SOCAR Proceedings

Reservoir and Petroleum Engineering

journal home page: <http://proceedings.socar.az>

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНОК СКВАЖИНЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА

А.Н.Попов, Р.А.Исмаков, Ф.Н.Янгиров, А.Р.Яхин,
Абусал Юсеф, И.Д.Мухаметгалиев, Г.Л.Гаймалетдинова

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Theoretical Preconditions for Modeling Wellbore Stability and Predicting Hydraulic Fracturing

A.N.Popov, R.A.Ismakov, F.N.Yangirov, A.R.Yakhin, Abusal Yusef,

I.D.Mukhametgaliev, G.L.Gaymaletdinova

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

Abstract

One of the complex technological tasks in the process of drilling is to ensure the stability of the wellbore walls, as well as their modeling for further forecasting the state of the wellbore and the likelihood of hydraulic fracturing. This is due to the fact that most of the complications and factors affecting the equilibrium state of the wall are associated with external influences. The article discusses the mechanical and partially hydraulic aspects of solving the described problems associated with modeling the stability of the wellbore walls and predicting hydraulic fracturing. As a result of calculations, the necessary data are obtained for making a decision on the density of the drilling fluid for drilling the considered interval of rocks. The assumed model of the porous rock and the given calculation formulas make it possible to fully evaluate the influence of the formation fluid pressure on the mechanical processes in the rocks when they are opened by a well.

Keywords:

Hydraulic fracturing;
Blade bit;
Steel ball-shaped
toothed bit;
Polycrystalline diamond bit;
Laser drilling;
Impact rope drilling;
Rotary drilling.

© 2021 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

Прочностные расчеты стенок скважины имеют целью определение допустимых давлений в скважине при прогнозировании и разработке мер предупреждения ряда осложнений при бурении, таких как осыпи, обвалы, пластическое деформирование незакрепленных стенок скважины; раскрытие поглощения бурового раствора; приток пластовых флюидов и другие. Влияние пластового (порового) давления в осадочных горных породах на их напряженное состояние очевидно, но строгой методики его учета при определении компонент напряжений при расчетах скважин нет. Наибольшее распространение получила практика введения эффективного напряжения, равного разности действующего осредненного напряжения и пластового давления. С точки зрения прочностного расчета стенок скважины и их гидроразрыва интерес представляют напряжения в опасных сечениях скелета горной породы [1-3].

Естественные давления и напряжения в горных породах

С точки зрения прочностных расчетов интерес представляют компоненты напряжений, действующих в скелете горной породы. На рисунке 1 показан вырезанный в пористой горной породе единичный элемент. Сверху на единичную площадку действует геостатическое давление p_Γ . Если бы все вертикальное давление воспринималось скелетом породы, то напряжение в скелете (на горизонтальной поверхности элемента) было бы максимальным [4]:

$$\sigma_{\max} = \frac{p_\Gamma}{c}$$

c - доля единичной площади, занимаемая скелетом в рассматриваемом сечении.

При наличии флюида в порах последний воспринимает на себя часть давления, равную $p_n(1-c)$. Тогда напряжения σ_3 в скелете:

$$\sigma_3 = \frac{p_\Gamma - p_n(1-c)}{c} = \sigma_{\max} \frac{p_n(1-c)}{c} \quad (1)$$

Из формулы следует, что по мере увеличения пластового давления наблюдается уменьшение вертикальных напряжений в скелете. Если $p_n = p_\Gamma$, то $\sigma_3 = p_\Gamma$.

*E-mail: 9406622@mail.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP2021SI100508>

Рис.1. Модель элемента пористой горной породы

Рис.2. Зависимость доли скелета в расчетном сечении горной породы от ее пористости

Для определения горизонтальных напряжений в скелете уравнение (1) представим в виде двух следующих слагаемых:

$$\sigma_3 = p_n + \frac{p_\Gamma - p_n}{c} \quad (2)$$

и рассмотрим их отдельно в соответствии с принципом независимости действия сил. В результате преобразований получим, что

$$\sigma_1 = \lambda p_\Gamma + p_n(1-c)(1-\lambda) \quad (3)$$

где λ - коэффициент бокового распора горной породы.

Величины p_Γ и p_δ как компоненты горного давления характеризуют естественные напряжения в горной породе так, как если бы она была монолитной, а величины σ_1 и σ_3 - естественные напряжения в скелете пористой горной породы.

