

УДК 622.831.325

А.Н. Шашенко¹, д-р техн. наук, проф.,
 Е.В. Кухарев¹, канд. техн. наук,
 А.О. Логунова¹, А.Ю. Еременко²

1– Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, lajana1985@gmail.com.
 2 – ГП „Донуглереструктуризация“, г. Донецк, Украина

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И КОЛЛЕКТОРСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННОГО ГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВМЕЩАЮЩЕГО УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

A.N. Shashenko¹, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
 Ye.V. Kukharev¹, Cand. Sci. (Tech.),
 A.O. Logunova¹, A.Yu. Yeremenko²

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnepropetrovsk, Ukraine,
 e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, lajana1985@gmail.com
 2 – “Donuglerestrukturizatsiya”, Donetsk, Ukraine

ESTIMATION OF SPATIAL AND COLLECTOR PARAMETERS OF A TECHNOGENIC GAS DEPOSIT BY GEOMECHANICAL DESCRIPTIONS OF ENCLOSING ROCK

Цель. Разработка инструментария для обследования подработанных углепородных массивов на предмет образования техногенных газовых месторождений.

Методика. Геомеханическое состояние и проницаемость пород подработанного массива, находящихся в условиях объемного нагружения, определены численными методами по параметрам, полученным в результате испытаний материала этих пород на одноосное сжатие с применением положений гипотезы эквивалентности объемного и одноосного напряженного состояний.

Результат. Пространственные и коллекторские параметры техногенных газовых месторождений однозначно характеризуются геомеханическим состоянием подработанного массива и его газонасыщенностью. Анализ подработанного массива на предмет образования в нем техногенного газового коллектора, а также оценка его пространственных и коллекторских параметров, могут быть выполнены по четырем характерным точкам-индикаторам с помощью математических моделей, описывающих состояние и поведение массивов определенной структуры.

Научная новизна. Использование порога уплотнения как параметра, характеризующего оболочку техногенного месторождения, позволяет учесть неконтролируемые межпластовые перетоки метана в пределах месторождения, в том числе на поверхность. Область углепородного массива, ограниченная поверхностью со свойствами порога уплотнения, представляет собой техногенное газовое месторождение.

Практическая значимость. Оценка целесообразности эксплуатации подработанных массивов действующих и закрытых шахт как коллекторов газа, поиск и обоснование решений по способам извлечения газа из них.

Ключевые слова: углепородный массив, газовое месторождение, геомеханические характеристики, эквивалентное напряженное состояние, диаграммы деформирования, контролируемые деформации, подобие процессов

Актуальность. Углепородная толща Донбасса вмещает значительные количества метана, но проницаемость ее основных метаносодержащих пород на 2–6 порядков ниже тех, из которых существующими технологиями добыча возможна. В результате подработки происходит пластическое разрыхление пород. При этом часть сорбированного метана переходит в свободное состояние, проницаемость массива резко, на порядки, возрастает, и газосодержащие породы из категории „практически непроницаемые“ могут переходить в более высокие категории, вплоть до „про-

ницаемые очень хорошо“ [1]. Таким образом, в углепородных массивах, после их подработки в результате выемки полезного ископаемого, создаются условия, способствующие образованию в них техногенных газовых коллекторов.

Состояние вопроса. Основными признаками, которые могут свидетельствовать о возможном наличии в подработанном массиве газового коллектора, являются:

1) наличие полости, способной аккумулировать определенные количества метана;

2) разрыхленные породы, запасы метана как свободного, так и сорбированного, в которых запасы таковы, что его добыча целесообразна (в случае недостаточности запасов для промышленной добычи,

такая залежь представляет угрозу как источник неконтролируемых прорывов метана на земную поверхность);

3) наличие оболочки на границе разрыхленных пород с остальной частью массива, препятствующей неконтролируемому перетоку метана из полости, образовавшейся в результате выемки угля и обрушения пород за закрепным пространством во внутрь коллектора.

Таким образом, пространственные параметры техногенного коллектора определяются координатами его оболочки, количественной характеристикой которой может выступать условие $k < 1мД$, где k – коэффициент газовой проницаемости, определяемое известной классификацией пород-коллекторов как „практически непроницаемые“ по данным А.А. Ханина. Газоносность пород между полостью и оболочкой, по сути, определяет запасы месторождения, а их проницаемость – целесообразность его эксплуатации.

