

УДК 622.831.325

А.Н. Шашенко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
 Е.В. Кухарев<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
 С.Н. Гапеев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
 А.Ю. Еременко<sup>2</sup>

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

## ПОШАГОВАЯ ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПОДРАБОТАННОГО УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА КАК ГАЗОВОГО КОЛЛЕКТОРА

A.N. Shashenko<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
 Ye.V. Kukharev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.),  
 S.N. Gapeyev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
 A.Yu. Yeremenko<sup>2</sup>

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

### STEP-BY-STEP PROCEDURE OF ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF AN UNDERMINED COAL-ROCK MASSIF AS A GAS COLLECTOR

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

**Методика.** Пространственные параметры техногенной газовой залежи определены методами численного моделирования с учетом результатов испытаний материала вмещающих пород на одноосное сжатие. Пространственные параметры коллектора устанавливались с привязкой к напряженно-деформированному состоянию подработанного массива, которому, в свою очередь, ставилось в соответствие поле проницаемости слагающих его пород. Условная поверхность, на которой расчетные значения проницаемости принимают минимальные значения, является оболочкой (экранирующей поверхностью) техногенного месторождения.

**Результаты.** В неоднородном слоистом массиве с различными геометрическими и прочностными параметрами слоев техногенное месторождение имеет сложную форму, оно вытянуто вдоль наименее крепких слоев и, наоборот, сжато вдоль более крепких. Оболочка техногенной залежи, препятствующая оттокам (притокам) через нее метана, приурочена к той части подработанного массива, которая характеризуется минимальными значениями проницаемости горных пород и имеет четкую количественную характеристику

**Научная новизна.** Пространственные параметры техногенных газовых месторождений однозначно характеризуются геомеханическим состоянием подработанного массива. Для определения этих параметров предложена пошаговая процедура, суть которой заключается в том, что напряженно-деформированное состояние углепородного массива исследуется на модели, которая нагружается аналогично породному образцу при его лабораторных испытаниях в режиме контролируемых деформаций, что позволяет обеспечить подобие исследуемого на модели процесса реальному.

**Практическая значимость.** Оценка целесообразности эксплуатации подработанных массивов действующих и закрытых шахт как коллекторов газа, поиск и обоснование решений по способам извлечения газа из них. Проницаемость пород техногенного коллектора находится в безусловной зависимости от напряженно-деформированного состояния вмещающего массива, а понятие „оболочка (экранирующая поверхность)“ этого коллектора, определяемое ранее исключительно качественными (неформализуемыми) категориями, поставлена в соответствие четкая количественная характеристика.

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

**Актуальность.** Неподверженный влиянию горных работ углепородный массив Донбасса весьма газонасыщен, но в плане промышленной добычи метана бесперспективен ввиду его низкой проницаемости. По мере развития очистных работ в массиве происходят структурные изменения, в результате которых его проницаемость на отдельных участках может увеличиваться на несколько порядков. Образованные в результате

выемки угля полости имеют признаки подземных газосборных коллекторов – аккумуляторов метана. И хотя опыт добычи шахтного метана свидетельствует о том, что его промышленная добыча из подработанных массивов закрытых шахт не всегда нецелесообразна [1], но даже в этом случае оценка параметров подработанного массива как газового коллектора представляется актуальной в плане исключения неконтролируемых прорывов

вов метана на поверхность, а также решения других задач в рамках проблем post-mining [2].

**Состояние вопроса.** Подработанный массив не является объектом прямого доступа. Некоторые его характеристики установлены при геологической разведке месторождения и на этапе ведения добычных работ. Их объем недостаточен для принятия обоснованных решений относительно целесообразности эксплуатации того или иного техногенного газового месторождения, некоторые из этих параметров имеют тенденцию к изменению после завершения горных работ. Кроме того, объект структурно неоднороден, и параметры, определенные в некоторой его зоне, чаще всего не могут быть применены для оценки его поведения в другой. Такое положение предопределяет необходимость наличия при принятии решений некоторых дополнительных данных, определение большинства из которых непосредственно на объекте невозможно априори. Кроме того, разнообразие целей и задач предопределяет не единственность в путях обследования. Наиболее эффективным средством решения такого рода задач на сегодняшний день является моделирование, основанное на численных методах [3].