Зависимость доли скелета от пористости в расчетном сечении была получена по результатам испытаний горных пород на гидроразрыв [5] терригенных отложений:

$$c = \exp(-19.1 m^2) \quad (4)$$

где m - общая пористость горной породы в долях единицы.

График зависимости (4) приведен на рисунке 2, из которого видно, что при нулевой пористости $c = 1$, а при увеличении пористости доля скелета быстро уменьшается и асимптотически приближается к нулю. Отметим, что в бурении для прогнозирования давления гидроразрыва широко применяется формула Итона [6], учитывающая только средние значения бокового и пластового давлений в формуле (3).

Напряженное состояние горной породы вокруг вертикальной скважины

Задача о распределении упругих напряжений в горных породах, вскрытых вертикальной скважиной, осесимметрична относительно ее оси z . Расчетная схема приведена на рисунке 3.

Условие равновесия выделенного элемента описывается дифференциальным уравнением [7]:

$$\sigma_r - \sigma_t + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (5)$$

где σ_r и σ_t - радиальные и тангенциальные нормальные напряжения соответственно; r - текущий радиус (расстояние от оси скважины до рассматриваемого элемента).

Решение первое для плотных (непористых) горных пород [8]. С.Г.Лехницкий принял допущение, что $\sigma_z = p_\Gamma = \text{const}$.

Граничные условия: при $r = r_c$ $\sigma_r = p_c$; при $r \rightarrow \infty$ $\sigma_r = \sigma_t = p_\delta$. Решениями уравнения (5)

Рис.3. Расчетная схема для определения компонент напряжений вокруг вертикальной скважины

являются формулы, описывающие зависимости σ_r и σ_t от r :

$$\sigma_r = p_\delta - (p_\delta - p_c)(r_c/r)^2 \quad (6)$$

$$\sigma_t = p_\delta + (p_\delta - p_c)(r_c/r)^2 \quad (7)$$

Графики, иллюстрирующие формулы (6) и (7), приведены на рисунке 4(а – случай $|\sigma_z| > |\sigma_t| > |\sigma_r|$; б – случай $|\sigma_t| > |\sigma_z| > |\sigma_r|$), из которых следует, что наибольшие изменения напряженного состояния наблюдаются на стенке скважины. Со снижением давления в скважине уменьшаются радиальные напряжения в стенке и увеличиваются тангенциальные напряжения. В пределе тангенциальные напряжения могут превысить вертикальные σ_z вдвое (при $p_c = 0$ и при p_t величина $\sigma_t = 2\sigma_z$).

Наибольшее применение при прочностных расчетах стенок скважины находит теория прочности Мора-Кулона, в соответствии с которой предельное состояние горной породы тогда, когда достигает предельного значения максимальное касательное напряжение. Из рисунка 4 следует, что разность главных нормальных напряжений, а, следовательно, и касательные напряжения, принимают максимальные и минимальные значения на стенке скважины. Следовательно, компоненты напряжений следует вычислять при $r=r_c$. Тогда расчетные формулы примут вид:

$$\sigma_z = p_t; \sigma_r = p_c; \sigma_t = 2p_\delta - p_c \quad (8)$$

Штриховкой в клеточку показаны зоны ожидаемого предельного состояния горной породы. На рисунке 4а это кольцевые зоны, а на рисунке 4б это зоны, расположенные вдоль образующей скважины. При разрушении стенки в первом случае следует ожидать образование каверн, а во втором случае – продольное разрушение с образованием желобов.

Решение второе - для пористых горных пород. В случае непроницаемой стенки скважины формулы С.Г.Лехницкого при $r = r_c$ примут вид:

$$\sigma_z = \sigma_3; \sigma_r = p_n + \frac{p_c - p_n}{c}; \sigma_t = 2\sigma_1 - \sigma_{rc} \quad (9)$$

где σ_1 и σ_3 - естественные вертикальное и горизонтальное напряжения в скелете горной породы до вскрытия скважиной (определяются по формулам 2 и 3)

Решение третье - стенка скважины проницаемая и в ее порах по мере удаления от стенки давление изменяется от давления, равного давлению в скважине, до величины пластового давления. При получении решения сделано допущение, что давление флюидов в порах стенки скважины равно p_c . Тогда с учетом необходимых преобразований при:

$$\sigma_z = \sigma_3 - (p_c - p_n)(1 - c)/c; \sigma_r = p_c; \sigma_t = 2\sigma_1 - p_c \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) следует, что напряженное состояние в скелете стенки скважины существенно зависит не только от давления в скважине, но и от пластового давления и пористости горной породы, характеризуемой долей скелета.

