

Геомеханическое поведение перекрывающих пород над углеводородным резервуаром – какие прогнозы можно делать из опыта угольной промышленности? Geomechanical behaviour of the overburden above compacting hydrocarbon reservoirs - what would we predict from coalmining experience?

N.R. Goulty*

Реферат

Наблюдаемые проседания, вызванные проходкой забоев в угольной промышленности, и временные сейсмические профили над над действующей горной выработкой указывают на особенности в геомеханике перекрывающих пород, запечатывающих углеводородный резервуар. Предполагается, что проседание на земной поверхности или морском дне составляет до 90% от вертикального уплотнения резервуара. Напряжение прогибания, вероятно, существует во всяком большом объеме перекрывающих пород над уплотненным резервуаром, если перекрывающие породы содержат мощные слои плотных прочных осадочных пород. Восприимчивость сейсмической скорости к протяженным вертикальным напряжениям, вероятно, должна быть высокой при временных сейсмических исследованиях, так как проседание вызывает необратимое разрушение структуры пород с развитием дополнительных трещин и микротрещин. Другие наблюдения, согласующиеся с предполагаемым поведением проседания в течение разработки каменноугольных пластов, представляют затруднения, испытанные при длительном проведении бурения на Valhall, и большое различие акустических скоростей между интенсивно напряженными и нормально напряженными внутри резервуарными юрскими сланцами очень однородной объемной пористости на Halten Terrace, прибрежная зона средней Норвегии.

Введение

В угольных забоях размер камер имеет обычно 200 м в ширину (длина рабочего забоя) и ~1 км в длину, а вертикальная мощность извлекаемого угля составляет порядок 1.0-2.5 м. Так как забой продвигается вперед, допускается, что перекрывающие породы обрушаются за ним (рис. 1). Кровля обрушается на больших участках и образует завалы. Обычно существует переходная зона интенсивно раздробленных пород под более жесткой основной кровлей, оторванных от нее и вынужденная лежать на завале. Основная кровля проседает в виде пологого сигмоидального изгиба, возможно с разрывом пластов, существующим вблизи мест перегиба на плоскостях слоев.

Эта статья суммирует наблюдения проседания в горных выработках над действующими забоями, включая временные сейсмические наблюдения методом отраженных волн, и рассматривает роль геомеханики перекрывающих пород и временные сейсмические исследования над уплотненными углеводородными резервуарами. Важный вывод заключается в том, что уменьшение сейсмической скорости, связанное с напряжениями растяжения, обусловленными проседанием, является следствием необратимого разрушения структуры породы. Этот вывод сомневаться в обычном объяснении, что такое уменьшение скорости в перекрывающих породах над уплотненным резервуаром является обратным упругим откликом на уменьшенное эффективное напряжение.

Проседание в открытых угленосных бассейнах

Большая часть нашего понимания о проседании при горных разработках в Великобритании идет от наблюдений на открытом участке угольного месторождения East Pennine (Wardell, 1954; National Coal Board, 1975), где Westphalian (вестфальская) В

угленосная свита верхней каменноугольной системы вскрыта скважиной под малоомощными перекрывающими породами четвертичных ледниковых отложений. Угленосная свита преимущественно содержит слои глинистых сланцев, которые не способны выдержать нагрузку в течение проседания. Представлены также песчаники, но они существенно не влияют на поведение проседания, в основном из-за того, что они не являются достаточно мощными и достаточно прочными, чтобы служить мостом через зону обрушений над забоем. Эмпирические методы предсказания напряжений и проседания поверхности разработаны National Coal Board (1975) на основании 165 примеров из практики наблюдений над действующими забойными камерами на глубине порядка 100-900 м. В большинстве случаев эмпирические методы предсказывают размер проседания поверхности с точностью $\pm 10\%$. В других европейских странах получены

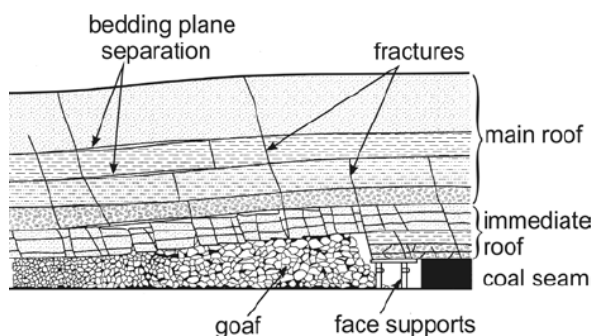


Рис. 1 Влияние обрушения на пласты над забойной камерой. По Kratzsch (1983).

