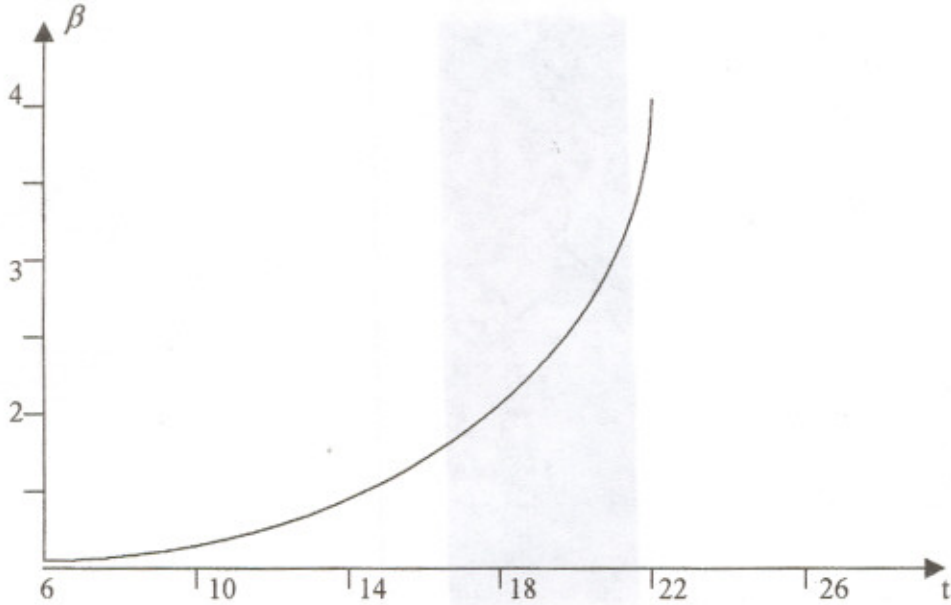


Рис. 1

## Литература

- [1]. Ахундов М.Б. *Механизм деформирования и рассеянного разрушения композитных структур*. Изв. АН СССР, МТТ, 1991, <sup>1</sup> 4, с.173-179.
- [2]. Рабинович Н.Р. *Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении*. М.Недра, 1989, 270 с.

Axundov M.B.

## ŞAQLI QUYU ƏTRAFI DAĞ SUXURUNUN DAĞILMASI

Təqdim olunan işdə şaquli silindrik quyuyu ətrafının dağılma prosesi təqdim olunur. Burada qəbul olunur ki, dağılma zaman boyudağ suxurunda zədələrin yaranması və yığılması ilə müəyyən olunur.

погрешность 11% в его определении, в то время как при шаге в одну пятнадцатую инкубационного периода погрешность не превышает 0,3 %. Пользуясь последним шагом численно последовательно решалось интегральное уравнение (13). По этим расчетным данным построена кривая зависимости безразмерного радиуса фронта разрушения от времени. Время выхода этой кривой на вертикальную асимптоту (бесконечно большая скорость распространения фронта разрушения) есть время полного разрушения  $t_p$ , которое для принятых расчетных данных оказалось равным 21. Таким образом оказалось, что время «скрытого» разрушения  $T_0$  составляет значительную часть времени «открытого» разрушения  $\Delta T_p = t_p - T_0$ , в нашем случае порядка 40%.