Условие сохранения стенок скважины в упругом состоянии

Прочностной расчет стенок скважин проводится из двух условий:

1. сохранить стенки скважины в упругом состоянии;
2. обеспечить пластическое изменение радиуса скважины в допустимых пределах.

Ниже рассматривается только первая задача. Напряженное состояние пористых горных пород в естественном состоянии обусловлено совместным действием геостатического p_T и пластового (порового) p_P давлений.

Рассмотрим условия упругого состояния стенки скважины в соответствии с теорией прочности Мора-Кулона. Упругому состоянию горной породы будет соответствовать условие:

$$|\tau_{\max}| \leq |\tau_s| \quad (11)$$

где $\tau_{\max}$ - действующие в стенке скважины максимальные касательные напряжения; τ_s - касательные напряжения, соответствующие пределу текучести горной породы.

Зависимость τ_s от среднего нормального напряжения σ_{cp} принимается линейной:

$$\tau_s = \tau_0 + A\sigma_{cp} \quad (12)$$

где τ_0 - условное сопротивление сдвигу горной породы при $\sigma_{cp} = 0$; A - угловой коэффициент, зависящий от внутреннего трения в горной породе. В случае нелинейной зависимости τ_s от σ_{cp} ее следует заменить линейной на расчетном участке значений σ_{cp} . С учетом длительной прочности горной породы условие (11) принимает вид:

$$|\tau_{\max}| \leq k_{DL} |\tau_s| \quad (13)$$

где k_{DL} - коэффициент, учитывающий снижение прочности горных пород во времени.

Длительная прочность горных пород

Экспериментально установлено, что с увеличением времени пребывания твердого тела в неравномерном напряженном состоянии его сопротивление разрушению уменьшается и асимптотически приближается к некоторой предельной величине. Это явление получило название длительной прочности [9].

Рис.5. Изменение предела текучести горной породы во времени (кривая длительной прочности)

На рисунке 5 приведено изменение предела текучести горной породы во времени. График длительной прочности похож на усталостную кривую твердых тел. Отличием является то, что для усталостной кривой аргументом является число циклов нагружения, а для графика длительной прочности – время.

В условиях скважины процесс снижения прочности горной породы во времени ускоряется за счет наложения физико-химического воздействия бурового раствора на горную породу, окружающую скважину, а также за счет усталостных явлений от колебаний давления и температуры в скважине и взаимодействия бурильного инструмента со стенками при различных технологических операциях. Следовательно, для горных

пород стенок скважин понятие длительной прочности включает совокупность факторов, понижающих их прочность по времени.

В качестве характеристики длительной прочности горной породы принят коэффициент k_{DL} , равный отношению:

$$k_{DL} = \frac{\tau_s(t)}{\tau_s} \quad (14)$$

где τ_s - предел текучести горной породы в момент времени t . Из формулы (14) следует, что коэффициент длительной прочности характеризует изменение относительной прочности горной породы во времени. В пределе при $t \rightarrow \infty$ коэффициент длительной прочности принимает предельное значение $k_{DL\infty}$. В таблице 1 приведены значения $k_{DL\infty}$ для некоторых горных пород.

Таблица 1	
Значения $k_{DL\infty}$ горных пород при одноосном сжатии	
Горная порода	$k_{DL\infty}$
Глина	0.74
Глинистый сланец, аргиллит	0.50
Песчаник	0.64
Каменная соль	0.70
Мел	0.62
Известняк, доломит	0.74

Из таблицы 1 видно, что снижение прочности горных пород во времени возможно до двух раз. Для большинства горных пород это снижение составляет от 0.6 до 0.8 от первоначальной прочности. В расчетах принимается от 0.95 до в зависимости от ожидаемого времени от вскрытия горной породы (пласта) бурением до его обсадки трубами. При отсутствии данных о зависимости k_{DL} от t принимают $k_{DL} = k_{DL\infty}$.

