

3. Vajnshtok, S. M., Molchanov, A. G., Nekrasov, V. I. et al. (1999). *Podzemnyj remont i burenie skvazhin s primeneniem gibkih trub [Underground repair and well-drilling with the use of coiled tubing]*. Moscow: Academy of mining sciences [in Russian].
4. Gary, S. C. (1995). Coiled tubing drilling requires economic and technical analyses. *Oil and Gas Journal*, Vol. 93, 8, 59 – 62.
5. Large diameter tubing drilling (1997). *Oil and Gas Journal*, Vol. 49, 2, 135 – 136.
6. Ihnatov, A. O. (2017). Patent of Ukraine 114966.

УДК 622.24

DOI: 10.33839/2223-3938-2018-21-1-139-150

Гасанов Р. А., Рамазанов Ф. Х.

Государственная Нефтяная Компания Азербайджанской Республики

Разработка теоретико-расчетной технологии для оценки устойчивости пород ствола горизонтальной скважины

В настоящей работе дан анализ причин нарушения устойчивости пород ствола горизонтального участка скважин. С этой целью разработана механическая и математическая модели нагружения пород пристволевой зоны горизонтального участка ствола. Для единственности решения в математическую модель рассматриваемой задачи включены уравнения движения, физические соотношения и уравнения совместности деформаций, а краевые условия определены с учетом нагрузок согласно механической модели деформационного поведения. Математическая модель задачи деформационного поведения пород пристволевой зоны решена конечно-разностным методом, для чего разработана специальная расчетная процедура. На основе полученных решений дана оценка повреждаемости пород пристволевой зоны горизонтального ствола при различных модификациях нагружения.

Ключевые слова: горизонтальная скважина, ствол, породы, устойчивость, деформационное поведение, факторы

Анализ результатов многочисленных реализаций процессов производства буровых работ свидетельствует о том, что основной причиной разрушения целостности стволов скважин является стимулирование предельного напряженно-деформационного состояния в пристволевой зоне содержанием технологических регламентов.

Для оценки и изучения причин возникновения предельных состояний пристволевой зоны на различных участках ствола скважины необходимым является исследование напряженно-деформированного состояния окружающего массива пород. Особенно актуальными и значимыми эти исследования являются для горизонтального участка наклонно-направленных скважин. Объясняется это тем, что нарушение целостности стенок ствола горизонтального участка скважин имеет последствия, ликвидация которых сопровождается определенными осложнениями, а иногда и безрезультатны.

Для исследования напряженно-деформированного состояния пород пристволевой зоны горизонтального участка ствола наклонно-направленной скважины его механическая модель представлена способной повреждаться, изотропной бесконечной полуплоскостью, имеющей закрепленную по окружности пустоту в виде отверстия. Предполагается, что для рассматриваемой среды удовлетворяются условия, соответствующие для плоского деформационного поведения. В этом случае пристволевая зона горизонтального участка ствола будет соответствовать его вышеописанной

механической модели, т.е. отверстию со способной деформироваться и разрушаться по окружности изотропной средой. Расстояние от центра отверстия бесконечной полуплоскости до её горизонтальной границы принимается равным – «Н» (см рис. 1). Математическая модель рассматриваемой задачи будет содержать уравнения движения, физические соотношения и уравнения совместности деформаций. Краевые условия задачи определяются заданными на поверхности полуплоскости и распределенными, равномерно по контуру отверстия, нагрузками.

Основные определяющие соотношения могут быть представлены ниже-приводимыми зависимостями:

$$\begin{aligned} 3K_0\varepsilon_0 &= (1+N^*)\varepsilon; \quad 2G_0\varepsilon_{ij} = (1+M^*)s_{ij}; \\ \sigma &= \sigma_{ij}; \quad \varepsilon = \varepsilon_{ij}; \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\alpha\delta_{ij}; \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon\delta_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ε_{ij} и s_{ij} , соответственно, девиаторы деформаций и напряжений; G_0 и K_0 -мгновенные модули эластичности и сдвига; M^* и N^* -операторы повреждения наследственного типа.

Путем использования определяющих соотношений зависимости между компонентами деформаций и напряжений представляются в виде

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\sigma_{ij} + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} - \frac{1}{3G_0}\right) + \left(\frac{1}{3K_0}N^* - \frac{1}{2G_0}M^*\right)\right\}\sigma\delta_{ij}. \quad (2)$$

Из (2) могут быть записаны в явном виде выражения для компонент деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\sigma_{11} + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} - \frac{1}{2G_0}\right) + \left(\frac{1}{3K_0}N^* - \frac{1}{2G_0}M^*\right)\right\}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}); \\ \varepsilon_{12} &= \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\sigma_{12}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\sigma_{22} + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} - \frac{1}{2G_0}\right) + \left(\frac{1}{3K_0}N^* - \frac{1}{2G_0}M^*\right)\right\}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33});$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\sigma_{33} + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} - \frac{1}{2G_0}\right) + \left(\frac{1}{3K_0}N^* - \frac{1}{2G_0}M^*\right)\right\}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}).$$