Наиболее распространенным подходом к определению проницаемости подработанного горного массива являются попытки установить некую функциональную зависимость $k = f(\sigma)$, связывающую (количественно или качественно) коэффициент газопроницаемости с неким абсолютным напряжением σ в массиве. В исследованиях, выполненных под руководством А.А. Скочинского, сформулировано понятие „порога уплотнения“ как некоторой зоны пласта, в которой текущие пористость и, соответственно, проницаемость принимают минимальные значения. В данном случае полагалось достаточным ограничиться учетом нормальной составляющей напряжений, выразив последнюю соответствующим образом через вес вышележащих пород γH . Линия порога уплотнения располагается, примерно, параллельно линии обнаженной поверхности, образовавшейся в результате обрушения пород кровли, и перемещается в пространстве со скоростью перемещения этой поверхности. Порог уплотнения создает своеобразный барьер, препятствующий перетокам метана в выработку из той части угольного пласта, которая находится за зоной опорного давления, что дает основание рассматривать в непроницаемых углепородных массивах Донбасса в качестве оболочки (покрышки) техногенного месторождения не только породы – газопоры, но и некоторые области во вмещающих коллектор породах, напряженно-деформированное состояние которых имеет признаки порога уплотнения. Использование порога уплотнения как параметра, характеризующего газопор, позволяет также с новых позиций подойти к решению вопроса о пространственном расположении в подработанном массиве техногенных месторождений метана с учетом неконтролируемых межпластовых его перетоков, в том числе, на поверхность.

Результаты лабораторных исследований газопроницаемости породных образцов в условиях объемного нагружения приведены в трудах А.Н. Ставрогина

и А.Г. Протосени. В процессе исследований к одному из торцов равнокомпонентно нагруженного породного образца (в других опытах – к ограниченной части боковой поверхности) подавался газ под давлением, после чего поэтапно увеличивали осевую нагрузку σ_1 на образец, оставляя боковую нагрузку $\sigma_2 = \sigma_3$ неизменной. На каждом этапе нагружения производили измерения не только газовой проницаемости, но и соответствующих ей параметров напряженно-деформированного состояния испытываемых образцов. Таким образом, результаты исследований проницаемости получены в привязке ко всем этапам деформирования породных образцов. На рис. 1 приведены семейства кривых $k = f(\sigma_1)$, каждая из которых соответствует фиксированному значению боковой нагрузки, а на рис. 2 – соответствующие им диаграммы деформирования.

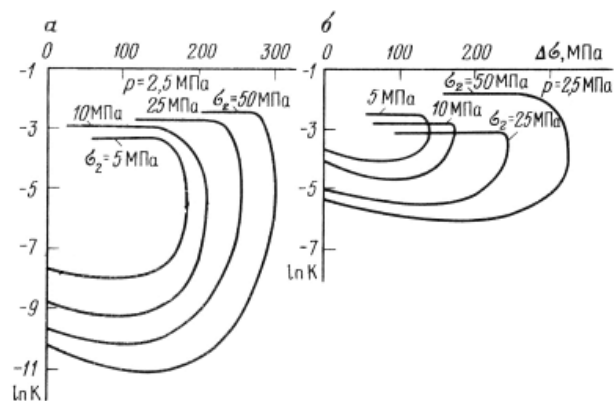


Рис. 1. Зависимости коэффициента проницаемости k от $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ для выбросоопасного (а) и невыбросоопасного (б) песчаников при разных уровнях гидростатического давления σ_2 по данным А.Н. Ставрогина

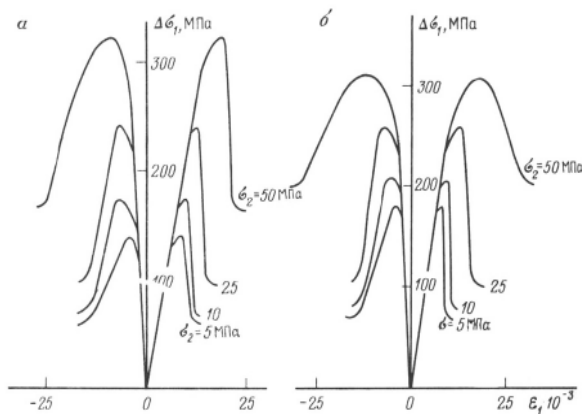


Рис. 2. Зависимости напряжений $\Delta\sigma_1$ от деформации ε_1 и ε_2 для выбросоопасного (а) и невыбросоопасного (б) песчаников при разных уровнях гидростатического давления σ_2 по данным А.Н. Ставрогина

Анализируя зависимости, приведенные на рис. 1, 2, отметим два важных обстоятельства. Первое заключается в неоднозначности этих зависимостей. На рис. 1, в частности, видно, что одному и тому же значению осевой нагрузки σ_1 соответствуют два значения проницаемости горной породы и только в предельном случае, когда напряженно-деформированное состояние породы достигает предела прочности, зависимость однозначна.