В примере, иллюстрируемом рисунком 5, в горных породах действует напряжение $\tau_{\max}$. В начале $\tau_{\max} < \tau_s$ и горная порода находится в упругом состоянии. К моменту времени t_n действующее и предельное напряжения становятся равными. При дальнейшем увеличении времени неравенство изменяется на противоположное, т.е. $\tau_{\max} > \tau_s(t)$, и становится возможным разрушение горной породы. Применительно к скважине время τ_n является предельным временем бурения до начала осложнения в виде деформирования или разрушения стенок скважины при рассматриваемом напряженном состоянии. Если действующие напряжения $\tau_{\max} \leq \tau_{s\infty}$, то ствол скважины может быть открыт сколь угодно долго.

Расчет предельной зависимости по стандартным показателям прочностных свойств горной породы

В соответствии с теорией прочности Мора-Кулона предел текучести материала является функцией среднего нормального напряжения. При использовании двух стандартных показате-

лей прочностных свойств горной породы (пределов текучести при одноосном сжатии и при вдавливании штампа) эта функция может быть определена только в линейном виде (12). В случае, когда предел текучести σ_s при одноосном сжатии отличается от предела прочности σ_{pres} незначимо принимают $\sigma_s = \sigma_{pres}$.

Горные породы отличаются высокой неоднородностью и соответственно широким варьированием их показателей свойств в пределах расчетного интервала бурения. Отсюда вытекает задача определения расчетных прочностных характеристик горных пород с заданной вероятностью. Верхнее расчетное значение показателя x :

$$x_s = x + t_{sr}$$

а нижнее расчетное значение:

$$x_y = x - t_{sr}$$

где x и s - среднее арифметическое значение и среднее квадратическое отклонение показателя x ; t - параметр распределения показателя x с принятой в расчетах вероятностью. При статистическом анализе данных маловероятные события характеризуются уровнем значимости.

Односторонний уровень значимости q может составлять:

$q = 0.025$ - редкие события;

$q = 0.005$ - очень редкие события;

$q = 0.0005$ - чрезвычайно редкие события.

В бурении уровень значимости принимается 0.025. В ответственных случаях уровень значимости может быть принят равным 0.005, т. к. он характеризует «меру риска», с которым принимается то или иное техническое или технологическое решение.

В случаях сочетания n независимых случайных характеристик уровень значимости для каждой величины приближенно равен:

$$q_i = \sqrt[n]{q}$$

где q_i - уровень значимости для i -й случайной величины. В случае, когда в расчетах участвуют только два показателя свойств горной породы, например, коэффициент бокового распора λ и пористость m при общем уровне значимости $q=0.025$

$$q_i = \sqrt[q]{q} = \sqrt[2]{0.025} = 0.158$$

Отсюда следует, что расчетные величины m и λ должны определяться как границы интервала их значений с вероятностью P , равной:

$$P = 1 - 2q_2 = 1 - 2 \cdot 0.158 = 0.684$$

которой соответствует параметр нормального распределения $t \approx 1.0$. При объеме выборки n показателей свойств горных пород менее 50 следует перейти к распределению Стьюдента, значения параметров которого при $q = 0.025$ приведены в таблице 2.

Таблица 2										
Значения параметра t для сочетания двух случайных величин при числе степеней свободы $f = 2n - 2$										
f	4	6	8	10	12	14	18	20	30	50
t	1.19	1.13	1.10	1.08	1.07	1.06	1.06	1.05	1.04	1.03

Параметры A и τ_0 зависимости (12) можно определить на основании испытаний горных пород на одноосное сжатие и вдавливание штампа:

при одноосном сжатии

$$\tau_s = \frac{\sigma_{pres}}{2} \sigma_{cp} = \frac{\sigma_{pres}}{2} \quad (15)$$

при вдавливании штампа

$$\sigma_{cp} = k_{\Gamma} p_0$$

где k_1 и k_2 - коэффициенты пропорциональности, зависящие от коэффициента Пуассона μ .

Точное описание зависимостей k_1 и k_2 от μ , полученное на основании формул С.П.Тимошенко, весьма громоздко. Эти зависимости при коэффициенте корреляции не ниже 0.99 можно заменить приближенными формулами:

$$k_1 = 0.508 - 0.030 \mu \quad (17)$$

$$k_2 = 0.348 - 0.114 \mu - 0.0203 \mu^2 \quad (18)$$

где μ - среднее арифметическое значение коэффициента Пуассона при одноосном сжатии.

Ю.Ф. Алексеевым [11] показана необходимость учета масштабного эффекта при использовании в расчетах предела текучести p_0 по штампу. Стандартный диаметр образцов горных пород для испытания при одноосном сжатии 40...45 мм, а рекомендуемый средний 42 мм, тогда как диаметр штампа при стандартных испытаниях от 1.5 до 3.0 мм. Для построения зависимости от величины p_0 следует привести к диаметру штампа 42 мм. Прямые испытания на керне с таким диаметром штампа невозможны.

