

УДК 622.276

АНАЛИЗ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА

А. М. Свалов

*Институт проблем нефти и газа РАН,
E-mail: svalov@ipng.ru, ул. Губкина, 3, 119333, г. Москва, Россия*

При гидроразрыве продуктивных пластов в процессе разработки месторождений нефти и газа, а также при дегазации угольных пластов трещины гидроразрыва закрепляются твердыми частицами — проппантом, предотвращающим их смыкание под действием сжимающих напряжений в горной породе. Показано, что помимо бокового горного давления сжимающие напряжения в трещине обусловлены дополнительным сжатием породы при формировании трещины и сжатием породы в депрессионной зоне, образующейся при притоке пластового флюида к этой трещине. Действие сжимающих напряжений в депрессионной зоне может регулироваться снижением темпа роста депрессии во времени. Такой способ снижения напряжений сжатия в трещине наиболее эффективен при разработке продуктивных пластов, а также при дегазации угольных пластов неглубокого залегания. Сжимающие напряжения в депрессионной зоне сопоставимы с боковым горным давлением, что позволяет при поэтапном росте депрессии на пласт удерживать напряженно-деформированное состояние породы в окрестности трещины гидроразрыва в пределах обратимого упругого деформирования и предотвращать смыкание трещины с необратимым вдавливанием частиц проппанта в породу.

Трещины гидроразрыва, нефтяные, газовые и угольные пласты, сжимающие напряжения

DOI: 10.15372/FTPRPI20200506

В настоящее время одним из основных методов стимулирования притока пластового флюида к добывающим скважинам в нефтяной и газовой промышленности является гидроразрыв продуктивного пласта. Этот метод активно применяется и для интенсификации процессов дегазации угольных пластов [1, 2]. Для закрепления сформированной трещины в нее закачивается проппант — частицы твердого материала, не позволяющие берегам трещины сомкнуться под действием сжимающих напряжений в породе. При превышении пределов упругости породы частицы проппанта начинают необратимо вдавливаются в пластически деформирующуюся породу, что приводит к снижению эффективного проходного сечения трещины или к ее полному смыканию. Так, технология многостадийного гидроразрыва пласта, успешно применяемая для разработки месторождений сланцевой нефти в США, не показала ожидаемой эффективности при разработке месторождений баженовской свиты в Западной Сибири. Одна из причин этого — смыкание трещин гидроразрыва в интервалах пластически деформирующихся пропластков, препятствующих вертикальному движению пластового флюида по трещинам к стволу горизонтальной скважины.

Важно отметить, что сжимающие напряжения в трещине возникают не только от действия фактора бокового горного давления. Формирование трещины и закрепление ее пропантом приводит к “раздвиганию” породы, окружающей трещину, и к соответствующему дополнительному ее сжатию. Третьим фактором, приводящим к появлению сжимающих напряжений, является то, что при отборе пластового флюида вокруг трещины формируется зона депрессии, т. е. зона пониженного пластового давления. Действие этого фактора сжатия породы, в отличие от действия первых двух, особенно важно с позиций возможностей снижения его влияния на процесс сжатия трещины. Увеличение размеров депрессионной зоны приводит к перераспределению напряжений сжатия — сжимающие продольные напряжения в продуктивном пласте уменьшаются при их перераспределении на кровлю и подошву продуктивного пласта.

В дальнейшем для анализа особенностей действия сжимающих напряжений в трещине будем использовать уравнения упругого деформирования породы в рамках теории эффективных напряжений в насыщенной пористой среде [3–6] в приближении плоскодеформированного состояния породы. Такое приближение обосновано тем обстоятельством, что длина трещины в пласте измеряется десятками и сотнями метров, что значительно превышает вертикальный размер трещины, ограничиваемый толщиной продуктивного пласта. Предположим, что распределение напряжений в породе вокруг трещины гидроразрыва примерно одинаково вдоль всей ее длины, по крайней мере в центральной части трещины, и зависит только от вертикальной координаты z и продольной x .

При такой постановке задачи для аналитической оценки напряжений, обусловленных формированием дополнительного объема в упругой среде, т. е. действием второго фактора сжатия породы, воспользуемся классическим решением плоской задачи теории упругости, описывающим распределение напряжений в щели длиной L , рассматриваемой как предельное положение вытянутой эллиптической щели, с шириной раскрытия в средней части, равной δ , и давлением P , приложенным изнутри к берегам щели:

$$P = E \frac{\frac{\delta}{L}}{2(1-\nu^2)} \sim E \frac{\frac{\delta}{L}}{2}, \quad (1)$$

где E , ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона упругой среды; L — длина щели [7–9].

Из (1) следует, что чем меньше длина щели, тем большее давление необходимо приложить к ее берегам, чтобы раскрыть щель на ширину δ в ее средней части. Предполагая, что длина трещины гидроразрыва вдоль пласта достаточно велика, чтобы использовать указанное решение задачи в плоской постановке, за длину щели L в (1) примем ее вертикальный размер. Тогда при $L \sim 10$ м, $E \sim 10^4$ МПа, $\delta \sim 3-4$ мм из (1) следует, что давление P на берегах трещины будет измеряться величиной порядка 1–2 МПа. Полученные оценки показывают, что характерное дополнительное напряжение, сжимающее трещину и обусловленное “раздвиганием” горной породы, равно примерно одному-двум десяткам атмосфер.