аналогичные эмпирические результаты, использующие «функцию влияния» (функцию Грина) и дающие очень похожие результаты (Kratzsch, 1983).

* Department of Earth Sciences, Durham University, South Road, Durham DH1 3LE, UK. E-Mail: n.r.goulty@durham.ac.uk.

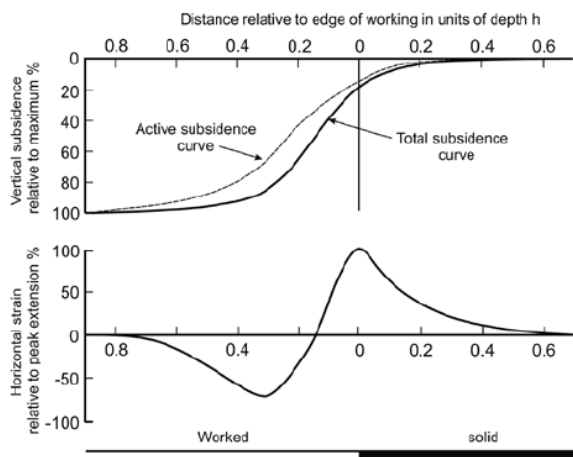


Рис. 2 Верхний. Сплошная линия: кривая предсказанного полного проседания над концом действующего забоя, предполагающая, что разработка распространяется на расстояние, по крайней мере, $1.4h$ в плоскости профиля. Пунктирная кривая: кривая активного проседания, наблюдаемая в течение продвижения вперед угольного забоя. Когда забой останавливается, имеет место в течение нескольких месяцев остаточное проседание, равное разнице между кривыми полного проседания и активного проседания. Нижний: предсказанное продольное горизонтальное напряжение на поверхности над концом действующего забоя при тех же условиях. Максимальные напряжения составляют обычно несколько тысячных.

Главные результаты касаются максимального размера проседания и отличительных особенностей «активного» и «остаточного» проседания.

Максимальное проседание над центром забойной камеры фиксированной ширины развивается тогда, когда отношение ее длины l к ее ширине h достигает 1.4. Существует горизонтальное напряжение растяжения над краями камеры и компенсирующее напряжение сжатия внутри зоны, расположенной непосредственно над камерой. Продольное горизонтальное напряжение (т.е. в направлении продвижения забоя) на поверхности земли над центром камеры достигает нуля, когда l/h превышает 1.4 (рис. 2).

Активное проседание, существующее, пока ведется добыча угля, может быть смоделировано как вязкоупругий отклик с временной константой в днях (Goult and Al-Rawahy, 1996). Остаточное проседание, которое имеет место после того, как остановятся работы в забое, локализуется в области над концом камеры (рис. 2). Максимальное значение остаточного проседания составляет 20% от максимального проседания и имеет место на расстоянии $0.23h$ за концом камеры. Остаточное проседание происходит как вязкоупругий отклик с временной константой в месяцах (Goult and Al-Rawahy, 1996). Сопоставление рис. 1 и 2 подсказывает, почему существует отличие между поведением активного и остаточного проседания. Остаточное проседание имеет место над зоной непосредственно за камерой, где пласт кровли является объектом сигмоидального искривления, связанного с напряжением горизонтального сжатия.

