

Содержание

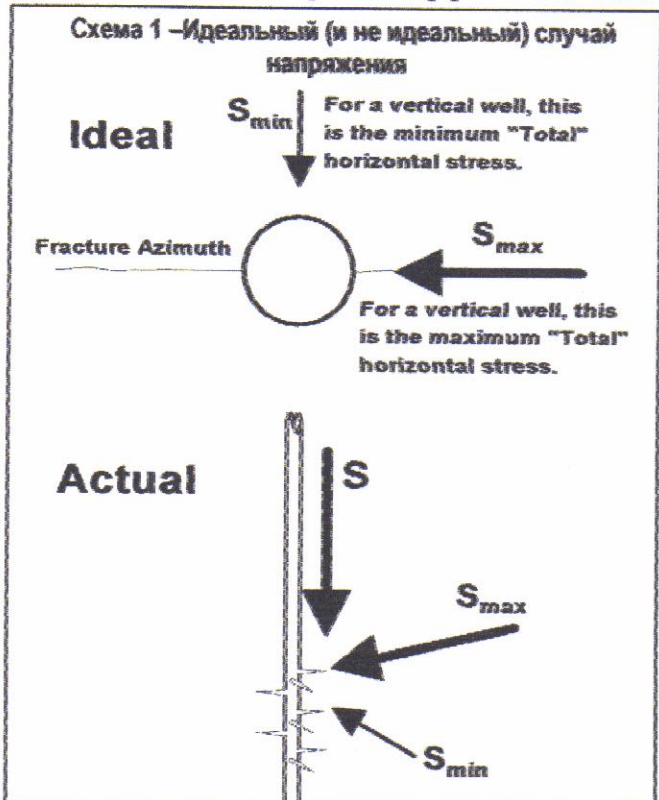
Введение	1
Напряжения в открытом стволе (непроникающие жидкости)	1
Проникающие жидкости	2
Ранее образовавшиеся трещины	4
Локальные напряжения смыкания	4
Библиография	4

Введение

Когда гидравлическая трещина сформировалась (и, если нужно, переориентировалась перпендикулярно направлению минимального напряжения), роль напряжения смыкания достаточно упрощается. Однако процесс инициации трещины, который предшествует собственно гидроразрыву, может варьироваться от достаточно простого до очень сложного. Настоящее обсуждение затрагивает процесс образования трещины для простого (но распространенного случая) – вертикальных скважин. Если говорить более точно, настоящее обсуждение касается скважин, направление ствола которых параллельно какому-либо основному горному напряжению (лобому). Таким образом, рассматриваться будут также и горизонтальные скважины, если их ствол параллелен максимальному или минимальному горизонтальному горному напряжению.

Для таких простых случаев горных напряжений инициация трещины в приствольной зоне всегда рассматривается с позиции поведения открытого ствола, и в данном случае прецедент не нарушается. В таких случаях распределение напряжений в приствольной зоне (до момента инициации трещины) обусловлено двумя напряжениями, действующими перпендикулярно стволу (как изображено на схеме 1). Однако, как показано на диаграмме, в реальной ситуации еще нужно принимать во внимание каналы перфорационных отверстий, хотя значения давления разрыва

рассчитаны для идеальных условий открытого ствола, поэтому должны рассматриваться в качестве базовых положений и признаков общего характера поведения. Реальная ситуация намного сложнее, как рассматривается Варпински. [1] Она еще более



осложняется при кривизне ствола скважин [2], или еще более усугубляется при наличии небольших естественных или образованных во время бурения трещин. (Как кратко обсуждается ниже).

Распределение напряжений в открытом стволе (непроникающая жидкость)

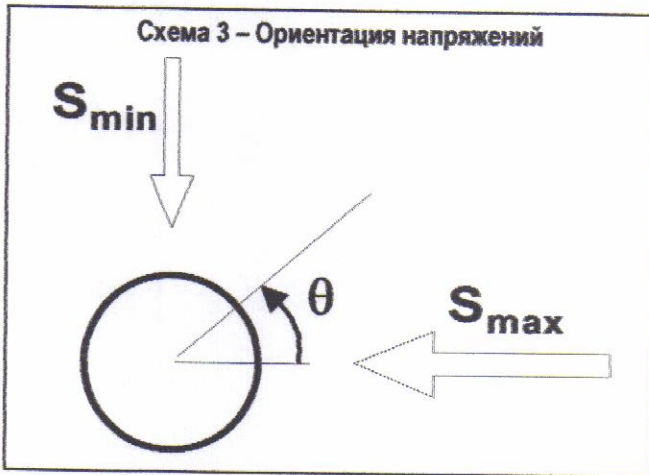
Идеальный случай распределения напряжений вокруг ствола (для проникающей и непроникающей жидкости) рассматривается Хэймсоном [3]. Горные напряжения дальней зоны (S_{max} и S_{min} на диаграмме) наряду с пластовым давлением создают концентрацию напряжения сжатия вокруг ствола. Т.е. кольцевое напряжение, или касательное напряжение по окружности, препятствующее