**Введение.** Эффективность добычи шахтного метана из подработанного массива в первую очередь определяется его запасами и скоростью (интенсивностью) отбора газа, обуславливающую продуктивность дегазационных скважин. Можно полагать, что запасы коллектора составляют те количества метана, которые находятся между полостью, образованной в результате очистных работ, и экранирующей поверхностью оболочки месторождения. В первом приближении эти запасы, с учетом тех объемов метана, которые удалены при ведении очистных работ, можно определить, используя основные положения известных методик [4,5], согласно которым для оценки прогнозных ресурсов, средоточенных в подработанном массиве, достаточно определить размеры интервалов разгрузки, обусловленной выемкой пласта, в сторону пород кровли. Причем, при принятии решений о дегазационных мероприятиях наличие в пределах интервала разгрузки вмещающих пород с экранирующими свойствами не учитывается, поскольку полагается, что дегазационные скважины пересекают все газоносные геологические объекты с извлекаемыми запасами. Таким образом, применяемыми методиками понятие „оболочка месторождения“ априори трактуется как совокупность пересекающихся условных плоскостей, ограничивающих коллектор:

- 1) снизу – почвой отработанного пласта;
- 2) сверху – плоскостью, параллельной почве и отстоящей от нее на расстояние, равное максимальному расчетному интервалу разгрузки;
- 3) сбоку – плоскостями, проходящими через оконтуривающие отработанный пласт горные выработки по нормали к его почве.

Из обозначенных выше, научно обоснованной можно полагать только верхнюю границу коллектора, причем только на момент пересечения лавой расчетного сечения. По мере продвижения лавы верхняя граница удаляется от почвы, о чем свидетельствуют установ-

ленный факт возрастания во времени прироста снизу вверх дебитов метана в дегазационные скважины, пробуренные с поверхности [1], и неконтролируемые прорывы метана на земную поверхность, происходящие по истечении нескольких лет, а иногда десятков лет после закрытия шахт. Что касается других границ коллектора, то их выбор, в большей мере, имеет интуитивный характер. Например, результаты параллельных измерений параметров напряженно-деформированного состояния мощного слоя надрабатываемого песчаника и газодинамического процесса, в нем протекающего, однозначно указывают на то, что фильтрационный объем коллектора может пополняться метаном из пород, расположенных ниже разрабатываемого пласта [6]. По данным [7] источниками пополнения метаном образовавшихся полостей могут выступать породы, расположенные в почве на удалении от пласта, кратном 50–60 его мощностям, а высвобождение (десорбция) и фильтрация метана в техногенный коллектор может наблюдаться на расстояниях до 2км от фронта горных работ. Кроме того, расчетные значения величин интервалов разгрузки устанавливаются вне зависимости от глубины залегания отработанного пласта, что свидетельствует о необходимости уточнения основных положений рассматриваемых методик.