Для оценки напряжений сжатия, обусловленных формированием депрессионной зоны вокруг трещины при притоке к ней пластового флюида, будем использовать уравнения пороупругости также в плоской постановке.

На рис. 1 представлен продуктивный пласт 1, условный фронт 2 распространения депрессионной зоны от трещины гидроразрыва 3 в этом пласте, отмечены кровля и подошва 4 продуктивного пласта; x , z — продольная и вертикальная координаты. Принято, что в направлении оси координат, направленной перпендикулярно плоскости, трещина распространяется до бесконечности и распределение напряжений в породе имеет плоско-деформированный характер, т. е. напряжения в породе зависят только от координат x и z . Отметим, что левая часть рисунка, симметричная относительно оси z , не изображена.

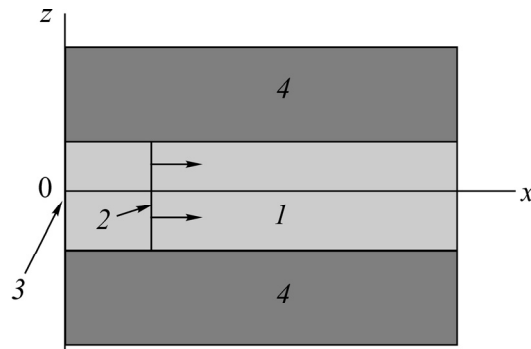


Рис. 1. Схематичное изображение вертикального разреза продуктивного пласта (1), границы депрессионной зоны (2), трещины гидроразрыва в пласте (3), кровли и подошвы пласта (4)

Для численного расчета напряжений использовались следующие уравнения пороупругости в плоской постановке:

$$\begin{aligned} \sigma_{x,x} + \tau_{xz,z} &= P_{,x}, \quad \tau_{xz,z} + \sigma_{z,z} = 0, \\ \sigma_x &= \lambda I + 2\mu u_{,x}, \quad \sigma_z = \lambda I + 2\mu w_{,z}, \quad \tau_{xz} = \mu(u_{,z} + w_{,x}), \\ I &= u_{,x} + w_{,z}, \quad \lambda = E \frac{\nu}{1+\nu} (1-2\nu), \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь σ_x , σ_z , τ_{xz} — нормальные напряжения в породе в направлениях x и z и касательное напряжение; u , w — смещения породы в направлениях x и z ; λ , μ — параметры Ламе. Знак “запятой” в индексах означает операцию дифференцирования по переменной, следующей за этой запятой. Функция $P(x)$ описывает распределение давления пластового флюида в зоне депрессии [5–8].

В численных расчетах толщина продуктивного пласта (рис. 1) принималась равной 10 м, давление жидкости в трещине гидроразрыва равнялось –1 МПа, при этом давление жидкости в пласте вне зоны депрессии принималось за нулевую точку отсчета. Для упрощения постановки задачи распределение пластового давления в зоне депрессии принималось линейной функцией координаты x , т. е. пластовое давление в трещине равнялось –1 МПа (–10 атм) и далее линейно возрастает до нулевого значения на условном фронте зоны депрессии 2.

Численные расчеты проводились при значениях модуля Юнга E в кровле и подошве пласта, равном 10^4 МПа и $2 \cdot 10^4$ МПа (соответственно кривые 1, 2 на рис. 2). Модуль Юнга в продуктивном пласте во всех вариантах расчетов принимался равным $5 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.2$. На внешних границах расчетной области, достаточно удаленных от зоны депрессии как по вертикали, так и по горизонтали, ставились условия отсутствия напряжений в породе. Исходное напряженное состояние породы до формирования зоны депрессии принималось за нулевую точку отсчета.

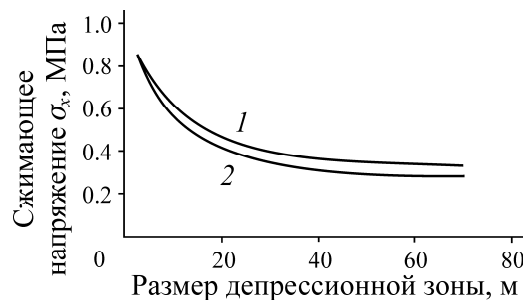


Рис. 2. Сжимающие напряжения σ_x в точке $z = 0$ в зависимости от размеров депрессионной зоны: 1 — в кровле и подошве пласта $E = 10^4$ МПа; 2 — $E = 2 \cdot 10^4$ МПа

Кривые 1 и 2 (рис. 2) представляют абсолютную величину сжимающего напряжения σ_x на берегах трещины гидроразрыва в ее средней части ($z=0$) при различном удалении условного фронта депрессионной зоны 2 от этой трещины. Как и следовало ожидать, при увеличении размеров зоны депрессии возрастает степень передачи сжимающих напряжений на кровлю и подошву пласта, причем при увеличении жесткости кровли и подошвы степень разгрузки продуктивного пласта от сжимающих напряжений растет (кривая 2 на рис. 2).