инициации трещины, как правило, больше, чем S_{min} . У стенки ствола кольцевое напряжение можно выразить так

$$S_{\theta} = \sigma_{\theta} + p_o = \frac{S_{max} + S_{min} - 2p_o}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + p_o \quad (1)$$

$$= \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + p_o$$

где σ_{θ} эффективное окружное напряжение, (т.е., напряжение, которое фактически влияет на матрицу породы = $S - p_o$, $\sigma_{max} = S_{max} - p_o$, и $\sigma_{min} = S_{min} - p_o$), θ - угол, как определяет диаграмма 2, " p_o " - пластовое давление, а касательное напряжение рассматривается как положительное.



Внутреннее давление в стволе скважины, P_w , затем создает общее окружное растягивающее напряжение вокруг ствола, которое можно описать как

$$S_{\theta} = -\frac{r_w^2 r_c^2}{r^2 (r_c^2 - r_w^2)} (P_w - p_o) - \frac{r_w^2}{r_c^2 - r_w^2} (P_w - p_o) \quad (2)$$

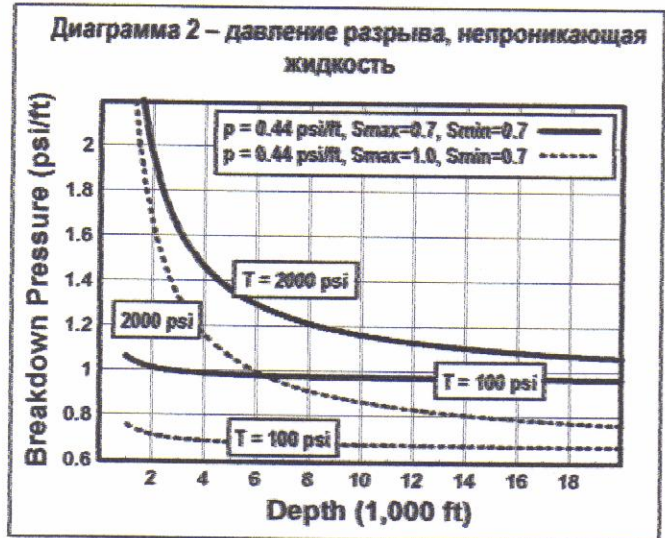
которое при большом значении r_c (скажем, $r_c > 10 r_w$) становится равным следующему

$$S_{\theta} = -\frac{r_w^2}{r^2} (P_w - p_o) \quad (3)$$

Затем два выражения (уравнения 1 и 3) при их комбинации дают окончательное суммарное напряжение (для непроникающих жидкостей) следующим образом:

$$S_{\theta} = -\frac{r_w^2}{r^2} (P_w - p_o) + \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + p_o \quad (4)$$

А эффективное напряжение, действующее на породу, выражается следующим образом:



$$\sigma_{\theta} = S_{\theta} - p_o = -\frac{r_w^2}{r^2} (P_w - p_o) + \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (5)$$

Когда данное эффективное напряжение достигнет предела прочности породы на растяжение $-T$, происходит инициация трещины. Первоначально она будет ориентирована перпендикулярно минимальному напряжению, т.е. при $r = r_w$ и $\theta = 0$. При таком ориентировании эффективное напряжение в приствольной части выражается так:

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_{min} - \sigma_{max} - P_w + p_o = -T$$

Отсюда получаем давление разрыва

$$P_w = (3\sigma_{min} - \sigma_{max}) + p_o + T \quad (6)$$

Графически данное соотношение представлено на диаграмме 3 с диапазоном возможных значений напряжений и предела прочности (хотя он для большинства пород мал даже без присутствия ранее созданных трещин). Особый интерес на диаграмме вызывает большая разница между S_{\max} и S_{\min} , давление гидроразрыва может оказаться ниже минимального напряжения породы (S_{\min}).