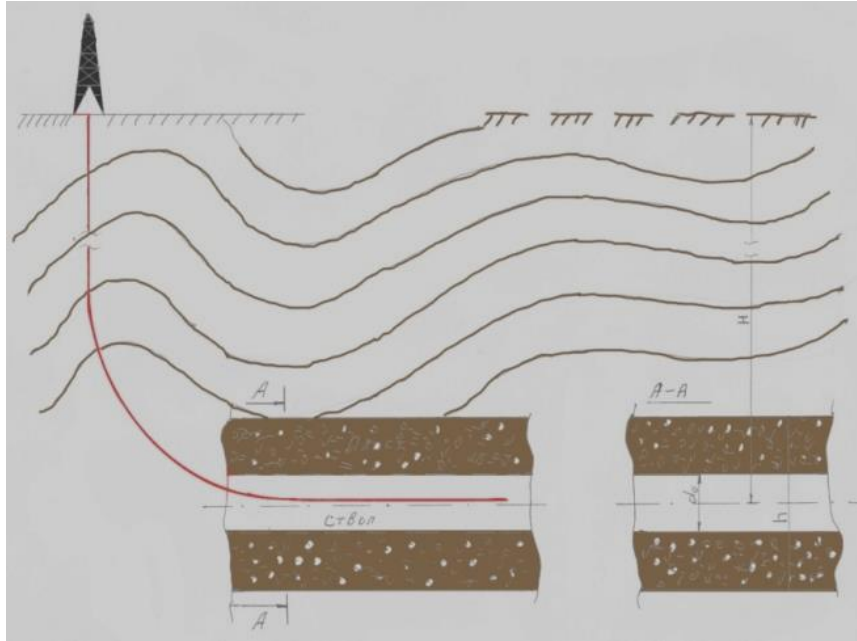


Рис. 1. Механическая модель ствола горизонтального участка скважины

Критерий разрушения представляется уравнением вида

$$\sigma_u + M^* \sigma_u \leq \sigma_M, \quad (4)$$

где σ_M - мгновенный предел прочности; σ_u - интенсивность напряжений:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{22}\sigma_{33} - \sigma_{11}\sigma_{33} + 3\sigma_{12}^2}. \quad (5)$$

Для рассматриваемого плоско-напряженного деформационного поведения уравнения движения (6 «а») и совместности деформаций (6 «б»)) деформирующегося массива пород пристволенной зоны горизонтального участка ствола имеет, соответственно, вид:

$$\text{а) } \begin{cases} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0; \end{cases} \quad \text{б) } \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2}. \quad (6)$$

Из-за того, что критерий разрушения представлен зависимостью напряжений, постановку задачи также следует представить в выражениях напряжений. С этой целью подставив выражения для деформаций из (3) в уравнение (6, б) для совместности деформаций получаем ниже приводимую зависимость в напряжениях:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\left(\frac{\partial^2\sigma_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\sigma_{22}}{\partial x_1^2}\right) + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} + \frac{1}{2G_0}\right) + \left(\frac{1}{3K_0}N^* + \frac{1}{2G_0}M^*\right)\right\}\left(\frac{\partial^2\sigma_{11}}{\partial x_2^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2\sigma_{22}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\sigma_{33}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\sigma_{11}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\sigma_{22}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\sigma_{33}}{\partial x_1^2}\right) = \frac{1}{G_0}(1+M^*)\frac{\partial^2\sigma_{12}}{\partial x_1\partial x_2}; \quad (7) \\ & \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\sigma_{33} + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} - \frac{1}{2G_0}\right) + \left(\frac{1}{3K_0}N^* - \frac{1}{2G_0}M^*\right)\right\}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = 0. \end{aligned}$$

Последняя система уравнений (7) совместно с уравнениями равновесия составляют замкнутую систему уравнений в компонентах напряжений.

Как отмечено выше, система уравнений содержит интегральные операторы наследственного типа N^* и M^* , характеризующие процесс накопления повреждений.

В частности N^* -характеризует накопление повреждений в объемных изменениях, а M^* -процесс накопления повреждений при деформации скольжения. Вследствие того, что $N^* \ll M^*$, принимается, что $N^* = 0$. Для этого случая система уравнений (7) принимает ниже приводимый вид:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\left(\frac{\partial^2\sigma_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\sigma_{22}}{\partial x_1^2}\right) + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} + \frac{1}{2G_0}\right) + \frac{1}{2G_0}M^*\right\}\left(\frac{\partial^2\sigma_{11}}{\partial x_2^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2\sigma_{22}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\sigma_{33}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\sigma_{11}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\sigma_{22}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\sigma_{33}}{\partial x_1^2}\right) = \frac{1}{G_0}(1+M^*)\frac{\partial^2\sigma_{12}}{\partial x_1\partial x_2}; \quad (8) \\ & \frac{1}{2G_0}(1+M^*)\sigma_{33} + \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{3K_0} - \frac{1}{2G_0}\right) - \frac{1}{2G_0}M^*\right\}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = 0; \\ & \frac{\partial\tau_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial\tau_{22}}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial\sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial\sigma_{22}}{\partial x_2} - \gamma = 0. \end{aligned}$$