Отметим, что в силу линейности системы уравнений (2) приведенные на рис. 2 результаты численных расчетов имеют достаточно универсальный характер. В случае, когда снижение пластового давления в трещине гидроразрыва будет в несколько раз больше принятого в расчетах значения, равного -1 МПа, сжимающие напряжения, представленные кривыми 1 и 2, пропорционально возрастут. Если толщина продуктивного пласта будет больше или меньше принятого в расчетах значения, равного 10 м, числовые значения размеров депрессионной воронки на горизонтальной оси координат рис. 2 необходимо пропорциональным образом увеличить или уменьшить.

Из полученных результатов, следует, что сжимающее давление, действующее в начальный период притока пластового флюида в трещину, т. е. при малом удалении фронта депрессионной зоны от трещины, практически равно этой депрессии. С ростом размеров депрессионной зоны за счет большего перераспределения сжимающих напряжений на кровлю и подошву пласта происходит снижение напряжения, сжимающего трещину, или давления, действующего со стороны породы на частицы проппанта. Так, при достижении фронтом зоны депрессии размеров, равных 3–4 толщинам продуктивного пласта, сжимающее давление на частицы проппанта понижается до 30–40 % от абсолютной величины депрессии (рис. 2).

Отсюда можно сделать вывод, что если депрессию на пласт увеличивать поэтапно, с большим интервалом времени между этапами, рассчитываемым таким образом, чтобы сжимающее давление на трещину снизилось до приемлемого уровня, то можно достичь высокого значения конечной депрессии, оставаясь на каждом этапе в пределах обратимых упругих деформаций породы в окрестности трещины. Однако такого результата можно достичь лишь при определенных условиях, накладываемых на исходное напряженное состояние продуктивных пластов.

Дело в том, что из всех факторов, определяющих сжатие трещины (или давление на частицы проппанта), фактор, обусловленный понижением пластового давления в депрессионной зоне, может быть значимым и управляемым лишь в случае относительно неглубокого залегания продуктивных пластов, в том числе угольных. При глубоком залегании пластов, измеряемом километрами, боковое горное давление среди трех указанных факторов, достигая значений в сотни атмосфер, является доминирующим и некоторое снижение (на десятки атмосфер) суммарного сжимающего давления на трещину за счет снижения темпов нарастания депрессии на пласт не будет играть существенной роли в предотвращении процесса пластического вдавливания частиц проппанта в породу.

При относительно неглубоком залегании продуктивных пластов [1, 2], измеряемом сотнями метров, когда боковое горное давление становится сопоставимым по величине со сжимающим давлением на трещину при формировании зоны депрессии, управление темпом поэтапного нарастания депрессии по времени действительно может ограничить деформационные процессы в породе вблизи трещины гидроразрыва пределами обратимых упругих деформаций.

Необходимо отметить особенность распределения напряжений в слоисто-неоднородных пластах: при чередовании продуктивных интервалов в пласте с более жесткими непроницаемыми прослоями (пропластками) сжимающие напряжения в жестких слоях будут более высокими, чем в среднем по пласту. Это связано с тем, что продольные смещения породы во всех

слоях внутри продуктивного пласта практически одинаковы по величине, а продольные напряжения в слоях с высоким значением модуля Юнга выше, чем в слоях с более низким его значением. Наличие жестких пропластков снижает напряжение сжатия в более сжимаемых слоях, но увеличивает эти напряжения в более жестких слоях породы.

ВЫВОДЫ

Поэтапное повышение депрессии на пласты может служить способом предотвращения процесса необратимого смыкания трещин гидроразрыва в случае относительно неглубокого залегания нефтегазонасыщенных и угольных пластов, измеряемого сотнями метров, и будет способствовать повышению эффективности технологии гидроразрыва продуктивных пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов В. А., Филлипов Ю. А. Влияние изменения напряженного состояния пород кровли угольного пласта при развитии очистных работ на газовый режим залежи // ФТПРПИ. — 2019. — № 5. — С. 33–34.
2. Сердюков С. В., Курленя М. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В. Влияние гидроразрыва угля на фильтрационное сопротивление зоны дренирования дегазационной скважины // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 3–13.
3. Желтов Ю. П. Механика нефтегазонасыщенного пласта. — М.: Недра, 1975. — 216 с.
4. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. — М.: Недра, 1984. — 211 с.
5. Свалов А. М. Механика процессов бурения и нефтегазодобычи. — М.: Либроком, 2009. — 256 с.
6. Свалов А. М. Анализ закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния приповерхностных слоев породы над разрабатываемым месторождением углеводородов // Науч. тр. НИПИ Нефтегаз ГНКАР. — 2019. — № 3. — С. 59–65.
7. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966. — 690 с.
8. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
9. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. — М.: Наука, 1988. — 712 с.

Поступила в редакцию 20/VII 2020

После доработки 08/IX 2020

Принята к публикации 11/IX 2020