

УДК 622.276

**РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ ПОРОДЫ КАК КОНЦЕНТРАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА**

А. М. Свалов

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

Исследуются особенности распределения напряжений в продуктивных пластах и окружающих горных породах при разработке месторождений нефти и газа при наличии разрывных нарушений в породе со смещением (дизъюнктивные нарушения). Методами математического моделирования установлено, что при снижении пластового давления при условии упругого деформирования горных пород на поверхности разрыва со смещением формируются области концентрации напряжений сдвига, воздействие которых на изначально непроницаемый разрыв может сделать его флюидопроводящим. Показано, что процессы ползучести породы приводят к увеличению ширины разрыва в породе, что также способствует установлению гидродинамической связи продуктивного пласта с выше- и нижерасположенными проницаемыми пластами. Описанный процесс формирования проницаемых каналов в горной породе может объяснить механизм подпитки разрабатываемых месторождений нефти и газа потоками углеводородных флюидов из нижерасположенных флюидонасыщенных пластов.

Разрывы сплошности горной породы, дизъюнктивные нарушения, продуктивные пласты, ползучесть горных пород, подпитка разрабатываемых месторождений

DOI: 10.15372/FTPRPI20220506

Разработка нефтяных и газовых месторождений сопровождается изменением пластового давления, которое, в свою очередь, приводит к изменению напряженно-деформированного состояния продуктивных пластов и окружающих их горных пород. В идеализированном случае, когда продуктивный пласт может быть представлен как однородный горизонтально расположенный слой породы постоянной толщины и бесконечной протяженности, понижение пластового давления в нем будет приводить к равномерному вертикальному сжатию пласта. При этом вышерасположенный массив породы без изменения своего напряженного состояния будет смещаться вниз по вертикали на величину, равную смещению кровли пласта, а в нижерасположенном массиве породы изменений в напряженно-деформированном состоянии также не произойдет. В действительности реальные продуктивные пласты характеризуются наличием неоднородностей различного типа, которые обуславливают появление существенных особенностей в картине распределения напряжений в массиве горных пород при изменении давления в разрабатываемых пластах.

Одной из часто встречающихся неоднородностей в строении горных пород, существенным образом влияющей на характер взаимодействия разрабатываемых продуктивных пластов с окружающими породами, является разрыв сплошности породы (дизъюнктивное нарушение)

со смещением породы вдоль этого разрыва. Наличие дизъюнктивных нарушений в массиве горных пород при изменении давления в продуктивных пластах приводит к концентрации напряжений в особых зонах вблизи поверхностей разрывов, что может стать причиной их разгерметизации и возникновения перетоков пластовых флюидов между продуктивными пластами и соседними флюидонасыщенными пластами.

Такие перетоки приводят, с одной стороны, к потере добываемых углеводородных флюидов, особенно природного газа, которые через активизировавшиеся разрывы в горной породе способны проникать в вышерасположенные водонасыщенные пласты. С другой стороны, установление гидродинамической связи продуктивных пластов с нижерасположенной частью массива горной породы при понижении пластового давления может стать причиной подпитки разрабатываемых пластов углеводородами из нижерасположенной части массива [1, 2] при условии, что в ней имеются скопления углеводородов. Таким образом, ставшие флюидопроводящими в процессе разработки месторождений дизъюнктивные нарушения породы могут рассматриваться (по терминологии [1, 2]) как активизировавшиеся нефтеподводящие каналы, через которые происходит подпитка разрабатываемых месторождений углеводородами.

Цель настоящей работы — исследование механизмов, приводящих к флюидопроводимости разрывов в горной породе, у которых в исходном состоянии, до начала разработки месторождения, объем между сторонами разрыва заполнен связывающей их сплошной средой, что делает этот разрыв непроницаемым для пластовых флюидов.

Для формирования областей концентрации напряжений вблизи разрывного нарушения в породе с изначально прочной связью между сторонами разрыва принципиальное значение имеет наличие смещения породы вдоль этого разрыва. Такое смещение приводит к образованию в продуктивном пласте границ раздела между проницаемой породой с высокой сжимаемостью и непроницаемой, более жесткой породой из выше- и нижерасположенных частей массива породы (рис. 1). Существование границы раздела между породами с различной сжимаемостью при понижении пластового давления будет приводить к развитию касательных (сдвиговых) напряжений вдоль этой границы, способных разрушить прочную связь между сторонами разрыва, т. е. привести к его разгерметизации. Аналогичный механизм разрушения связи между горной породой и жестким включением в нее, таким как зацементированные металлические обсадные трубы скважины, при проведении гидроразрыва пласта, сопровождающегося значительным повышением давления в призабойной зоне скважины, описан в [3].