Проникающая жидкость

В рассмотренном случае предполагалось, что пластовое давление, p_o , везде постоянное исходя из допущения, что жидкость ствола была совершенно непроникающая. Если жидкость закачки может проникнуть в проницаемый пласт, то нагнетание склонно повышать поровое давление вокруг ствола, в то время как последний находится под давлением. Локальное увеличение порового давления, в свою очередь, склонно оказывать противодействие высокой концентрации суммарного сжимающего напряжения, созданного горными напряжениями дальнего действия (σ_{\max} и σ_{\min}), как в уравнении (1). Фактически рост локального порового давления вызывает эффективное растягивающее напряжение, представленное формулой:

$$S_{\theta} = -\frac{\alpha(1-2\nu)}{(1-\nu)} \frac{1}{r^2} \times \left[\frac{r^2 + r_w^2}{r_e^2 - r_w^2} \int_{r_w}^{r_e} \Delta p(r) r dr + \int_{r_w}^r \Delta p(r) r dr - \Delta p(r) r^2 \right] \cdot (7)$$

Допуская, что r_e - значение большое по сравнению с r_w , и рассматривая напряжение в пристволевой части ($r = r_w$), сокращаем выражение до следующего вида:

ПРИМЕЧАНИЕ: Влияние вышеуказанного « r_e » объясняет, почему иногда простое удержание высокого давления на пласт может способствовать инициации разрыва. Со временем r_e продолжает увеличиваться, а это приводит к уменьшению давления разрыва.

$$S_{\theta} = +\frac{\alpha(1-2\nu)}{(1-\nu)} \Delta p(r) = \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} (P_w - p_o) \cdot (8)$$

В этих отношениях $\Delta p(r) = p(r) - p_o$, ν - коэффициент Пуассона ($0 < \nu < 0.5$), а α - порозластическая константа ($\alpha = 1 - C_R/C_B$). Для большинства пластов отношение сжимаемости матрицы породы, C_R , к общей сжимаемости пласта, C_B , очень незначительна, т.е., $\alpha \approx 1$. Физически, $\phi < \alpha < 1$, где ϕ - пористость пласта. Для некоторых очень жестких пластов с низкой пористостью, таких как

кварцевых аргилитов, α может быть намного меньше чем 1 (возможно, порядка от 0.2 до 0.3).

Объединяя (4) и (7) (при $r = r_w$, $\theta = 0$, и $r_e > 10 r_w$) получаем (для проникающей жидкости) суммарное окружное напряжение на стенке коллектора

$$S_{\theta} = -(P_w - p_o) + 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + p_o + \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} (P_w - p_o) \quad (9)$$

На стенке коллектора эффективное окружное напряжение будет равно

$$\sigma_{\theta} = S_{\theta} - P_w = -(P_w - p_o) + 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + p_o + \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} (P_w - p_o) - P_w \quad (10)$$

Трещина образуется при σ_{θ} равном пределу прочности на растяжение, $\sigma_{\theta} = -T$

$$\sigma_{\theta} = -T = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} - (2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}) (P_w - p_o) \quad (11)$$

или

$$P_w = \frac{3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + T}{(2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu})} + p_o \quad (12)$$

есть давление гидроразрыва для проникающей жидкости. В целом, оно будет значительно ниже, чем давление, необходимое для непроникающей жидкости. *Возможно, поэтому малый объем кислоты способствует гидроразрыву проблемных пластов.* Проблема может объясняться закупоркой пласта и/или перфораций, такое поведение разрыва, как в данном случае, характерно при непроникающей жидкости. Кислоты, во-первых, относятся к очень проникающим жидкостям, а во-вторых, способны очистить перфорационные отверстия или другим способом улучшить контакт ствола с пластом. При поведении с проникающей жидкостью можно существенным образом уменьшить давление гидроразрыва пласта.

Некоторые типичные значения гидроразрыва для проникающей жидкости даны на Диаграмме 4.

Также можно сравнить давление разрыва для проникающей и непроникающей жидкости. Можно сделать вывод о значительном сокращении давления разрыва при проникающей жидкости в зависимости от широкого ряда условий.