Нами были проведены лабораторные исследования с целью уточнения вида зависимостей p_0 от диаметра штампа d [12]. В качестве исследуемого материала были взяты блоки мрамора, песчаника и известняка, а также образец каменной соли в виде керна. На рисунке 6 приведены результаты экспериментов на известняке и песчанике, которые показали, что в области малых диаметров штампа предел текучести горных пород сначала возрастает, достигает максимума, а дальнейшее увеличение диаметра приводит к плавному снижению прочности. Зависимости p_0 от d аппроксимируются уравнениями вида:

$$P_0 = p_{0\infty} + \frac{A_1}{d} + \frac{A_2}{d^2} + \frac{A_3}{d^3} \quad (19)$$

где A_1 , A_2 , A_3 - коэффициенты уравнения регрессии (19).

При этом испытания стандартными штампами дают значения p_0 близкие к максимальному p_{0m} .

Рис.6. Зависимости p_0 от d для известняка (а) и песчаника (б)
1 - измеренные значения p_0 ; 2 - асимптота; 3 - линия регрессии

Для уточнения величины p_{0m} рекомендуется провести измерения p_0 при вдавливании штампов диаметром от 1.5 до 5.0 мм. Анализ результатов испытаний позволил поучить формулы для приведения среднего арифметического значения и среднего квадратического отклонения от p_{0m} к p_{042} :

$$p_{042} = 0.443 p_{0m} - 0.000166 p_{0m}^2 \quad (20)$$

$$s_{42} = s_m \frac{p_{042}}{p_{0m}} \quad (21)$$

где p_{0m} и s_m - среднее арифметическое значение и среднее квадратическое отклонение максимального значения предела текучести породы; p_{042} и s_{42} - среднее арифметическое значение и среднее квадратическое отклонение приведенного к диаметру штампа 42 мм значения предела текучести породы.

Параметр A рассчитывается по данным о средних арифметических значениях предела прочности на одноосное сжатие и предела текучести горной породы по штампу, приведенному к диаметру 42 мм, т.е. с учетом масштабного эффекта. Для этого на основании формулы (12) составляется система двух уравнений, решение которой относительно A следующее:

$$A = (k_1 p_0 - 0.5 \sigma_{pres}) / (k_2 p_0 - 0.5 \sigma_{pres}) \quad (22)$$

Возможность выхода стенки скважины из упругого состояния тем выше, чем меньше прочность породы. Поэтому параметр τ_0 определяется по нижним значениям показателей p_{0H} , s_{presH} . Тогда согласно уравнению (12) и условиям (15) и (16)

$$\tau'_0 = (k_1 - A k_2) p_{0H} \quad (23)$$

$$\tau''_0 = 0.5(1 - A) \sigma_{presH} \quad (24)$$

Из двух значений τ_0 выбирается меньшее. Итогом расчета будет уравнение (12), записанное с числовыми коэффициентами, например, при $A=0.108$ и $\tau_{0min}=56.2$ МПа:

$$\tau_s = 0.108 \sigma_{cp} + 56.2 \text{ МПа}$$

которое будет характеризовать прочностные свойства горной породы рассматриваемого интервала бурения.

Стандартные показатели прочностных свойств горной породы оформляются относительно осредненных напряжений. Нетрудно показать, что в случае определения прочностных характеристик скелета, уравнение (12) примет вид:

$$\tau_{sc} = \frac{\tau_0}{c} + A \sigma_{cp} \quad (25)$$

где τ_{sc} - предел текучести скелета горной породы; c - доля единичной площади, занимаемая скелетом в рассматриваемом сечении. Формула (25) позволяет использовать общепринятые параметры τ_0 и A зависимости (12) в случаях расчетов по напряжениям в скелете породы, но с учетом доли скелета.

Расчет предельных давлений в вертикальной скважине

Из формул (8) - (10) следует, что регулирование компонент напряжений, действующих в стенке скважины, можно осуществлять только за счет изменения давления бурового раствора в скважине, которое в общем случае равно:

$$p_{SH} \leq p_{CD} \leq p_{SB} \quad (26)$$

p_{SH} и p_{SB} - динамическое и статическое давление бурового раствора в скважине на расчетной глубине; p_y - давление бурового раствора на выходе

из скважины в случае бурения с герметизированным устьем (под давлением); Δp - динамическое изменение давления бурового раствора в скважине при работе насосов или при спуске инструмента в скважину (со знаком плюс) и при подъеме инструмента (со знаком минус).