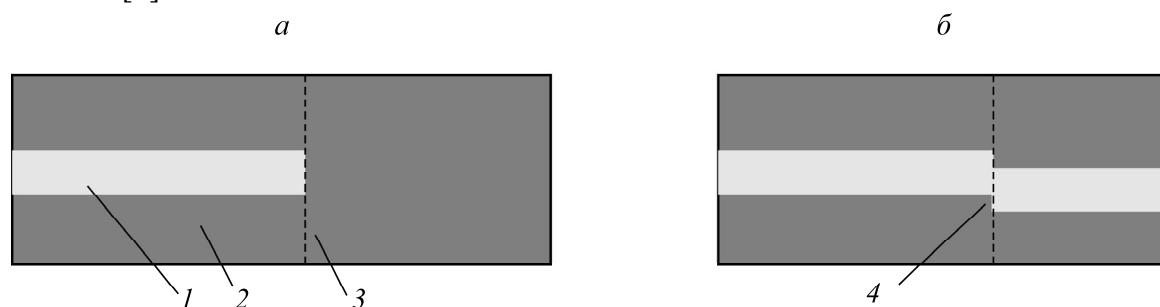


Рис. 1. Картина расположения продуктивного пласта (1) мощностью H в непроницаемой породе (2) с разрывом сплошности породы (3) со смещением: a — вертикальное смещение породы много больше мощности пласта; b — вертикальное смещение породы (4) меньше мощности пласта

Рассмотрим два варианта разрыва сплошности породы со смещением вдоль разрыва. На рис. 1а вертикальное смещение L породы в правой части рисунка значительно больше мощности пласта H , и это означает, что продуктивный пласт I практически экранирован справа непроницаемой породой 2. Вертикальный разрыв сплошности породы обозначен штриховой линией 3. Во втором варианте (рис. 1б) смещение породы 4 меньше мощности продуктивного пласта H и продуктивный пласт в левой части рисунка гидродинамически связан со смещенным по вертикали пластом в правой части.

Для численного анализа картины распределения напряжений в продуктивном пласте и окружающих его породах при снижении пластового давления на 10 МПа в рамках теории упругого деформирования горных пород используется концепция эффективных напряжений [3] в горной породе, которой соответствуют следующие уравнения пороупругости в плоской постановке:

$$\begin{aligned}\sigma_{x,x} + \tau_{xz,z} &= P_x, \quad \tau_{xz,x} + \sigma_{z,z} = 0, \\ \sigma_x &= \lambda I + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \sigma_z = \lambda I + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ I &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)},\end{aligned}$$

где P — пластовое давление, МПа; E — модуль Юнга, МПа; ν — коэффициент Пуассона; σ_x , σ_z , τ_{xz} — нормальные эффективные напряжения в породе в направлениях x и z и касательное напряжение, ось x направлена по горизонтали вдоль пласта (рис. 1); ось z — вертикальная координата; u , w — смещения породы в направлениях x , z ; λ , μ — параметры Ламе. Знак запятой в нижних индексах означает операцию дифференцирования по переменной, следующей за этой запятой. Функция P_x — производная функции распределения давления пластового флюида. В направлении оси y , ортогональном плоскости (рис. 1), принимается условие плоскодеформированного состояния горной породы.

В численных расчетах мощность продуктивного пласта принималась равной 10 м, пластовое давление — 10 МПа, исходное напряженное состояние горной породы принималось за нулевой фон. В качестве граничных условий на удаленных внешних границах предполагалось условие нулевых напряжений, на удаленной нижней границе ставилось условие нулевых смещений горной породы.

Численные расчеты проводились при значениях модуля Юнга $E = 2 \cdot 10^4$ МПа в горной породе, окружающей продуктивный пласт. Модуль Юнга в продуктивном пласте во всех вариантах расчетов принимался равным $5 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона — 0.25.

Описанная численная модель позволяет определить особенности распределения упругих напряжений в горной породе при снижении пластового давления и при наличии вертикального разрывного нарушения в породе.