«Возможное максимальное проседание» на поверхности, вызванное разработкой особенно тонких пластов, означает величину проседания, которое бы имело место в точке на поверхности, если бы вся область тонкого пласта радиусом $0.7h$ под этой точкой была выработана. Рис. 3 показывает максимальное проседание, предполагаемое как функция

ширины и глубины забойной скважины и, в частности, показывает, что максимально возможная величина проседания составляет ~90% от мощности тонкого пласта. Однако, *Subsidence Engineers' Handbook* (Руководство по проседанию для инженеров) содержит очень существенное указание, касающееся максимально возможного проседания (National Coal Board, 1975, p. 10): «в неразработанных областях прогноз по рис. 3, который был получен по случаям разработки множества тонких пластов, должен быть сокращен умножением на коэффициент 0.9». Таким образом, возможное максимальное проседание, которое может иметь место, когда разрабатывается первый тонкий пласт, составляет только ~80% выработанной мощности тонкого пласта.

По этим результатам могут быть сделаны следующие выводы:

- Не существует крупномасштабного напряжения изгиба над действующими забоями на открытых угленосных месторождениях.
- Локальное напряжение изгиба наблюдается над концом забойной камеры, но ослабляется с временной константой в месяцах.
- Пустоты, оставшиеся в завале за забойной камерой и непосредственно в зоне кровли над обрушением, составляют ~10% мощности тонкого пласта, где существовало возможное максимальное проседание.
- В ранее неразработываемых областях дополнительно ~10% мощности тонкого пласта, которая не проявляется как поверхностное проседание, рассредоточено как распространенной по всему объему перекрывающих пород деформации, вероятно связанной с созданием свежих трещин и микротрещин.

Проседание в закрытых угленосных бассейнах

Существует некоторое доказательство того, что напряжение изгиба может иметь место над горными выработками в уплотненной части East Pennine угленосного бассейна, где каменноугольные пласты перекрыты пермским комплексом, содержащим мощные пласты доломитового известняка. В угленосном бассейне Selby, где выработан только Barnsley

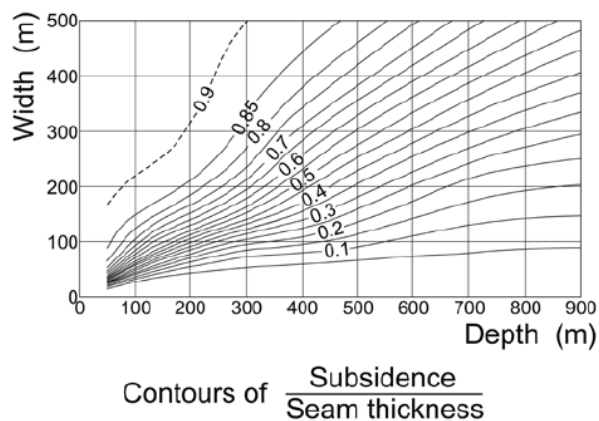


Рис. 3 Максимальное проседание, выраженное в показателях мощности тонкого пласта как функция ширины и глубины, h , забойной камеры. Предполагается, что длина камеры больше $1.4h$. Возможное максимальное проседание составляет 0.9 мощности тонкого пласта. По данным National Coal Board (1975).