Учитывая тот факт, что нагружение полуплоскости представляется, равномерным на участке $[a, b]$ её поверхности (за пределами этого отрезка все силы приняты равными $F_i = 0$) граничные условия в математической модели представлены как

$$\sigma_{xy} = q; \quad \sigma_{yy} = -P; \quad y = H, \quad a \leq x \leq b \quad (9)$$

А на контуре отверстия, нагруженного внутренним давлением граничные условия представляются зависимостями вида

$$\sigma_{rr} = -q; \quad \sigma_{r\phi} = 0; \quad 0 < r \leq R, \quad (10)$$

где R -радиус возмущенной области.

За пределами радиуса возмущения напряженное состояние массива соответствует естественному состоянию, т.е. приближается состоянию сплошной полуплоскости без отверстия;

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0; \quad x^2 + y^2 \rightarrow \infty, \quad (11)$$

где σ_{ij}^0 -напряжения, соответствующие начальному естественному состоянию.

Напряжения, соответствующие этому состоянию определяются [4] нижеприводимыми выражениями:

$$\begin{aligned}\sigma_{yy}^0 &= -y(H-y); \\ \sigma_{xx}^0 &= -\lambda\gamma(H-y),\end{aligned}\quad (12)$$

где $\lambda(0 < \lambda < 1)$ - есть коэффициент бокового распора; ν - коэффициент Пуассона. Путем введения системы безразмерных коэффициентов вида

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{p}; \quad \tilde{G}_0 = \frac{G_0}{p}; \quad \tilde{K}_0 = \frac{K_0}{p}; \quad \tilde{x}_1 = \frac{x_1}{H}; \quad \tilde{x}_2 = \frac{x_2}{H}\quad (13)$$

основная система уравнений представляется в нижеприводимом виде в безразмерных коэффициентах:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2\tilde{G}_0} (1+M^*) \left(\frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{11}}{\partial \tilde{x}_2^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{22}}{\partial \tilde{x}_1^2} \right) + \frac{1}{3} \left\{ \left(\frac{1}{3\tilde{K}_0} + \frac{1}{2\tilde{G}_0} \right) + \frac{1}{2\tilde{G}_0} M^* \right\} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{11}}{\partial \tilde{x}_2^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{22}}{\partial \tilde{x}_2^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{33}}{\partial \tilde{x}_2^2} + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{11}}{\partial \tilde{x}_1^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{22}}{\partial \tilde{x}_1^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{33}}{\partial \tilde{x}_1^2} \right) = \frac{1}{\tilde{G}_0} (1+M^*) \frac{\partial^2 \tilde{\sigma}_{12}}{\partial \tilde{x}_1 \partial \tilde{x}_2}; \\ \frac{1}{2\tilde{G}_0} (1+M^*) \tilde{\sigma}_{33} + \frac{1}{3} \left\{ \left(\frac{1}{3\tilde{K}_0} - \frac{1}{2\tilde{G}_0} \right) - \frac{1}{2\tilde{G}_0} M^* \right\} (\tilde{\sigma}_{11} + \tilde{\sigma}_{22} + \tilde{\sigma}_{33}) = 0; \\ \frac{\partial \tilde{\sigma}_{11}}{\partial \tilde{x}_1} + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{12}}{\partial \tilde{x}_2} = 0; \quad \frac{\partial \tilde{\sigma}_{12}}{\partial \tilde{x}_1} + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{22}}{\partial \tilde{x}_2} - \tilde{\gamma}_2 = 0,\end{aligned}\quad (14)$$

а граничные условия в виде

$$\begin{cases} y = H, a \leq x \leq b & \tilde{\sigma}_{xy} = -\tilde{q}, \tilde{\sigma}_{yy} = -\tilde{p}; \\ r = R; & \tilde{\sigma}_{rr} = -\tilde{q}; \tilde{\sigma}_{r\phi} = 0; \\ \tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 \rightarrow \infty; & \tilde{\sigma}_{ij} \rightarrow \tilde{\sigma}_{ij}^0. \end{cases}\quad (15)$$

Математическая модель задачи в безразмерных величинах, представленная системами уравнений (14) и (15) для аналитического решения представляется весьма сложной. Поэтому для её решения применен численный метод, а именно - метод конечных разностей, для чего бесконечная полуплоскость заменена конечным прямоугольником. Для применения метода вначале построена сеть на моделирующем прямоугольнике, для чего по оси x выбран шаг равный «щ1», а по оси y - шаг, равный «щ2». Затем строиться множество точек с координатами

$$x_i = x_0 + ih_1; \quad y_j = y_0 + jh_2, \quad \text{где } (i, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