Результаты расчета удобно получить в виде конечного регулируемого параметра, т. е. в виде предельных давлений раствора в скважине. Тогда условие сохранения стенок в упругом состоянии принимает вид:

$$p_{SH} \leq p_{CD} \leq 3p_{SB} \quad (27)$$

p_{SH} и p_{SB} - предельные давления жидкости в скважине.

Отличие касательных напряжений в окрестности скважины от естественных обусловлено неравенствами естественных напряжений и давления бурового раствора в скважине (p_c). Заведомо соотношение их величин неизвестно, а поэтому расчет проводится для трех случаев:

- 1) если $|\sigma_z| > |\sigma_t| > |\sigma_R|$, то $\tau_{\max} = (\sigma_z - \sigma_R)/2$; $\sigma_{cp} = (\sigma_z + \sigma_R)/2$;
- 2) если $|\sigma_t| > |\sigma_z| > |\sigma_R|$, то $\tau_{\max} = (\sigma_t - \sigma_R)/2$; $\sigma_{cp} = (\sigma_t + \sigma_R)/2$;
- 3) если $|\sigma_z| > |\sigma_R| > |\sigma_t|$, то $\tau_{\max} = (\sigma_z - \sigma_t)/2$; $\sigma_{cp} = (\sigma_z + \sigma_t)/2$,

где σ_z , σ_R и σ_t - вертикальная, тангенциальная и радиальная компоненты напряжений, действующие в стенке скважины и определяемые по формулам (10), в которых учтено не только горное, но и пластовое давления. Первые два расчета дают величины p_{s1} и p_{s2} , ограничивающие давление бурового раствора снизу, а поэтому из двух выбирается большее и обозначается p_{SH} . Третий расчет дает ограничение давления бурового раствора сверху, а поэтому обозначено $p_{s3} = p_{SH}$.

Вывод расчетных формул проведен путем решения соответствующих систем уравнений при условии неблагоприятного сочетания величин пористости и коэффициента бокового распора. Полученные расчетные формулы для определения в случае непроницаемых (закольматированных) стенок скважины имеют вид:

$$p_{s1} = p_{\Pi}(1 - c_H) + [(\sigma_H \sigma_3(1 - k_{DA}) - 2k_{DA} \tau_0) / (1 + k_{LK} A)] \quad (28)$$

$$p_{s2} = p_{\Pi}(1 - c_H) + c_H \sigma_{1B}(1 - k_{DA}) - k_{DA} \tau_0 \quad (29)$$

$$p_{s3} = p_{\Pi}(1 - c_H) + 2c_H \sigma_{1H} + [2k_{DA} \tau_0 - c_H \sigma(1 - k_{DA})] / (1 + k_{DA} A) \quad (30)$$

В формулах (28)–(30)

$$\sigma_3 = p_{\Pi} + (p_{\Gamma} - p_{\Pi}) / c_H$$

$$\sigma_{1H} = \lambda_H p_{\Gamma} + p_{\Pi}(1 - \lambda_H)(1 - c_H)$$

$$c_H = \exp(-19.16 m_B^2)$$

Верхние и нижние значения параметров рассчитываются в соответствии с принятой надежностью оценок.

Результаты расчетов по формулам (28) - (30) проиллюстрированы рисунком 7, из которого видно, что все предельные давления бурового раствора в скважине существенно изменяются с изменением относительной длительной прочности горных пород, а, следовательно, существенно изменяются во времени. В нормальных условиях бурения нижнее давление увеличивается со снижением k_{DA} , а верхнее давление уменьшается (рис.7а). Желательно, чтобы давления в скважине находилось в заштрихованной области, т.к. область давлений, в которой стенки скважины находятся в упругом состоянии, сужается. Если графики нижнего и верхнего давлений пересекаются, то это означает, что при дальнейшем снижении упругое состояние горных пород невозможно (рис.7б) при любом давлении жидкости в скважине. Величина $[k_{DA}]$ ограничивает время бурения скважины без осложнений. В случае вязких горных пород упругое состояние стенок скважины имеет место только сразу после вскрытия скважиной (рис.7в).