Последнее свидетельствует о том, что определенное в результате лабораторного эксперимента, например, для „условий, приближенных к пластовым“ (см. работы Калинко М.К.), значение проницаемости не может быть использовано как параметр, однозначно трактующий реальные коллекторские свойства реального массива. Действительно, если напряженно-деформированные состояния образца, при которых это значение получено, соответствуют области, примыкающей к пределу мгновенной прочности, следует ожидать бурный рост газовыделения. В зоне упругих деформаций, наоборот, газовыделение будет минимальным, в зоне эквиволюмиального течения характер течения газа сродни утечкам через выработанное пространство. Подобная неоднозначность прослеживается также на диаграммах деформирования, где одному значению $\Delta\sigma$ соответствуют два отличных друг от друга значения деформации. Таким образом, для однозначной трактовки, экспериментально установленному значению проницаемости массива (образца) необходимо поставить в соответствие его геомеханическое состояние, при котором эта проницаемость была определена.

Второе обстоятельство заключается в том, что проницаемость, как функция напряженного состояния, меняет свое поведение, когда материал исследуемого образца при деформировании претерпевает качественные изменения (рис. 1, 2). Иначе говоря, на всем промежутке деформирования существуют характерные точки, в интервалах между которыми поведение функции $k(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ известно и предсказуемо, кроме того, на этих интервалах она непрерывна и монотонна.

Постановка задачи. При наличии достаточного обоснования для переноса данных о геомеханическом состоянии образца на геомеханическое состояние массива эти точки будут являться основными индикаторами, характеризующими техногенный коллектор. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Для удобства дальнейшего изложения и обобщения выполним следующие действия. Заменим представленные на рис. 2 диаграммы объемного деформирования эквивалентной диаграммой испытаний образцов на одноосное сжатие, и произведем разбивку последней на характерные участки, соответствующие определенным этапам деформирования (рис. 3). Выполним параллельный анализ представленных на рис. 1, 2 кривых, начиная от конечной точки и последовательно перемещаясь к началу координат, с последующей интерпретацией результатов на реальный массив.

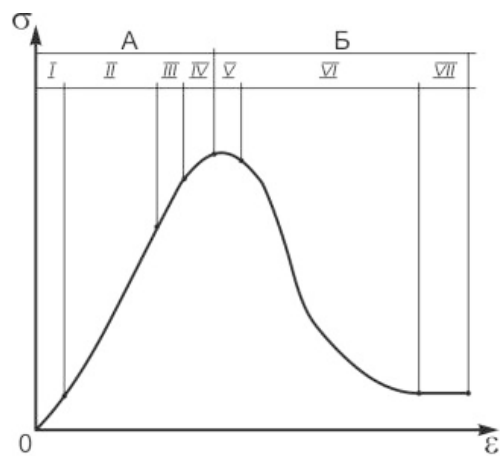


Рис. 3. Характерные этапы деформирования горных пород при испытаниях на одноосное сжатие: допредельная (А) и запредельная (Б) области деформирования

Изложение основного материала. Предварительно отметим, что оценка геомеханического состояния углевмещающих горных пород, находящихся в условиях объемного нагружения, может быть выполнена по параметрам, полученным в результате испытаний образцов этих горных пород на одноосное сжатие, путем подбора соответствующей теории прочности, обеспечивающей эквивалентность объемного и одноосного состояний.

Область эквиволюмиального течения VII характеризуется полной дезинтеграцией испытываемых образцов без изменения их объема, некоторая целостность которых обеспечивается благодаря внутреннему трению по поверхностям разрушения. Этому уровню нагружения соответствует остаточная прочность $R_{ост}$ горной породы и максимальное значение величины объемной деформации ε_v^* . В процессе лабораторного эксперимента прирост проницаемости в этой области не зафиксирован, ее абсолютная величина постоянна и не зависит от величины осевой нагрузки, и, следовательно, скорость фильтрации определяется только величиной градиента газового давления. За пределом остаточной прочности кривая проницаемости (рис. 1) вырождается в прямую, параллельную оси абсцисс, что свидетельствует о независимости проницаемости от степени превышения осевой нагрузки над боковой. За пределом остаточной прочности $R_{ост}$ проницаемость и напряженное состояние можно рассматривать как независимые параметры. На этом этапе образец полностью дезинтегрирован, и его поведение в большей мере соответствует поведению пород, обрушенных за фронтом очистных работ, нежели тех, что вмещают техногенную полость. Известно, что аэродинамическое сопротивление (величина, обратная проницаемости) массива обрушенных пород зависит, преимущественно, от размеров кусков обрушенных пород [2], по мере их уплотнения монотонно возрастает и может быть определена на основании результатов продольных депрессионных съемок [3].