для которых уравнения равновесия представляются системой вида

$$\frac{\partial \sigma_{f_{i,j}}}{\partial x_1} = \frac{\sigma_{f_{i-1,j}} - 2\sigma_{f_{i,j}} + \sigma_{f_{i+1,j}}}{h_1^2}; \quad \frac{\partial \sigma_{f_{i,j}}}{\partial x_2} = \frac{\sigma_{f_{i,j-1}} - 2\sigma_{f_{i,j}} + \sigma_{f_{i,j+1}}}{h_2^2}\quad (16)$$

Если в уравнениях этой системы производные заменить на конечные разности, то точки попадающие во внутреннюю область отверстия создают определенные трудности для её решения. Во избежание этой трудности при криволинейной границе рассматриваемой области для узловых граничных точек значения « σ_{ij} » на границах области определяются путем переноса точек. В этом случае возможные ошибки сводятся к минимуму для каждой граничной узловой точки путем построения зависимости

$$\sigma_{i,jch} = \frac{\delta_2 \sigma_{i,jp} - h \sigma_{i,jc}}{\delta_2 - h}, \text{ откуда } \sigma_{i,jc} = \frac{\delta_2}{h} \sigma_{i,jp} - \frac{\delta_2 - h}{h} \sigma_{i,jch}. \quad (17)$$

Используя последние зависимости для узловых точек, попадающих в область отверстия путем переноса точек записываются выражения для напряжений:

$$\begin{aligned} \text{при } i=4, j=4 \quad \sigma_{1134} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1134_1} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \sigma_{1144}; \\ \text{при } i=2, j=4 \quad \sigma_{1134} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1134_4} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \beta \sigma_{1124}; \\ \text{при } i=3, j=5 \quad \sigma_{1134} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1134_3} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \sigma_{1135}; \\ \text{при } i=4, j=3 \quad \sigma_{1133} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1134_1} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \sigma_{1143}; \\ \text{при } i=2, j=3 \quad \sigma_{1133} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1134_5} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \sigma_{1123}; \\ \text{при } i=3, j=2 \quad \sigma_{1132} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1132_8} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \sigma_{1142}; \\ \text{при } i=2, j=2 \quad \sigma_{1132} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1132_6} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \sigma_{1142}; \\ \text{при } i=1, j=3 \quad \sigma_{1132} &= \frac{h_1}{\delta_1} \sigma_{1132_7} + \frac{\delta_1 - h_1}{\delta_1} \sigma_{1113}. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, для определения напряжений во всех узловых точках получается нижеприводимая система алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\tilde{G}_0} (1+M^*) \left(\frac{\tilde{\sigma}_{11,j+1} - 2\tilde{\sigma}_{11,j} + \tilde{\sigma}_{11,j-1}}{\tilde{h}_2^2} + \frac{\tilde{\sigma}_{22,j} - 2\tilde{\sigma}_{22,j} + \tilde{\sigma}_{22,j+1}}{\tilde{h}_1^2} \right) + \\ & + \frac{1}{3} \left\{ \left(\frac{1}{2\tilde{K}_0} - \frac{1}{2\tilde{G}_0} \right) + \frac{1}{2\tilde{G}_0} M^* \right\} \left(\frac{\tilde{\sigma}_{11,j+1} - 2\tilde{\sigma}_{11,j} + \tilde{\sigma}_{11,j-1}}{\tilde{h}_2^2} + \frac{\tilde{\sigma}_{22,j+1} - 2\tilde{\sigma}_{22,j} + \tilde{\sigma}_{22,j-1}}{\tilde{h}_2^2} + \right. \\ & + \frac{\tilde{\sigma}_{33,j+1} - 2\tilde{\sigma}_{33,j} + \tilde{\sigma}_{33,j-1}}{\tilde{h}_2^2} + \frac{\tilde{\sigma}_{11,j} - 2\tilde{\sigma}_{11,j} + \tilde{\sigma}_{11,j-1}}{\tilde{h}_1^2} + \\ & \left. + \frac{\tilde{\sigma}_{22,j-1} - 2\tilde{\sigma}_{22,j} + \tilde{\sigma}_{22,j+1}}{\tilde{h}_1^2} + \frac{\tilde{\sigma}_{33,j} - 2\tilde{\sigma}_{33,j} + \tilde{\sigma}_{33,j-1}}{\tilde{h}_1^2} \right) = \frac{1}{\tilde{G}_0} (1+M^*) x \\ & x \frac{\tilde{\sigma}_{12,j+1} - 2\tilde{\sigma}_{12,j} + \tilde{\sigma}_{12,j-1}}{\tilde{h}_1^2} + \sigma_{12,j}; \\ & \frac{1}{2\tilde{G}_0} (1+M^*) \tilde{\sigma}_{33,j} + \frac{1}{3} \left\{ \left(\frac{1}{2\tilde{K}_0} - \frac{1}{2\tilde{G}_0} \right) - \frac{1}{2\tilde{G}_0} M^* \right\} (\tilde{\sigma}_{11,j} + \tilde{\sigma}_{22,j} + \tilde{\sigma}_{33,j}) = 0; \\ & \frac{\tilde{\sigma}_{11,j+1} - \tilde{\sigma}_{11,j-1}}{2\tilde{h}_1} + \frac{\tilde{\sigma}_{12,j+1} - \tilde{\sigma}_{12,j-1}}{2\tilde{h}_2} = 0; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{\tilde{\sigma}_{12_{i+1,j}} - \tilde{\sigma}_{12_{i,j}}}{2\tilde{h}_1} + \frac{\tilde{\sigma}_{22_{i,j+1}} - \tilde{\sigma}_{22_{i,j-1}}}{2\tilde{h}_2} - \tilde{\gamma}_2 = 0.$$