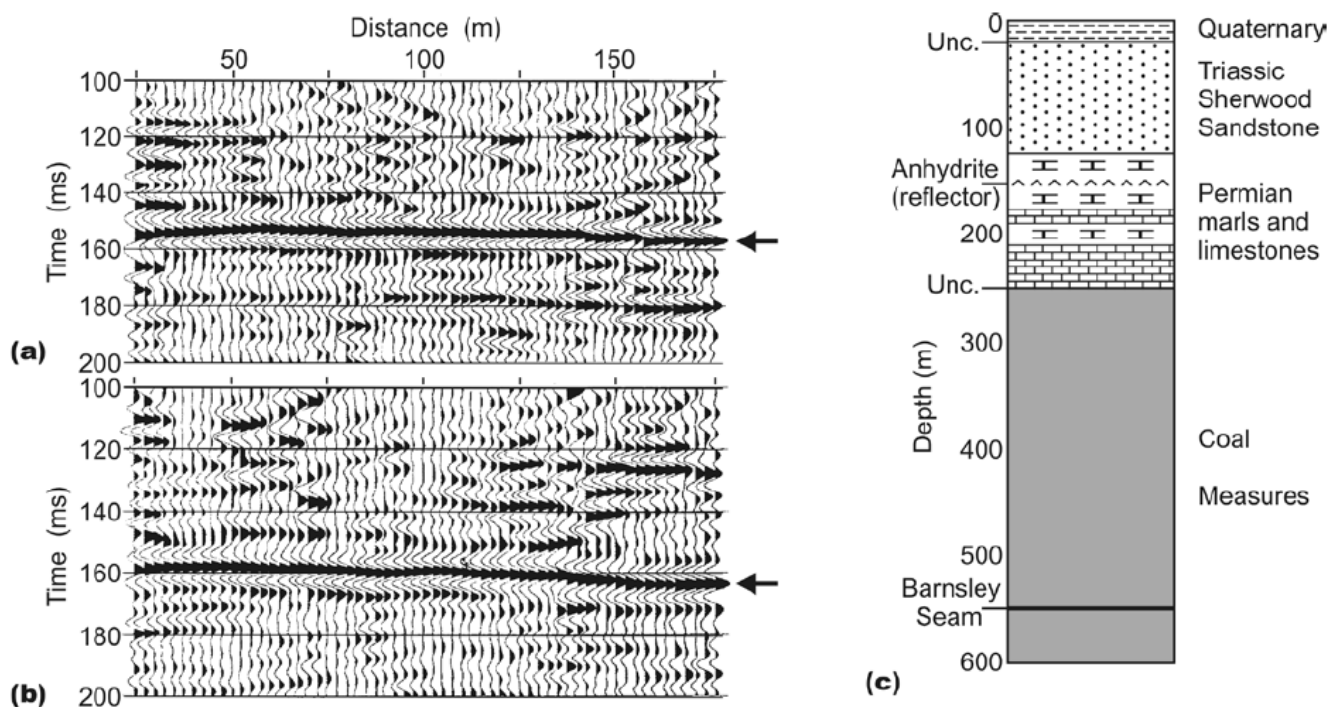


Рисунок 4 Часть окончательного обработанного разреза по данным съемки спустя шесть месяцев: (а) перед тем как забой достиг начала профиля, и (b) после того как забой прошел конец профиля. Время пробега отраженной волны (стрелка) от слоя пермских ангидритов увеличилось на 6 мс. (с) Стратиграфическая колонка вниз до пласта Barnsley (разрабатываемого). По Al-Rawahy и Goulty (1995).

пропласт, полное значение предсказанного проседания над забойными камерами не достигается до тех пор, пока не выработаны камеры на каждой стенке. Pyne и Randon (1986) предположили, что уменьшенное проседание обусловлено перекрытием (свода) в пермском комплексе, и представили данные диаграммы каротажа сопротивления по скважине над действующей камерой, которые показали разрыв пластов внутри нижнепермских Cadeby известняков. Когда соседние камеры на каждой стороне были выработаны, горизонтальное растяжение над стенкой выработки может разорвать поверхности сопряжения в известняке, давая возможность развиваться полному проседанию.

Al-Rawahy и Goulty (1995) провели мониторинг влияния проседания кровли на сейсмические скорости в триасовой части перекрывающих пород Sherwood песчаника сейсмическим временным методом профилирования по отраженным волнам над другой забойной камерой в угленосном бассейне Selby. Съемки по профилю были проведены 10 раз с периодом в 17 месяцев по мере выработки камеры, и было наблюденно общее увеличение на 4% времен пробега отраженных волн от ангидритового слоя в Upper Permian Marl (рис. 4).