В области VI – разупрочнения и разрыхления материала – происходит постепенное разрушение структурных связей, поворот и смещение отдельных кристаллов [4–6 и др.]. Коэффициент Пуассона тут больше 0,5, деформация материала сопровождается увеличением объема образца ($\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 > 0$). Прочность образцов падает, но, при любом уровне внешней нагрузки, оставшиеся структурные связи обеспечивают их прочность и способность деформироваться упруго, о чем свидетельствуют петли гистерезиса, которые имеют место при циклической нагрузке-разгрузке. Крутизна ниспадающей ветви диаграмм „ $\sigma - \varepsilon$ “ отражает структурные особенности горных пород, их способность хрупко разрушаться. Таким образом, точка примыкания области VI к области эквиволюмиального течения VII может быть рассмотрена в качестве индикатора границы, отделяющей область полностью разрушенных пород (ядро коллектора) от остальной части массива, где породы частично разрушены, но сохранили устойчивость. Условие принадлежности конкретной точки исследуемого массива может быть определено из выражения

$$\sigma_{экв} = k_c \cdot R_{ост}, \quad (1)$$

где $\sigma_{экв}$ – эквивалентное напряжение; k_c – коэффициент структурного ослабления.

Определенная в процессе моделирования совокупность таких точек полностью характеризует пространственное расположение в углепородном массиве газосборного ядра коллектора. Значимость этих точек в качестве индикатора при моделировании определяется, в первую очередь, возможностью установления пространственных характеристик коллектора путем решения задачи о размерах зоны неупругих деформаций вокруг этого ядра. Решение последней дает ответ на вопрос о запасах коллектора и является определяющим при поиске и обосновании решений по способам извлечения газа из него.

Область V – пластического течения – совместно с областями VI и VII полностью характеризует стадию запредельного деформирования. В области V коэффициент Пуассона составляет 0,5, деформация материала происходит без увеличения объема ($\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$). Эта область очень мала для хрупких материалов, к которым относится большинство горных пород, но велика для пластичных материалов с явно выраженными вязкими свойствами, например, каменной соли. В целом, на стадии запредельного деформирования прочность исследуемых образцов снижается от максимальной величины $R_{сж}$ – предела мгновенной прочности – до остаточной $R_{ост}$, а их разрушение характеризуется, прежде всего, тем, что коэффициент бокового расширения становится больше, чем 0,5. В этом случае увеличивается объем (дилатансия) испытываемого образца за счет увеличения числа и объема трещин. Газовая проницаемость образцов на этой стадии возрастает на порядки, достигая максимума на пределе остаточной прочности. Таким образом, примыкающая к ядру

часть массива, прочностные параметры которой соответствуют ниспадающему участку диаграммы деформирования в интервале $[R_{сж}, R_{ост}]$, можно рассматривать в качестве источника „быстрого газа“ (в данном случае использована терминология [7]). Внешняя граница этой части массива определяется как совокупность расчетных точек, в которых выполняется условие

$$\sigma_{экв} = k_c \cdot R_{сж}. \quad (2)$$

Значимость точки, разделяющей на диаграмме деформирования область IV и пластического течения V, приобретает особое значение при решении практических задач дегазации подработанных углепородных массивов, поскольку, например, размещение газоприемной части дегазационных скважин в разрушенной части массива может быть сопряжено с непреодолимыми трудностями при их эксплуатации [8].

Слева к области пластического течения примыкают области III и IV, отражающие поведение испытываемых образцов на конечном этапе допредельного деформирования. Эти области, прежде всего, характеризуются потерей образцами чисто упругих свойств. Так, в процессе деформирования в области III наблюдается увеличение коэффициента Пуассона, микрорастрескивание образца, а в области IV – коэффициент Пуассона, примерно, равен 0,5, и в материале образца наблюдается активный рост и слияние микротрещин. Последнее свидетельствует о том, что процесс деформирования приобрел необратимый характер. На рис. 1 рассматриваемые области отождествлены с участком кривой от максимума осевой нагрузки σ до точки, где кривая проницаемости принимает минимальные значения. На рис. 1 видно, что по мере роста напряженного состояния от предела длительной прочности (упругости) $R_{упр}$ до предела мгновенной прочности проницаемость от своего минимального значения также возрастает на порядки, но, в отличие от области пластического течения V, темпы ее прироста выше. Факт роста коэффициента проницаемости в области необратимых деформаций, начиная от предела упругости, позволяет представить зависимость для определения „порога уплотнения“ в следующем виде

$$\sigma_{экв} = k_c \cdot R_{упр}. \quad (3)$$

При этом множество точек, в которых выполняется условие (3), рассматриваются как точки-индикаторы, характеризующие расположение техногенного газового коллектора в пространстве. Установленное в результате численного решения множество этих точек определяет пространственное положение поверхности, в которой проницаемость массива достигает минимальных значений и которая может рассматриваться в качестве оболочки техногенного месторождения. Если на этой поверхности существует область или совокупность областей, в которых выполняется условие $k > 1$ мД (коллектор не

относится к категории „практически непроницаемый“), эти области должны быть дополнительно исследованы на предмет выявления возможных путей перетока метана из месторождения (или, наоборот, притока) на близлежащие горизонты или на поверхность. По данным [6], в областях III и IV, начиная от порога уплотнения, процесс развития трещин имеет неустойчивый характер и может продолжаться даже при отсутствии приращений внешней нагрузки и только в точках-индикаторах, в которых выполняется условие (2), разрушение происходит практически мгновенно. Последнее дает основания предполагать подвижной границу техногенной залежи, причем, только в сторону увеличения объема оконтуренного ею массива. В качестве доказательства можно привести примеры прорывов метана на поверхность, происходящие по истечении нескольких лет, а иногда десятков лет после остановки горных работ и закрытия шахты.