Решение системы алгебраических уравнений, как отмечено выше, отыскиваются для конечной прямоугольной области со сторонами, соответственно, «л» и «щ», соотношение которых определяется опытным путем. Граничные условия на контурах прямоугольной области и по контуру окружности приведены в табл.1:

Таблица 1. Граничные условия задачи

№	Область	Сторона «щ»		Сторона «л»	
		$y = H$	$y = -H$	$x = l/2$	$x = -l/2$
1.	Конечная прямо- угольная	а) При $a \leq i \leq b$ $\tilde{\sigma}_{22_{i,m}} = -\tilde{P}$; При $b < i < a$ $\tilde{\sigma}_{22_{i,m}} = 0$. б) При $i = 0, \dots, n$ $\tilde{\sigma}_{33} = 0$; $\tilde{\sigma}_{11_{i,m}} = 0$. в) При $i = 0, \dots, n$ $\tilde{\sigma}_{12_{i,m}} = 0$.	При $i = 0, \dots, n$ $\tilde{\sigma}_{22_{i,0}} = -\tilde{\gamma}_2(H - y)$; $\tilde{\sigma}_{33_{i,0}} = v(\tilde{\sigma}_{11_{i,0}} +$ $+ \tilde{\sigma}_{22_{i,0}})$; $\tilde{\sigma}_{11_{i,0}} = \tilde{\sigma}_{12_{i,0}} = 0$.	При $j = 0, \dots, m$ $\tilde{\sigma}_{11_{n,j}} =$ $= -\lambda\tilde{\gamma}_2(2H - j)$; $\tilde{\sigma}_{33_{n,j}} = v(\tilde{\sigma}_{11_{n,j}} +$ $+ \tilde{\sigma}_{22_{n,j}})$; $\tilde{\sigma}_{12_{n,j}} = 0$.	$\tilde{\sigma}_{110,j} =$ $= -\lambda\tilde{\gamma}_2(2H - j)$; $\tilde{\sigma}_{330,j} = v(\tilde{\sigma}_{v,j} +$ $+ \tilde{\sigma}_{22_{n,j}})$; $\tilde{\sigma}_{12_{n,j}} = 0$.
2.	Круговая	$\tilde{\sigma}_{ri,j} = \tilde{\sigma}_{11_{i,j}} \cos^2 \alpha + \tilde{\sigma}_{22_{i,j}} \sin^2 \alpha$; $\tilde{\sigma}_{r\phi i,j} = \frac{\tilde{\sigma}_{11_{i,j}} - \tilde{\sigma}_{22_{i,j}}}{2} \sin 2\alpha$, где $\tilde{\sigma}_{rri,j} = q$; $\tilde{\sigma}_{r\phi i,j} = 0$.			

Приведенные в таблице 1 граничные условия определяют единственность решения системы алгебраических уравнений (19). Оператор повреждений, входящий в (4.1) может быть представлен в виде

$$M^* \sigma_{ij} = \sum_{k=1}^n \int_{t_k^-}^{t_k^+} M(t-\tau) \sigma_{ij}(\tau) d\tau + \int_{t_{n+1}^-}^t M(t-\tau) \sigma_{ij}(\tau) d\tau, \quad (20)$$

интегралы в котором представлены соответствующей суммой вида

$$\int_{t_k^-}^t M(t-\tau) \sigma_{ij}(\tau) d\tau = \sum_{S=1}^{S(k)} \delta_S M(t_{S(k)} - t_S) \sigma_{ij}(t_S) \Delta t, \quad (21)$$

а временные интервалы (t_k^-, t_k^+) определяются согласно условия $\sigma_{ik} - \sigma_{ik-1} > 0$.