Размеры проседания, предсказанные на поверхности и на горизонте Upper Permian Marl, различаются на ~5 м, предполагая вертикальное растягивающее напряжение 1 к 300 в этом интервале глубин. Частичное изменение времени пробега на единицу напряжения составляет, следовательно, около 12. Hatchell and Bourne (2005) определили это безразмерное отношение (т.е. частичное изменение времени пробега на единицу напряжения) как R-значение и отметили, что R-значение около 5 является обычным для пород, претерпевших растягивающие напряжения над источенными (выработанными) углеводородными резервуарами, а меньшие значения свойственны тем же породам, испытывавшим напряжения сжатия. Они предположили, что высокая чувствительность скорости к

напряжению растяжения обусловлена раскрытием трещин. Образцы перекрывающих пород по временному сейсмическому профилю Al-Rawahy и Goulty (1995) преимущественно представлены триасовыми Sherwood известняками. Наблюденное уменьшение скорости было первоначально интерпретировано как согласующееся с лабораторными наблюдениями, устанавливающими связь акустической скорости с эффективным напряжением в засланцованных известняках (Eberhart-Phillips et al., 1989). Однако, уменьшение скорости на 4% согласовано только в том случае, если эффективное напряжение, действующее на Sherwood известняки, предполагается падающим до нуля. Поскольку дальнейшее изменение скорости не наблюдалось при последующей выработке угля в соседних камерах, являющейся причиной развития полного предсказанного размера проседания, кажется наиболее вероятным, что, в действительности, существует непрерывное уменьшение эффективного вертикального напряжения, действующего на Sherwood известняки.

Пересмотренная интерпретация, проведенная здесь, заключается в том, что 4%-ое уменьшение скорости не вызвано уменьшением эффективного напряжения, а вызывается повсеместно распространенной деформацией перекрывающих пород, обусловленной проседанием, с развитием свежих трещин и микротрещин, имеющих широкий диапазон по размеру. Уменьшение скорости должно быть, поэтому, рассмотрено как необратимое изменение скорости в результате неупругого разрушения структуры породы, а не как необратимое изменение в результате уменьшения эффективного напряжения, действующего на упругую трещиноватую среду. Другими словами, уменьшение скорости отнесено к серьезному нарушению, обусловленному проседанием, где термин «нарушение» используется в смысле, упомянутом Gueguen и Besuelle (2007), которые использовали его для описания изменений макроскопических физических свойств породы в результате развития сети микротрещин.

Выводы и обсуждение

Значение для уплотненных резервуаров

Из опыта угольной промышленности, описанного здесь, непосредственные выводы для проседания над уплотненными резервуарами следующие:

- Максимальное проседание на поверхности земли или на морском дне не ожидается выше ~90% от вертикального уплотнения резервуара.
- Напряжение изгиба, вероятно, имеет место при любом значительном объеме перекрывающих пород над уплотненным резервуаром за исключением перекрывающих пород, которые содержат мощные пласты достаточно плотных осадочных пород. Например, не предполагается, что вертикальные напряжения существенно возрастают в зонах, прилегающих к уплотненным резервуарам месторождений мелового периода в Норвегии, и не предполагается здесь уменьшение сейсмических времен пробега при временных исследованиях.
- Чувствительность сейсмической скорости к вертикальным напряжениям растяжения может быть намного выше, чем чувствительность к напряжениям сжатия, как наблюдалось, например, Hatchell и Bourne (2005).

Различные авторы ранее предполагали, что более высокая чувствительность сейсмической скорости к напряжениям растяжения при временных съемках обусловлена раскрытием микротрещин, но часто с выводом, что уменьшение скорости должно реверсировать, если режим напряжения, действующего на массы пород, восстанавливается до первоначального состояния, до проседания. Напротив, здесь предполагается, что напряжения растяжения разрушают структуру породы в результате повсеместно распространяющейся непрерывной деформации, или нарушения в виде свежих трещин и микротрещин с широким диапазоном их размеров, а также в результате раскрытия и расширения ранее образованных трещин. Следовательно, уменьшение скорости в значительной степени необратимо, и наблюдаемое уменьшение скорости в перекрывающих породах при временных исследованиях не обязательно означает, что имеет место уменьшение эффективного напряжения, действующего на массы пород. Напротив, умеренное напряжение сжатия упруго восстановимо.