На рис. 2а приведено распределение касательных напряжений τ_{xz} вдоль вертикального разрыва в случае полного экранирования продуктивного пласта (рис. 1а). За нулевую точку отсчета вертикальной координаты z принимался уровень подошвы продуктивного пласта. Отметим, что отрицательным значениям τ_{xz} на рис. 2 соответствуют напряжения сдвига, действующие вертикально вниз на непроницаемую породу справа от разрыва. Видно, что напряжения сдвига на линии разрыва в кровле и подошве продуктивного пласта ($z = 0$ и $z = 10$ м) достигают максимальных значений $\tau_{xz} \sim 8$ МПа, близких к амплитуде снижения пластового давления, равной 10 МПа. При численных расчетах пиковые значения сдвиговых напряжений τ_{xz} в силу их

осреднения на расчетной ячейке получаются несколько ниже истинных значений, в действительности максимальные значения этих напряжений находятся еще ближе к амплитуде изменения пластового давления.

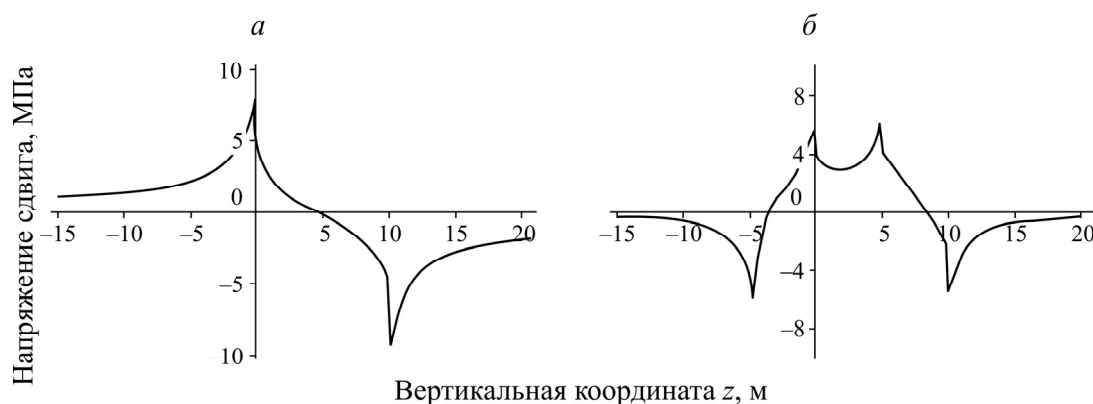


Рис. 2. Распределение напряжений сдвига вдоль вертикального разрыва сплошности в породе: *a* — смещение породы много больше мощности продуктивного пласта, равной 10 м; *б* — смещение породы равно половине мощности пласта

На рис. 2б приведено распределение сдвиговых напряжений на линии разрыва в случае, когда смещение породы $L = 5$ м, т. е. правая и левая части продуктивного пласта гидродинамически связаны друг с другом (рис. 1б). В этом случае увеличивается количество точек концентрации сдвиговых напряжений, хотя максимальное значение напряжений снижается до уровня ~ 6 МПа.

Численные расчеты для наклонного положения разрыва сплошности показывают, что качественно картина распределения сдвиговых напряжений будет аналогична картине, приведенной на рис. 2, но с меньшими пиковыми значениями напряжений, находящимися в диапазоне $\sim 5 - 6$ МПа. Отметим, что на наклонных разрывах еще в исходном состоянии, до понижения пластового давления, существуют касательные напряжения, обусловленные разницей вертикального и бокового горного давления в горной породе. С учетом этого обстоятельства суммарные касательные напряжения на наклонной поверхности разрыва сплошности породы могут даже превысить максимальные значения этих напряжений в зонах их концентрации в случае вертикального расположения разрыва сплошности горной породы. В силу линейности используемых уравнений пороупругости при увеличении или снижении амплитуды изменения пластового давления значения напряжений сдвига на линии разрыва сплошности породы будут изменяться пропорциональным образом.

Таким образом, численный анализ распределения напряжений сдвига на поверхности разрыва при упругом деформировании горных пород показывает, что при достаточно высокой амплитуде снижения пластового давления в продуктивных пластах этих напряжений в зонах концентрации может быть достаточно для разрушения связи между сторонами разрыва. Более того, в упругой среде при образовании трещины в поле напряжений сдвига на концах трещины формируются зоны экстремальной концентрации напряжений [4, 5], что способствует ее росту вглубь непроницаемых пород, окружающих продуктивный пласт.