В выражениях (20) и (21) $M(t_n - t_k) = m$, где $k = 2, \dots, n-1$, а вычисления, на базе которых, проводятся для ядер

$$\tilde{C}_0^1 = \tilde{G}_0 / 10^2; \quad \tilde{K}^1 = \tilde{K} / 10^2 \quad (22)$$

Таким образом, соответствующие вычисления реализуемые при принятых расчетных параметрах осуществляются по нижеприводимой процедуре и последовательности. В начале для первого шага времени определяются значения всех

напряжений и в каждом расчетном узле на их базе проверяется удовлетворимость для критерия повреждаемости (2). Для случая удовлетворения условия по критерию повреждаемости в следующем расчетном шаге значения механических параметров соответствующего узла принимаются неизменными [1,2]. В противном случае значения этих параметров изменяются согласно (22). Таким образом появляется возможность слежения от узла к узлу развитие процесса повреждения исследуемой области. Результаты варианта расчета по вышеописанной процедуре для различных вариантов осисимметричного по отношению к окружности нагружения приведены в табл. 2-5 и рис 2, 3:

Вариант 1: Нагружение по отношению к окружности является симметричной и внутреннее нагружение отсутствует.

- область возмущения вокруг окружности является незакрепленной (табл. 2):

Таблица 2. Незакрепленная область

т-время разрушения	$\lambda = 0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1$
0,3	-	-	(2,3)-(4,3) (2,4)-(4,4)
0,36	-	-	(3,1)-(3,2)
0,38	-	-	(4,2)-(2,2)
0,5	-	(2,3)-(2,4) (4,3)-(4,4)	-
0,56	-	(3,1)-(3,2)	-
0,8	-	(4,2)-(2,2)	-
1,7	(2,4)-(2,3)-(4,4)	-	-
1,8	(3,1)-(3,2))	-	-
2	(4,2)-(2,2)	-	-

- область возмущения вокруг окружности является закрепленной (табл.3):

Таблица 3. Закрепленная область

т-время разрушения	$\lambda = 0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1$
1,2	-	-	(2,3)-(4,3) (2,4)-(4,4)
1,27	-	-	(3,1)-(3,2)
1,36	-	-	(4,2)-(2,2)
1,48	-	(2,3)-(2,4) (4,3)-(4,4)	-
1,57	-	(3,1)-(3,2)	-
2	-	(4,2)-(2,2)	-
2,6	(2,4)-(2,3)-(4,4)	-	-
2,9	(3,1)-(3,2))	-	-
3,99	(4,2)-(2,2)	-	-

Результаты расчета для обоих случаев приведены на рис 2.

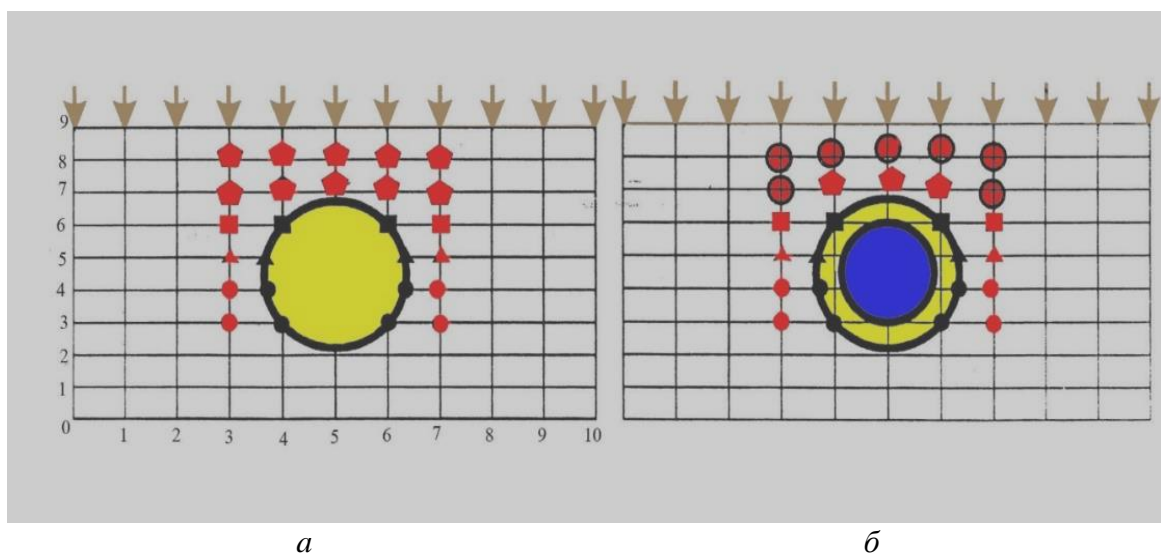


Рис 2. Повреждаемость областей при нагрузениях по варианту 1 (сечение А–А):
а-для незакрепленной области; б-для закрепленной области

Вариант 2. Нагружение по отношению к окружности является симметричной и существует внутреннее нагружение:

- область возмущения вокруг окружности является незакрепленной (табл. 4):