Дополнительные расчеты величин p_s для случая проницаемых стенок скважины показали, что имеет место незначительное уменьшение их величин, не выходящее за пределы точности оценки параметров расчета. Основное влияние проницаемости стенок скважины на предельные давления обусловлено увеличением скорости снижения длительной прочности горной породы во времени.

Рис.7. Влияние относительной длительной прочности горной породы на величины предельных давлений в скважине

Заключение

Предполагаемая модель пористой горной породы и расчетные формулы позволяют полнее оценить влияние давления пластового флюида на механические процессы в горных породах при вскрытии их скважиной. В дальнейшем эти расчеты могут стать основой для решения не только качественных, но и количественных задач технологии бурения скважин.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2020-900 в рамках программы развития НЦМУ.

Литература

1. Алимжанов, М. Т. (1982). Устойчивость равновесия тел и задачи механики горных пород. *Алма-Ата: Наука*.
2. Сеид-Рза, М. К., Фаталиев, М. Д., Фараджев, Т. Г. (1972). Устойчивость горных пород при бурении на большие глубины. *Москва: Недра*.
3. Турчанинов, И. А., Иофис, М. А., Каспарян, Э. В. (1977). Основы механики горных пород. *Москва: Недра*.
4. Попов, А. Н., Головкина, Н. Н. (2001). Прочностные расчеты стенок скважины в пористых горных породах. *Уфа: УГНТУ*.
5. Сельващук, А. П., Бондаренко, А. П., Ульянов, М. Г. (1981). прогнозирование градиента давления открытия поглощений при бурении скважин на месторождениях Восточной Украины. Обзор информации. Серия «Бурение газовых и газоконденсатных скважин». *Москва: ВНИИЭГазпром*.
6. Eaton, B. A. (1969). Fracture gradient friction and its application in oil field operations. *Journal of Petroleum Technology*, 21(10), 1353–1360.
7. Лехницкий, С. Г. (1938). Определение напряжений в упругом изотропном массиве вблизи вертикальной цилиндрической выработки круглого сечения. *Известия АН СССР, ОТН*.
8. Желтов, Ю. П. (1966). Деформации горных пород. *Москва: Недра*.
9. Овчинников, В. П. (2017). Технология бурения нефтяных и газовых скважин: учебник для студентов вузов. Т. 1. Тюмень: ТюмГНГУ.
10. Баклашов, И. В., Картозия, Б. А. (1975). Механика горных пород. *Москва: Недра*.
11. Алексеев, Ю. Ф. (1968). Использование данных по механическим и абразивным свойствам горных пород при бурении скважин. *Москва: Недра*.
12. Исмаков, Р. А., Попов, А. Н., Головкина, Н. Н. (2004). Определение приведенного предела текучести горной породы по штампу с учетом масштабного эффекта. *Известия вузов. Горный журнал. Уральское горное обозрение*, 4, 127-131.

References

1. Alimzhanov, M. T. (1982). Ustoi'chivost' ravnovesiia tel i zadachi mehaniki gorny'kh porod. *Alma-Ata: Nauka*.
2. Seid-Rza, M. K., Fataliev, M. D., Faradzhev, T. G. (1972). Ustoi'chivost' gorny'kh porod pri burenii na bol'shie glubiny'. *Moskva: Nedra*.
3. Turchaninov, I. A., Iofis, M. A., Casparian, E'.V. (1977). Osnovy' mehaniki gorny'kh pord. *Moskva: Nedra*.
4. Popov, A. N., Golovkina, N. N. (2001). Prochnostny'e raschety' stenok skvazhiny' v poristy'kh gorny'kh porodakh. *Ufa: UGNTU*.
5. Sel'vashchuk, A. P., Bondarenko, A. P., Ul'ianov, M. G. (1981). Prognozirovanie gradienta davleniia otkry'tiia pogloshchenii' pribureniiskvazhinamestorozhdeniiaakh Vostochnoi' Ukrainy. Obzor informatsiya. Seiya «Burenie gazovy'kh i gazokondensatny'kh skvazhin». *Moskva: VNIIE'gazprom*.
6. Eaton, B. A. (1969). Fracture gradient friction and its application in oil field operations. *Journal of Petroleum Technology*, 21(10), 1353–1360.
7. Lekhnitskii', S. G. (1938). Opredelenie napriazhenii' v uprugom izotropnom massive vblizi vertikal'noi' tcilindricheskoi' vy'rabotki kruglogo secheniia. *Izvestiya AN SSSR, OTN*.
8. Zheltov, Yu. P. (1966). Deformatcii gorny'kh porod. *Moskva: Nedra*.
9. Ovchinnikov, V. P. (2017). Tekhnologiia bureniiia neftiany'kh i gazovy'kh skvazhin: uchebnik dlia studentov vuzov. T. 1. *Tiumen: TiumGNGU*.
10. Baclashov, I. V., Kartoziia, B. A. (1975). Mehanika gorny'kh porod. *Moskva: Nedra*.
11. Alekseev, Yu. F. (1968). Ispol'zovanie danny'kh po mehanicheskim i abrazivny'm svoi'stvam gorny'kh porod pri burenii skvazhin. *Moskva: Nedra*.
12. Ismakov, R. A., Popov, A. N., Golovkina, N. N. (2004). Opredelenie privedennogo predela tekuchesti gorno'i' porody' po shtampu s uchetom masshtabnogo e'ffekta. *Izvwstiya vuzov. Gorny'i' zhurnal. Ural'skoe gornoe obozrenie*, 4, 127-131.