Описанный возможный механизм разгерметизации дизъюнктивных нарушений в горной породе за счет действия упругих напряжений, обусловленных снижением пластового давления, нельзя считать достаточным для объяснения процесса формирования нефтеподводящих каналов в нижерасположенной части массива горных пород. Проблема заключается в том, что су-

ущественное снижение пластового давления в процессе разработки месторождений углеводородов происходит достаточно медленно, приблизительно за 20–30 лет, в течение которых в горной породе развиваются процессы ползучести, приводящие к релаксации упругих напряжений.

По данным [6], характерное время, за которое нарастающие со временем деформации осадочных пород, обусловленные ползучестью, будут сопоставимы с упругими деформациями, измеряется 3–6 годами. В течение указанных двух-трех десятков лет разработки месторождений существенным образом может снизиться пластовое давление, свойство ползучести пород-коллекторов нефти и газа становится доминирующим фактором, определяющим деформационные процессы в пластах. При медленном увеличении напряжений в горной породе, характерном для процессов разработки месторождений, максимальные значения сдвиговых напряжений на поверхности разрыва сплошности породы, рассчитанные по законам упругого деформирования горной породы, могут не достигаться из-за релаксационных процессов, вызванных ползучестью породы.

Тем не менее именно процессы ползучести породы способствуют потере герметичности разрывов сплошности горной породы. Исходное напряженно-деформированное состояние осадочных пород определяется законами деформирования, пограничными между законами упругого деформирования и законами ползучести породы. Анализ соотношения вертикального и бокового горного давления, основанный на данных, полученных при проведении гидроразрывов продуктивных пластов [7–9], показывает, что исходное боковое горное давление в 2–3 раза превышает значение, определяемое законами упругого деформирования. Это может быть объяснено только развитием процессов ползучести в горной породе, выравнивающих нормальные напряжения и понижающих интенсивность касательных (сдвиговых) напряжений до минимального уровня, допускаемого законами упругого деформирования породы.

Отсюда следует, что исходное напряженно-деформированное состояние продуктивных пластов соответствует предельному соотношению вертикального и бокового горного давления, для которого действуют законы упругого деформирования породы, и ее сжатие в продуктивном пласте при уменьшении пластового давления при разработке сразу “запускает” процессы ползучести в породе, приводящие к релаксации напряжений сдвига в пласте, избыточных для деформирования породы по законам упругости.

При достаточно медленном понижении пластового давления процессы ползучести горной породы будут приводить к выравниванию эффективных напряжений σ_z и σ_x в продуктивном пласте, поскольку уже в исходном состоянии напряжение сдвига в пласте равно своему предельно допустимому для законов упругого деформирования породы значению. Другими словами, если при понижении пластового давления на величину ΔP эффективное вертикальное напряжение сжатия в пласте σ_z увеличилось, то с течением времени за счет развития процессов ползучести эффективное боковое напряжение сжатия σ_x в пласте также увеличится на ту же величину.

При этом, в отличие от продуктивного пласта, в окружающих породах по причине их непроницаемости (отсутствия действия фактора снижения пластового давления), при удалении от линии разрыва сплошности породы не будет происходить дополнительного вертикального сжатия и, соответственно, дополнительного бокового сжатия. Эта ситуация схематично отображена на рис. 3, где представлена нижняя часть продуктивного пласта со смещением правой части вниз вдоль линии разрыва. Вертикальными стрелками показано действие сжимающих напряжений в пласте при снижении пластового давления, горизонтальными — действие дополнительного бокового сжатия пласта, обусловленное развитием процессов ползучести. Действие дополнительного бокового напряжения сжатия в продуктивном пласте сопровождается давлением на часть непроницаемой породы в подошве пласта слева от линии разрыва (горизонтальные стрелки), что приводит к увеличению ширины раскрытия разрыва сплошности по-

роды в некоторой области, расположенной ниже подошвы пласта и отмеченной цифрой 1. Аналогичным образом происходит раскрытие разрыва и вблизи кровли продуктивного пласта.