Таблица 4. Незакрепленная область

т-время разрушения	$\lambda = 0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1$
0,57	-	-	(2,3)-(4,3) (2,4)-(4,4)
058	-	-	(3,1)-(3,2)
0,59	-	-	(4,2)-(2,2)
0,63	-	(2,3)-(2,4) (4,3)-(4,4)	-
0,74	-	(3,1)-(3,2)	-
0,75	-	(4,2)-(2,2)	-
1,2	(2,4)-(2,3)-(4,4)	-	-
1,25	(3,1)-(3,2))	-	-
1,30	(4,2)-(2,2)	-	-

-область возмущения вокруг окружности является закрепленной (табл. 5):

Таблица 5. Закрепленная область

т-время разрушения	$\lambda = 0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1$
1	2	3	4
1,4	-	-	(2,3)-(4,3) (2,4)-(4,4)
1,46	-	-	(3,1)-(3,2)
1,5	-	-	(4,2)-(2,2)

Окончание таблицы 5

1	2	3	4
1,59	-	(2,3)-(2,4) (4,3)-(4,4)	-
2	-	(3,1)-(3,2)	-
2,7	-	(4,2)-(2,2)	-
2,79	(2,4)-(2,3)-(4,4)	-	-
3	(3,1)-(3,2))	-	-
3,99	(4,2)-(2,2)	-	-

Результаты расчета для обоих случаев приведены на рис 3.

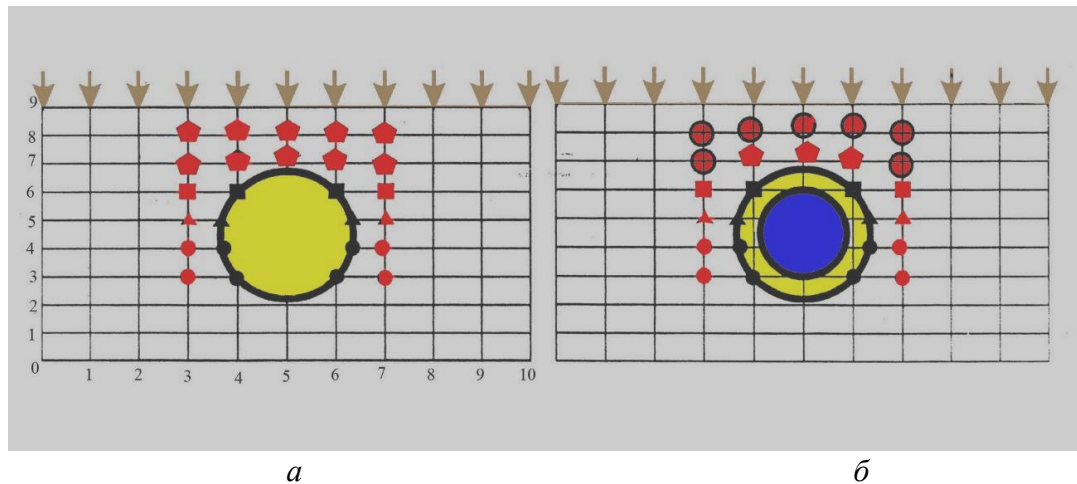


Рис 3. Повреждаемость областей при нагружениях по варианту 2: а, б – соответственно, для незакрепленной и закрепленной областей сечение по А–А.

Проведенные теоретические исследования [3, 4] по изучению напряженно-деформированного состояния окружающих горизонтальную выработку пород и их численная реализация позволили разработать технологию для оценки устойчивости стволов наклонно-направленных скважин с горизонтальным окончанием (см. рис. 1). Следует отметить, что разработанная теоретика расчетная технология позволяет моделировать и изучать (см. рис. 2 и 3) устойчивость стволов скважин в горизонтальной части с учетом их геометрических характеристик, формой конструктивного исполнения и характером нагружения и т.д. Это еще раз подчеркивает эксклюзивность разработанной расчетной технологии. Анализ результатов численной реализации в различных вариациях модели горизонтальной выработки показывает, что в зависимости от значения коэффициента бокового распора ($0 \leq \lambda \leq 1$) время разрушения ствола изменяется в 6,7 раза (т.е. от 0,3 до 2,0, где показания в безразмерных единицах) для незакрепленной области. При наличии внутреннего давления для этой области время разрушения изменяется с учетом « λ » в 2,30 раза. Для закрепленной области время разрушения изменяется для данной реализации, соответственно, при отсутствии внутреннего давления – в 3,30 раза, а при его наличии – 2,85 раза в зависимости от значения коэффициента бокового распора – « λ ». Наличие внутреннего давления может изменять период устойчивости пород в пределах от 1,16 до 3-х раз для, соответственно, закрепленной и незакрепленной областей.

Таким образом, предлагаемая разработка, доведенная до расчетной технологии позволяет проводить анализы конструкций горизонтальных стволов и строить проектные решения для их реализации.