Сопутствующие исследования

Существуют другие исследования, которые согласуются с предполагаемым поведением каменноугольных пластов в течение проседания во время выработки угля. Kristiansen (2004) изложил трудности, испытанные при длительном бурении на Valhall. Скважины с большим углом напластования были пробурены через породы эоценовой системы на Valhall в середине 1980-х г.г. без каких-либо проблем, касающихся устойчивости стволов скважин, но стало значительно труднее бурить после 1990-х г.г. В течение этого временного интервала проседание возросло с 0.5 м до почти 5 м. Необратимая деформация структуры пород, вызванная проседанием и развитием микротрещин, вызвала неустойчивость, хотя этому мог способствовать фактор присутствия полигональной сети ранее существовавших нормальных разломов с очень низким коэффициентом остаточного сцепления.

Hermanrud et al. (1998) сообщил о большом различии акустических скоростей между интенсивно перенапряженными и гидростатически сжатыми породами внутрирезервуарных юрских сланцев с очень похожей объемной пористостью на Halten Terrace, оффшорная зона средней Норвегии. Совсем недавно Teige et al. (2007) предположил, что флексур, обусловленная ледниковой нагрузкой, могла бы, вероятно, быть причиной необратимого развития свежих микротрещин в этих сланцах. Там, где сланца сильно перенапряжены, микротрещины могут привести к более высокому давлению флюидов, вызывающему уменьшение акустической скорости, даже если объемная пористость не существенно больше, чем в гидростатически сжатых сланцах.

Благодарности

Я благодарю Paul Hatchell и Paul Wood за рассмотрение представленной рукописи.

Литература

- Al-Rawahy, S.Y.S. and Goult, N.R. [1995] Effect of mining subsidence on seismic velocity monitored by a repeated reflection profile. *Geophysical Prospecting*, 43, 191-201.
- Eberhart-Phillips, D., Han, D.H. and Zoback, M.D. [1989] Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone. *Geophysics*, 54, 82-89.
- Goult, N.R. and Al-Rawahy, S.Y.S. [1996] Reappraisal of time-dependent subsidence due to longwall coal mining. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, 83-91.
- Gueguen, Y. and Besuelle, P. [2007] Damage and localization: two key concepts in rock deformation studies. In: Lewis, H. and Couples, G.D. (Eds.) *The Relationship between Damage and Localization*. Geological Society, London, Special Publication 289, 7-17.
- Hatchell, P. and Bourne, S. [2005] Rocks under strain: strain-induced time-lapse time shifts are observed for depleting reservoirs. *The leading Edge*, 24, 1222-1225.
- Hermanrud, C, Wensaas, L., Teige, G.M.G., Vik, E., Bolas, H.M.N. and Hansen, S. [1998] Shale porosities from well logs on Haltenbanken (offshore mid-Norway) show no influence of overpressuring. In: Law, B.E., Ulmishek, G.F and Slavin, V.L (Eds.) *Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments*. Memoir 70, AAPG, Tulsa, 65-85.
- Kratzsch, H. [1983] *Mining Subsidence Engineering*. Springer, Berlin.
- National Coal Board [1975] *Subsidence Engineers' Handbook*. NCB, London.
- Kristiansen, T.G. [2004] Drilling wellbore stability in the compacting and subsiding Valhall Field. IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 2-4 March 2004. IADC/SPE 87221.
- Pyne, R. and Randon, D.V. [1986] Surface environmental aspects of the Selby coalfield. *The Mining Engineer*, 146, 77-84.
- Teige, G., Hermanrud, C, Wensaas, L. and Nordgard Bolas, H.M. [2007] Geological constraints of pore pressure detection in shales from seismic data. *Basin Research*, 19, 33-50.
- Wardell, K. [1954] Some observations on the relationship between timing and mining subsidence. *Transactions of the Institution of Mining Engineers*, 113, 471-483.

Получено 30 мая 2008; принято в печать 30 July 2008.