Важным обстоятельством, учет которого необходим как в процессе моделирования, так и при принятии решений, является тот факт, что на этапах деформирования от предела длительной прочности до предела мгновенной прочности изменение газопроницаемости в любом направлении одинаково (рис. 4), а отклонения вдоль главных напряжений наблюдаются только в области запредельного. Таким образом, структуризацию разнокомпонентно напряженного газонасыщенного породного массива вдоль главных напряжений, как фильтрационной системы, обуславливают деформационные процессы, приуроченные к областям VI – разупрочнения и разрыхления материала, V – пластического течения. В этих областях соотношение компонент напряжений будет столь же существенно влиять на коэффициент газопроницаемости, как и величина самих напряжений. Последний в направлении градиента газового давления можно рассматривать как функцию, аргументом которой является степень разнокомпонентности напряжений в плоскости, ортогональной фильтрационному потоку [3, 9].

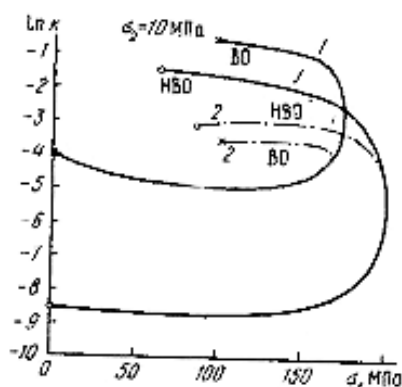


Рис. 4. Изменение коэффициента проницаемости выбросоопасных и невыбросоопасных песчаников в продольном (1) и поперечном (2) направлениях в зависимости от величины осевой нагрузки по данным А.Н.Ставрогина

Следующая область II, где модуль Юнга и коэффициент Пуассона постоянны, соответствует этапу деформирования в исключительно упругом режиме. Независимо от режима испытаний (заданные нагрузки или заданные деформации), в этой области происходит некоторое уменьшение объема образца за счет уменьшения пористости, что согласуется с известными результатами его испытаний на проницаемость. По мере роста осевой компоненты снижение проницаемости обоих типов песчаников хорошо описывается уравнениями экспоненциального вида, независимо установленными ранее в результате исследований, выполненных под руководством А.А. Скочинского. Важной особенностью рассматриваемого этапа деформирования является то, что материал образца на этом этапе не претерпевает изменений и в случае снятия нагрузки вернется к исходному состоянию. Точка примыкания I-й и II-й областей соответствует случаю, когда превышение осевой нагрузки над боковой отсутствует, то есть образец не нагружен или находится в условиях равнокомпонентного объемного сжатия. В реальном массиве в таком напряженном состоянии находится любой элементарный объем породы в нетронутом массиве. На рис. 1 эта точка находится на пересечении кривой с осью ординат, в идеальном случае в этой точке должно выполняться следующее условие

$$\sigma_{экв} = 0. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что совокупность точек, где $\sigma_{экв} = 0$, вообще говоря, поверхностью не является, поскольку это равенство должно выполняться в любой точке (элементарном объеме) нетронутого массива, где влияние подработки не сказывается. В результате расчетов с использованием численных методов и моделей, в основу которых положены допущения о непрерывности и сплошности среды, всегда будут получены отличные от нуля расчетные значения эквивалентного напряжения. При моделировании этот недостаток устраняется путем введения некоторой расчетной погрешности σ' , величина которой определяется особенностями разбиения модели на конечные элементы, может быть задана сколь угодно малой. Таким образом, при определении на модели пространственного положения поверхности, отделяющей подработанный массив от нетронутого, полагаем, что во всей совокупности составляющих ее точек выполняется условие $\sigma_{экв} - \sigma' = 0$, и, если $\sigma_{экв} < \sigma'$, то исследуемый элементарный объем относится к нетронутому массиву, в противном случае – к подработанному. Использование данной точки в качестве индикатора дает возможность верифицировать расчетную модель техногенного месторождения. Во-первых, для соблюдения геометрических параметров модели и налагаемых граничных условий с целью обеспечения подобия результатов моделирования геомеханическим процессам, протекающим в реальном массиве. Во-вторых, в зависимости от при-

кладываемых к границам изучаемой области нагрузок, поставить в соответствие начальное поле проницаемости пород нетронутого массива.