Выводы

1. Разработанная теоретика расчетная технология позволяет моделировать и изучать устойчивость стволов скважин в горизонтальной части с учетом их геометрических характеристик, формой конструктивного исполнения и характером нагружения и т.д.

2. Модели горизонтальной выработки показывает, что в зависимости от значения коэффициента бокового распора ($0 \leq \lambda \leq 1$) время разрушения ствола изменяется в 6,7 и 3,30 раза, соответственно, для незакрепленной и закрепленной областей.

3. Наличие внутреннего давления может изменять период устойчивости пород в пределах от 1,16 до 3-х раз для, соответственно, закрепленной и незакрепленной областей.

У даній роботі поданий аналіз причин порушення стійкості порід стовбура горизонтальної ділянки свердловини. З цією метою розроблена механічна і математична моделі навантаження порід пристовбурної зони горизонтальної ділянки стовбура. Для єдиності рішення, в математичну модель даної задачі включені рівняння руху, фізичні співвідношення і рівняння спільності деформацій, а крайові умови визначені з урахуванням навантажень згідно механічної моделі деформаційної поведінки. Математична модель задачі деформаційної поведінки порід пристовбурної зони вирішена кінцево-різницевим методом, для чого розроблена спеціальна розрахункова процедура. На основі отриманих рішень дана оцінка пошкоджуваності порід пристовбурної зони горизонтального стовбура при різних модифікаціях навантаження.

Ключові слова: горизонтальна свердловина, стовбур, породи, стійкість, деформаційна поведінка, чинники

R. A. Gasanov, F. Kh. Ramazanov

Development of theoretical-calculated technology for estimation of sustainability of breeds of horizontal steam

In this paper we analyze the reasons for the disturbance of the stability of the borehole rocks of the horizontal section of the wells. For this purpose, a mechanical and mathematical model of rock loading has been developed in the near-bottomhole zone of the horizontal section of the borehole. For the uniqueness of the solution, the equations of motion, physical relationships and deformation compatibility equations are included in the mathematical model of the problem under consideration, and the boundary conditions are determined taking into account the loads according to the mechanical model of deformation behavior. The mathematical model of the problem of the deformational behavior of the rocks in the near-bottomholewell zone has been solved by a finite-difference method, for which a special calculation procedure has been developed. Based on the obtained solutions, the damage to the rocks of the near-horizontal zone of the wellborehole under different loading modifications is evaluated.

Key words: horizontal well, barrel, rocks, stability, deformation behavior, factors

Литература

1. Алиев М. М., Шипилова О. А. Расчетные модели и критерии прочности горных пород, применяемые при расчете устойчивости ствола скважины // Материалы научной сессии по итогам 2003 года. – Альметьевск: АГНИ, 2004. – С. 5.
2. Алиев М. М., Закиров А. Ф., Миннулин Р. М., Шипилова О. А. Длительная устойчивость открытых стволов эксплуатируемых наклонных скважин. // Ученые записки: сб. науч. тр. – Альметьевск: АГНИ, 2006, Т.4. – С.140–145.

3. Байдюк Б. В., Близиуков Б. Ю. Прогнозирование градиента давления устойчивости пород при разработке конструкции скважин. // Нефтяное хозяйство, 1987, № 1, С. 6–8.
4. Басарагин Ю. М., Булатов А. И. Проселков Ю. М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин. Учебно – практическое пособие. М. – Недра 2000., 680 с.

Поступила 05.07.18

References

1. Aliev, M. M., Shipilova, O. A. (2004) Raschetnye modeli i kriterii prochnosti hornykh porod, primeniaemye pri raschete ustoichivosti stvola skvazhiny [Calculation models and rock strength criteria used in calculating the stability of a wellbore] *Materialy nauchnoi sessii po itoham 2003 hoda. – Materials of the scientific session on the results of 2003.* Almetievsk: AHNI [in Russian]
2. Aliev, M. M., Zakirov, A. F., Minullin, R. M. at al. (2006) Dlitelnaia ustoichivost otkrytykh stvolov ekspluatiruemykh naklonnykh skvazhin [Long-term stability of open trunks of exploited inclined wells]. *Uchenye zapiski: sb. nauch. tr. – Scientific notes: a collection of scientific papers.* Almetievsk: AHNI [in Russian]
3. Baidiuk B. V., Blizniukov B. Yu. (1987) Prohnozirovanie hradienta davleniia ustoichivosti porod pri razrabotke konstruksii skvazhin [Forecasting the pressure gradient of rock stability in the design of wells]. *Neftianoe khoziaistvo – Oil industry.* Neftianoe khoziaistvo [in Russian]
4. Basarahyn Yu. M., Bulatov A. I. Proselkov Yu. M. (2000) *Oslozhneniia i avarii pri bureanii neftianyykh i hazovykh skvazhin. Uchebno – prakticheskoe posobie [Complications and accidents when drilling oil and gas wells. Teaching – a practical guide].* Moscow: Nedra [in Russian].