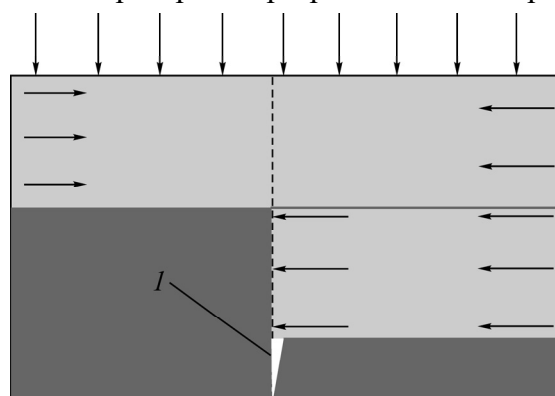


Рис. 3. Схематическая картина действия напряжений на продуктивный пласт и непроницаемую породу слева от линии разрыва

Увеличение расстояния между сторонами разрыва может делать его флюидопроводящим или приводить к повышению проницаемости, если изначально он был уже проницаемым для пластовых флюидов. В сочетании с фактором снижения пластового давления при разработке месторождения повышение флюидопроводимости разрыва может активизировать процесс перетока по нему пластовых флюидов, в том числе и углеводородных, из ниже- или вышерасположенных проницаемых флюидонасыщенных пластов в продуктивный пласт. Вызываемое таким перетоком формирование зон депрессии, т. е. зон пониженного пластового давления в окрестности разрыва в соседних флюидонасыщенных пластах, будет приводить в действие процессы ползучести уже в соседних пластах. Аналогично действию механизма в продуктивном пласте это приводит к последовательной активизации разрывов сплошности породы в проницаемых пластах и к увеличению глубины активизировавшихся разрывов, которые могут стать нефтеподводящими каналами для скоплений углеводородов, находящихся в соседних пластах.

Косвенным подтверждением последовательного формирования зон депрессии вдоль активизировавшегося разрыва сплошности породы при установлении гидродинамической связи разрабатываемого продуктивного пласта с ниже- и вышерасположенными флюидонасыщенными соседними пластами может служить отмеченное в [10] увеличение амплитуды проседания земной поверхности над зонами разломов, что вызвано увеличением суммарного вертикального смещения породы в результате ее сжатия во всех депрессионных зонах, сформировавшихся вдоль разрыва.

ВЫВОДЫ

При разработке месторождений нефти и газа в результате снижения пластового давления может происходить разгерметизация изначально непроницаемых разрывов сплошности породы со смещением, обусловленная как образованием зон концентрации упругих напряжений сдвига вблизи разрыва, так и ростом бокового сжатия продуктивного пласта при развитии процессов ползучести. Ставшие флюидопроводящими разрывы сплошности породы могут служить нефтегазоподводящими каналами при подпитке разрабатываемых месторождений углеводородами из соседних флюидонасыщенных пластов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гаврилов В. П.** Возможные механизмы естественного восполнения запасов на нефтяных и газовых месторождениях // Геология нефти и газа. — 2008. — № 1. — С. 56–64.
2. **Муслимов Р. Х., Плотникова И. Н.** Учет процессов переформирования нефтяных залежей при длительной эксплуатации и глубинной подпитке при моделировании разработки нефтяных месторождений // Георесурсы. — 2018. — Т. 20. — № 3. — Ч. 1. — С. 186–192.
3. **Свалов А. М.** Механизм разгерметизации затрубного пространства скважины при проведении гидроразрыва пласта // ФТПРПИ. — 2021. — № 1. — С. 21–27.
4. **Мухелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966. — 708 с.
5. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. — Т. 2. — М.: Наука, 1970. — 568 с.
6. **Ержанов Ж. С., Сагинов А. С., Гуменюк Г. Н., Векслер Ю. А., Нестеров Г. А.** Ползучесть осадочных горных пород. Теория и эксперимент. — Алма-Ата: Наука, 1970. — 208 с.
7. **Pilkington P. E.** Fracture graduations, J. Petroleum Eng., 1978. — P. 138–148.
8. **Рабиа Х.** Технология бурения нефтяных скважин. — М.: Недра, 1989. — 413 с.
9. **Свалов А. М.** Ползучесть горных пород в процессах разработки месторождений нефти и газа // Газовая пром-сть. — 2012. — № 1. — С. 20–23.
10. **Кузьмин Ю. О., Никонов А. И.** Результаты геодинамических наблюдений на месторождении Жанажол, Казахстан // Наука и технологические разработки. — 2021. — Т. 100. — № 4. — С. 25–43.

Поступила в редакцию 28/VI 2022

После доработки 18/IX 2022

Принята к публикации 21/IX 2022