График деформации в области I отображает поведение образца на подготовительном этапе испытаний и к рассматриваемой задаче отношения не имеет.

Таким образом, выполнить анализ подработанного массива на предмет образования в нем техногенной газовой залежи, а также оценить пространственные и коллекторские параметры последней можно по четырем характерным точкам-индикаторам, отвечающим условиям (1)–(4), с помощью математических моделей, описывающих состояние и поведение массивов определенной структуры [5, 10 и др]. В этом случае представляется возможным прогнозировать параметры геомеханического состояния массива без ограничений на объем последнего, если такие ограничения не предусмотрены собственно моделью. В этой связи необходимо обеспечить однозначное соответствие между проницаемостью и геомеханическим состоянием как характеристикой деформируемости и прочности каждого отдельно взятого элементарного объема исследуемого массива при определенном силовом воздействии [6]. Такое соответствие может быть обеспечено путем „развертки“ экспериментально установленных ее значений вдоль эквивалентного напряжения $\sigma_{эКВ}$.

Суть такой „развертки“ заключается в следующем (рис. 5).

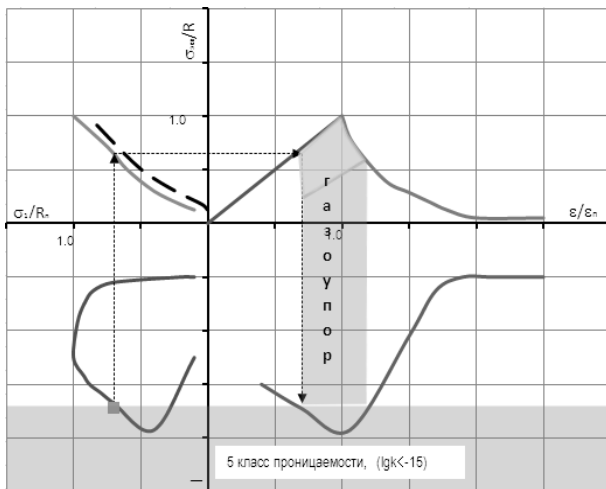


Рис. 5. Номограмма к определению проницаемости среды в области техногенной газовой залежи (■ – выделена область деформирования, соответствующая состоянию „практически непроницаемая“)

Пусть нам известно поведение функции $k = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, описывающей изменение проницаемости некоторого элементарного объема горной породы в условиях объемного нагружения. График этой функции расположим (рис. 5) в III-ем квадранте в безразмерных координатах $\sigma_1/R_{np3} - Lg(k)$, где R_{np3} в данном случае представляет собой предел прочности в

данных условиях нагружения, а диаграмму испытаний породных образцов на одноосное сжатие в режиме заданных деформаций – в первом квадранте в координатах $\sigma_{эКВ}/R_{np1} - \epsilon/\epsilon_{np}$, где ϵ_{np} – значение деформации, соответствующее R_{np1} . Установим соответствие объемного напряженного состояния эквивалентному. Графически указанное соответствие выражено приведенной во втором квадранте на рис. 5 кривой (в данном частном случае определенной по критерию прочности П.П. Баландина [10], и количественно характеризующей текущее объемное напряженное состояние эквивалентным). Эта кривая имеет совпадающие между собой в интервале $R_{np3} < \sigma_{эКВ} < R_{ост}$ восходящую и ниспадающую ветви (на рис. 5 ниспадающая ветвь показана штрихпунктирной линией). Любой произвольной точке нижней части кривой из квадранта III, таким образом, поставлена в соответствие точка на нижней части кривой из II-ого, а той, в свою очередь – соответствующая точка на восходящей ветви диаграммы деформирования. Аналогично, для любой произвольной точки верхней части кривой „ $\sigma - k$ “ имеется соответствующая точка на ниспадающей ветви диаграммы. Кривая, расположенная в четвертом квадранте, является искомой однозначной зависимостью $k = f(\sigma_{эКВ})$ и представляет собой совокупность точек пересечений нормалей, опущенных с кривой „ $\sigma_{эКВ} - \epsilon$ “ через ось $O\epsilon$ и кривой „ $k - \sigma_1$ “ через ось Ok .

На основании полученной таким образом „развертки“ проницаемости вдоль эквивалентного напряжения достаточно легко выделить аномальные зоны в подработанном массиве, характеризующие его как коллектор газа. На рис. 5 на оси $O-Lg(k)$ выделены интервалы, соответствующие общепринятой классификации пород-коллекторов по их проницаемости по данным А.А. Ханина. Проектируя их соответствующим образом через кривую „ $k - \sigma_{эКВ}$ “ на диаграмму „ $\sigma_{эКВ} - \epsilon$ “ и вычисляя путем обратного перехода соответствующие значения главных напряжений, можно определить пространственное расположение оболочки коллектора – его границы с непроницаемым массивом и, следовательно, не только размеры области коллектора, содержащей „медленный“ газ, но и его запасы [11].