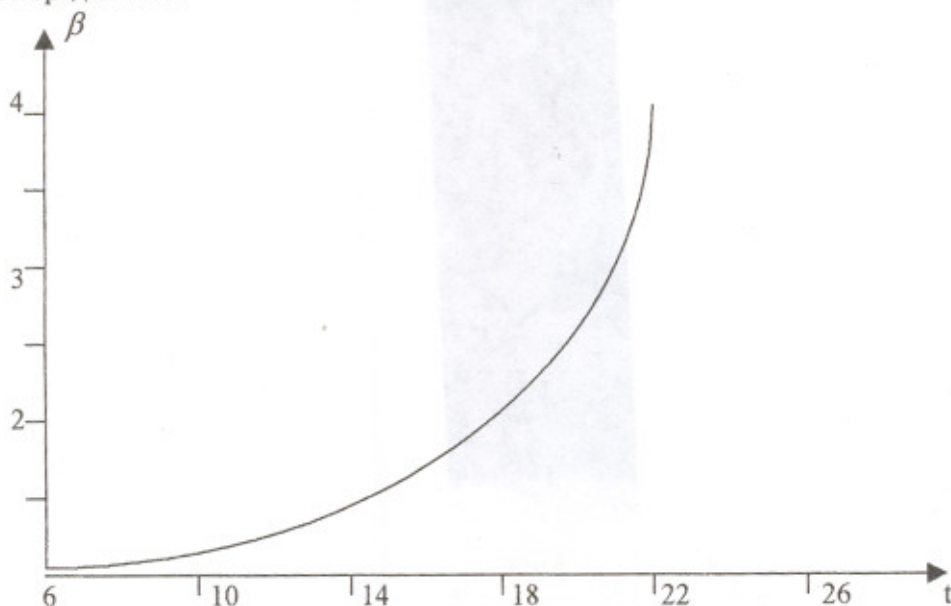


Рис. 1

## Литература

- [1]. Ахундов М.Б. *Механизм деформирования и рассеянного разрушения композитных структур*. Изв. АН СССР, МТТ, 1991, 4, с.173-179.
- [2]. Рабинович Н.Р. *Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении*. М.Недра, 1989, 270 с.



**Akhundov M.B. FAILURE OF THE DRILLING FLUID AROUND THE VERTICAL BOREHOLE**

On of the importunate engineering problems of oilmechanics is the stability analysis of walls of the brothel during given time which presents the process depending on many factor from physical-mechanical properties of the rock to sampling of the drilling fluid density and its realogy. In this paper the methods of investigation of beginning and process of development of failure of drilling fluid around vertical brothel is reduced which let trace as stage of failure as stage «explicit» nonhomogenous failure.

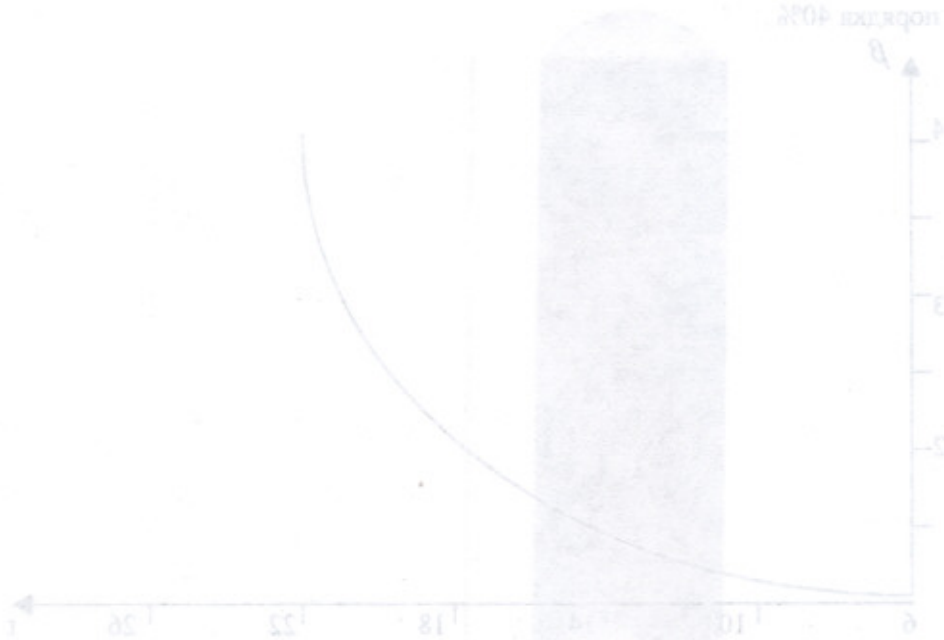


Рис. 1

Диаграмма

[1] Ахундов М.Б. Механика деформирования и разрушения композиционных структур. Изд. АН СССР, МТТ, 1991, 4, с.153-179.  
 [2] Раёмонзи Н.В. Напряжение вблизи скважины сжимающей среды в бурении. М.ИГиЛ, 1989, 270 с.

Ахундов М.Б. ЗАЛУЧЕННЯ ТАК СУХУРИНИ ДАЧІ МАЛІ

Тодіш оіман ішо сідші зіділік дурі суаірін даішін процес тедіш оіман. Буада дедіш оіман ішо даішін хаман дувіді суаірін зодішін җағалмас җо җідіман ішо імпейш оіман.