Диаграмма 4 – давление разрыва, непроникающая жидкость

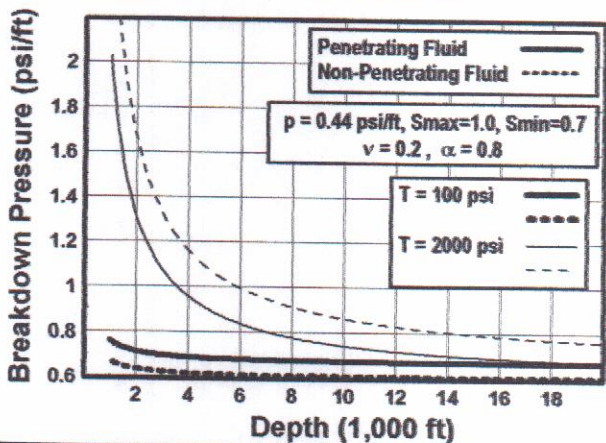
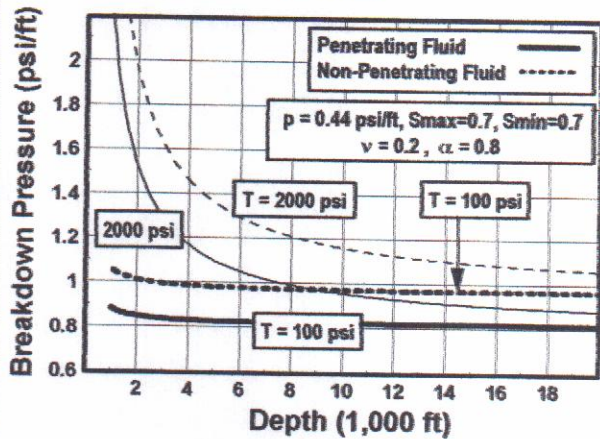
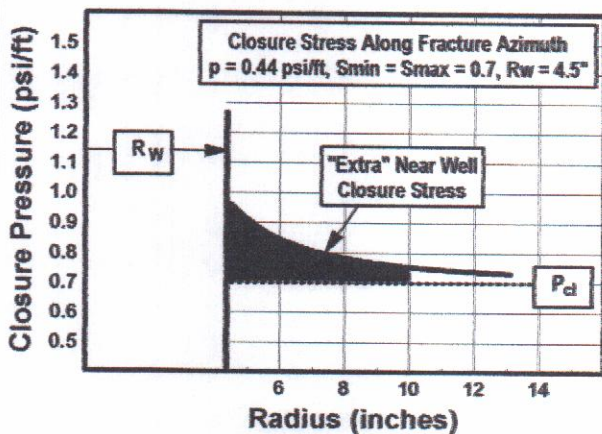


Диаграмма 5 – Приствольное напряжение смятия



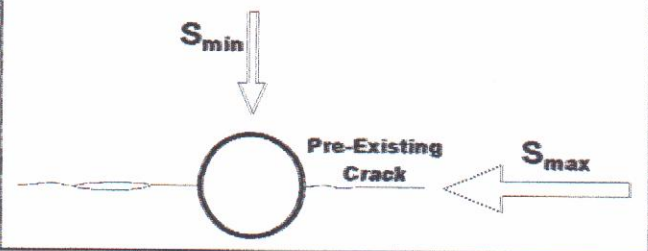
Влияние ранее существовавших трещин

Распределение локального напряжения смятия

Ранее существовавшие трещины (естественные или образовавшиеся в процессе бурения) могут оказывать значительное влияние на гидроразрыв. Такой важный эффект зависит от природы распределения напряжения смятия в приствольной зоне. На диаграмме 5 изображено типичное распределение напряжения смятия в приствольной зоне. (при выстраивании напряжения смятия вдоль предпочтительной ориентации трещины, $\theta = 0$).

Это нам показывает, что напряжение смятия непосредственно в приствольной зоне на 50% больше, чем фактическое значение напряжения смятия (0.7 psi/фут в данном случае). Однако данное избыточное напряжение смятия исчезает довольно быстро (уменьшаясь с $1/r^2$) таким образом, что через несколько дюймов от ствола напряжение смятия главным образом возвращается к фактическому уровню. Такое локальное распределение создает возможность для первоначального открытия трещины НА УДАЛЕНИИ от ствола – если создан механизм предпочтительной миграции давления ствола скважины за пределы локальной клетки напряжения.

Диаграмма 5 – Вскрытие трещины на удалении от ствола



Существующие трещины, образованные естественным путем или в результате бурения, могут обеспечить такой механизм. Трещина (даже будучи закрытой) создает улучшенную проницаемость вдоль своего направления, давая путь утечкам давления из ствола. В конечном итоге, это давление может инициировать вскрытие ранее существовавших трещин, если его величина слегка превышает нормальное напряжение смятия (S_{min}), как показано на диаграмме 3. Такая трещина затем может продолжить развитие в направлении к стволу при гораздо более низком давлении, чем требуется

для открытия трещины непосредственно в
приствольной части.

Библиография

1. Warpinski, N. R., "Investigation of the Accuracy and Reliability of In Situ Stress Measurements Using Hydraulic Fracturing in Perforated Cased Holes," Proceedings 24th U. S. Symposium on Rock Mechanics, Texas A&M University, College Station, Texas, June 1983.
2. Bradley, deviated well stresses
3. Haimson, B. E. and Fairhurst, C., "Initiation and Extension of Hydraulic Fractures in Rocks," SPE Journal, September 1967.