Анализируя как геомеханические характеристики, так и коллекторские свойства образцов в точках-индикаторах, отметим, что в этих точках качественному изменению подвержен не только материал исследуемых образцов, но и параметры фильтрации. Таким образом, анализ под- или надработанного массива как коллектора газа с использованием характерных точек-индикаторов дает возможность прогнозировать характер изменения газопроницаемости даже в тех случаях, когда абсолютное ее значение неизвестно.

Выводы.

1. В непроницаемой углепородной толще в результате ее подработки могут быть сформированы

газовые коллекторы, способные при определенных условиях аккумулировать свободный метан. Степень изменения проницаемости пород, слагающих коллектор, образованный в угольной шахте в результате ведения добычных работ, предопределяется характером протекания геомеханических процессов во вмещающих породах и зависит от их механических и прочностных параметров.

2. Определенное в процессе лабораторных исследований или аналитическим путем значение проницаемости k породных образцов (кернов) в силу своей неоднозначности не может быть использовано напрямую для характеристики как отдельных областей, так и техногенного месторождения в целом. Для однозначной трактовки, параллельно с определением проницаемости массива (образца), необходимо оценить его геомеханическое состояние, при котором эта проницаемость определена.

3. С удалением от границы „обрушенные породы – вмещающий массив“ проницаемость последнего непрерывно убывает, достигая минимума в той его области, напряженно-деформированное состояние которой имеет признаки „порога уплотнения“. В массиве горных пород, проницаемость которых на два-четыре порядка ниже верхнего предела проницаемости пород-коллекторов, отнесенных к классу „практически непроницаемые“, эти области могут наряду с породами-газоупорами являться оболочкой (покрышкой) техногенного месторождения. Пространственное расположение таких областей может быть определено с использованием известных численных методов и моделей, а на границе этих областей должно выполняться условие (3).

4. Область углепородного массива, ограниченная поверхностью, названной порогом уплотнения, представляет собой техногенное газовое месторождение.

5. Анализ подработанного массива на предмет образования в нем техногенного газового коллектора, а также оценка пространственных и коллекторских параметров последнего, могут быть выполнены по четырем характерным точкам-индикаторам, отвечающим условиям (1)–(4) с помощью математических моделей, описывающих состояние и поведение массивов определенной структуры.

Список литературы / References

1. Majcherczyk, T., Szaszenko, A., Sdwiżkowa, E. (2006), *Podstawy geomechaniki* [Fundamentals of Geomechanics], Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne „AGH”, Kraków, Poland.

Majcherczyk, T., Szaszenko, A., Sdwiżkowa, E. (2006), *Podstawy geomechaniki* [Fundamentals of Geomechanics], Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne „AGH”, Kraków, Poland.

2. Вирішення геоекологічних і соціальних проблем під час експлуатації та закриття вугільних шахт / [Янукович В.Ф., Азаров Н.Я., Анциферов А.В. та ін.] – Донецьк: ТОВ „Алан“, 2002. – 480 с.

Yanukovych, V.F., Azarov, N.Ya. and Antsyferov, A.V. (2002), *Vyrishennia heoekolohichnykh ta sotsi-*

alnykh problem pid chas ekspluatatsii ta zkrystia vuhilnykh shakht [Resolving Geo-Ecological and Social Problems During the Operation and Closure of Mines], LLC “Alan”, Donetsk, Ukraine.

3. Шевелев Г.А. Фильтрация газа в шахтах / Г.А. Шевелев, В.Г. Перепелица – К.: Наукова думка, 2010. – 295 с.

Shevelev, H.A. and Perepelytsa, V.H. (2010), *Filtratsiya gaza v shakhtakh* [Filtration of Gas in Mines], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

4. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность горных пород / Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Галеев С.Н. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. – 224с.

Shashenko, A.N., Sdvyzhkova, Ye.A. and Gapieiev, S.N. (2008), *Deformiruemost i prochnost gornykh porod* [Deformability and Strength of Rocks], National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.

5. Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород / Кирничанский Г.Т. – К.: Наукова думка, 1999. – 179с.

Kyrnychanskyu, H.T. (1999), *Elementy teorii deformirovaniya i razrusheniya gornykh porod* [Elements of the Theory of Deformation and Fracture of Rocks], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

6. Баклашов И.В. Основы геомеханики / Баклашов И.В. – М.: МГУ, 2004. – 208 с.

Baklashov, I.V. (2004), *Osnovy geomekhaniki* [Fundamentals of Rock Mechanics], MGU, Moscow, Russia.

7. Булат А.Ф. Научно-технические основы создания шахтных когенерационных комплексов / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис – К.: Наукова думка, 2006. – 175 с.