Теоретические предпосылки к вопросу моделирования устойчивости стенок скважины и прогнозирования гидроразрыва

**А.Н.Попов, Р.А.Исмаков, Ф.Н.Янгиров, А.Р.Яхин,
Абусал Юсеф, И.Д.Мухаметгалиев, Г.Л.Гаймалетдинова**
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия

Реферат

Одной из сложных технологических задач в процессе бурения является обеспечение устойчивости стенок ствола скважины, а также их моделирование для дальнейшего прогнозирования состояния ствола и вероятности гидроразрыва. Это связано с тем, что большинство осложнений и факторов влияющих на равновесное состояние стенки связано с внешним воздействием. В статье рассмотрены механический и частично гидравлический аспекты решения задач связанных с моделированием устойчивости стенок скважины и прогнозированием гидроразрыва. В результате расчетов получены необходимые данные для принятия решения о плотности бурового раствора для бурения рассматриваемого интервала горных пород, также для принятия других технологических решений. Предполагаемая модель пористой горной породы и приведенные расчетные формулы позволяют полнее оценить влияние давления пластового флюида на механические процессы в горных породах при вскрытии их скважиной.

Ключевые слова: устойчивость стенок скважины; прогнозирование гидроразрыва; геомеханика; прочностной расчет стенок; бурение без осложнений.

Quyu divarlarının dayanıqlılığının modelləşdirilməsi və hidravlik yarılmının proqnozlaşdırılması məsələləri üçün nəzəri şərtlər

**A.N.Popov, R.A.İsmakov, F.N.Yanqirov, A.R.Yaxin,
Abusal Yusef, İ.D.Muhametqaliyev, Q.L.Qaymaletdinova**
Ufa Dövlət Neft Texniki Universiteti, Ufa, Rusiya

Xülasə

Qazma prosesindəki mürəkkəb texnoloji məsələlərdən biri quyu lüləsinin divarlarının dayanıqlılığının təmin edilməsi, həmçinin quyu lüləsinin vəziyyətinin və hidravlik yarılm ehtimalının proqnozlaşdırılması üçün onların modelləşdirilməsidir. Buna səbəb lülə divarının tarazlıq vəziyyətinə təsir edən amillərin və mürəkkəbləşmələrin əksəriyyətinin xarici təsirlərlə bağlı olmasıdır. Məqalədə quyu divarlarının dayanıqlılığının modelləşdirilməsi və hidravlik yarılmının proqnozlaşdırılması məsələlərinin mexaniki və qismən hidravliki aspektlərdən həllinə baxılmışdır. Hesablamalar nəticəsində süxurların baxılan intervalının qazılması üçün nəzərdə tutulan qazma məhlulunun sıxlığı barədə qərarın qəbul edilməsi, həmçinin digər texnoloji qərarların verilməsi üçün zəruri məlumatlar əldə edilmişdir. Təklif olunan məsaməli süxur modeli və verilmiş hesablama düsturları quyu qazması zamanı lay suyu təzyiqinin süxurlardakı mexaniki proseslərə təsirini daha dolğun qiymətləndirməyə imkan verir.

Açar sözlər: quyu divarının dayanıqlılığı; hidravlik yarılmının proqnozlaşdırılması; geomexanika; divarların davamlılıq hesablaması; mürəkkəbləşmələrsiz qazıma.