Bulat, A.F. and Chemerys, I.F. (2006), *Nauchnotekhnicheskiye osnovy sozdaniya shakhtnykh kogeneratsyonnykh sistem* [Scientific and Technical Basis for Mine Cogeneration Systems], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

8. Брюханов П.А. Снижение деформации дегазационной скважины при сдвигении горных пород / П.А. Брюханов, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 2012. – № 9. – С. 26–29.

Bryukhanov, P.A. and Nazymko, V.V. (2012), “Reduced Deformation of Degassing Wells by Strata Movement”, *Ugol Ukrainy*, Vol. 9., pp. 26–29.

9. Изменение газовой проницаемости в напряженных горных породах. / [Перепелица В.Г., Кулинич В.С., Шевелев Г.А. и др.] // Уголь Украины. – 2006. – № 3. – С. 33–35.

Perepelytsa, V.H., Kulynych, V.S., Shevelev, H.A. (2006), “Change of the gas permeability in stressed rocks”, *Ugol Ukrainy*, Vol. 3., pp. 33–35.

10. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики. / [Новикова Л.В., Пономаренко П.И., Приходько В.В. и др.] – Днепропетровск: „Наука и образование“, 1997. – 180 с.

Novikova, L.V., Ponomarenko, P.I. and Prikhodko, V.V. (1997), *Metod granichnykh elementov v zadachakh gornoj mekhaniki* [The Boundary Element Method in Problems of Mining Geomechanics], Nauka i obrazovaniye, Dnepropetrovsk, Ukraine.

11. Прогноз метановиділення из підработаних порід в виробки виймочного участка/ [Лукинов В.В., Клец А.П., Бокий Б.В. и др.] // Уголь Украины. – 2011. – № 1. – С 50–53.

Lukynov, V.V., Klets, A.P. and Boky, B.V. (2011), "Prediction of methane production in undermined rock excavation site", *Ugol Ukrainy*, Vol. 1., pp. 50–53.

Мета. Розробка інструментарію для обстеження підробленого вуглепородного масиву на предмет утворення техногенних газових родовищ.

Методика. Геомеханічний стан і проникність порід підробленого масиву, що знаходяться в умовах об'ємного навантаження, визначені чисельними методами за параметрами, отриманими в результаті випробувань матеріалу цих порід на одноосьове стискання із застосуванням положень гіпотези еквівалентності об'ємного та одноосного напруженого стану.

Результат. Просторові й колекторські параметри техногенних газових родовищ однозначно характеризуються геомеханічним станом підробленого масиву та його газонасиченістю. Аналіз підробленого масиву на предмет утворення в ньому техногенного газового колектору, а також оцінка його просторових і колекторських параметрів, можуть бути виконані за чотирма характерним точкам-індикаторам за допомогою математичних моделей, що описують стан і поведінку масивів певної структури.

Наукова новизна. Використання порогу ущільнення як параметра, що характеризує оболонку техногенного родовища, дозволяє врахувати неконтрольовані міжпластові перетоки метану в межах родовища, у тому числі, на поверхню. Область вуглепородного масиву, обмежена поверхнею із властивостями порогу ущільнення, являє собою техногенне газове родовище.

Практична значимість. Оцінка доцільності експлуатації підробленого масиву діючих і закритих шахт як колекторів газу, пошук та обґрунтування рішень щодо способів добування газу з них.

Ключові слова: *вуглепородний масив, газове родовище, геомеханічні характеристики, еквівалентний напружений стан; діаграми деформування, контрольовані деформації, подоба процесів*

Purpose. To develop the tools for technogenic gas deposits survey in the undermined coal-bearing rock massif.

Methodology. Authors have determined the rock-mechanical state and permeability of rock in the undermined coal-bearing massif under triaxial loading by means of numerical methods on the base of the parameters obtained during testing the samples of these species on uniaxial compression with application of the hypothesis of equivalence triaxial and uniaxial stress state.

Findings. Rock-mechanical state and gas saturation of a rock massif characterize unambiguously the spatial and reservoir parameters of technogenic gas deposits. The analysis of an undermined massif concerning the formation of the gas deposit and the assessment of its spatial and reservoir parameters can be performed by four characteristic points by means of the mathematical model describing the state and behavior of the massif with a specific structure.

Originality. Using the compaction threshold as a parameter characterizing the shell of a technogenic gas deposit we are able to register the uncontrolled flows of methane between the layers of the deposit or to the surface. The part of rock massif within the rock shell characterized by the compaction threshold can be considered a technogenic gas deposit.

Practical value. We can estimate the expedience of use of operating and abandoned mines as gas reservoirs, and search and substantiate the ways of gas production.

Keywords: *coal containing rocks, gas field, geo-mechanical characteristics, equivalent stress, strain diagram, controlled deformation, similar processes*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.В. Солодянкіним. Дата надходження рукопису 27.05.13.