**Постановка задачи.** Скорость отбора шахтного метана из техногенного коллектора определяется проницаемостью слагающих его пород и темпами пополнения метаном фильтрационного объема коллектора за счет десорбции. Вопросы массообмена между сорбционным и фильтрационным объемами не входят в задачи настоящего исследования. Относительно проницаемости пород коллектора следует отметить, что практически во всех посвященных этому вопросу исследованиях отмечается ее безусловная зависимость от напряженно-состояния вмещающих пород. На основании анализа и обобщения результатов исследований проницаемости горных пород в условиях объемного нагружения (рис. 1) установлено, что пространственные параметры техногенного газового коллектора можно охарактеризовать четырьмя непересекающимися (вложенными) поверхностями, на которых эквивалентное напряжение  $\sigma_{эжв}$  последовательно принимает значения 0,  $R_{упр}$ ,  $R_{сжв}$ ,  $R_{ост}$ , где  $R_i$  – пределы, соответственно, длительной, мгновенной и остаточной прочности пород коллектора. На этих поверхностях материал вмещающих пород в результате деформирования претерпевает качественные изменения, и проницаемость, как функция напряженно-состояния, меняет свое поведение. В интервалах между поверхностями поведение газовой проницаемости, как функции напряженного состояния, известно и предсказуемо. Координаты указанных поверхностей могут быть определены путем численного решения задачи об упругопластическом деформировании горного массива вокруг полости произвольного очертания, если в процессе решения использовать данные испытаний образцов горных пород на одноосное сжатие в режиме контролируемых деформаций и положения об эквивалентных напряжениях [3]. Таким образом, пространственные параметры коллектора определяются в при-

вязке к напряженно-деформированному состоянию подработанного массива, которому, в свою очередь, может быть поставлено в соответствие поле проницаемости слагающих его пород, что дает возможность оценить степень изменения газовой проницаемости любого элементарного объема массива после его подработки.

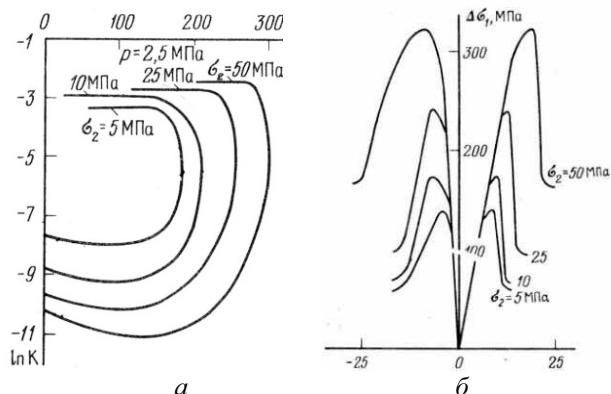


Рис. 1. Изменение газовой проницаемости  $k$  (а) образцов песчаника на разных этапах их деформирования (б) по данным Ставрогина А.Н., Протосени А.Г., где  $\sigma_2 = \sigma_3$  – боковая нагрузка;  $\Delta \sigma_1$  – превышение осевой нагрузки  $\sigma_1$  над боковой

Определенные координаты точек (здесь и далее в пределах ошибки вычислений, обусловленной выбором того или иного численного метода), отвечающих условию  $\sigma_{эжв} = 0$ , представляет собой область угленородного массива, где влиянием подработки можно пренебречь. В подработанном массиве всегда  $\sigma_{эжв} > 0$ , следовательно, первая поверхность является границей, отделяющей подработанный массив от его остальной части. В плане практического применения эта поверхность весьма условна. Важность ее определения обусловлена необходимостью соблюдения подобия процессов, исследуемых на модели и протекающих в реальном массиве. В качестве показателя, характеризующего такое подобие, является соотношение размеров подработанной и нетронутой частей массива, где последний выступает в модели аналогом нагружающего устройства кинематического типа, на котором выполнены испытания пород на одноосное сжатие в режиме заданных деформаций [3]. Достоверность результатов моделирования, например, методом конечных элементов ограничивается моментом, когда зона дополнительно нагруженных элементов (аналог подработанного массива) составляет не более 20% от площади расчетной области, в противном случае адекватность результатов моделирования сомнительна, поскольку теряется устойчивость модели [8].

Следующая поверхность, в каждой точке которой выполняется условие  $\sigma_{эжв} = R_{упр}$ , характеризуется минимально возможными в конкретно рассматриваемых условиях значениями проницаемости горных пород. Впервые такая поверхность установлена в результате исследований, выполненных под руководством акад. А.А. Скочинского, и названа „порогом уплотнения“.

Порог уплотнения является своеобразным барьером, препятствующим перетокам через него метана, и в угленородном массиве, отнесенном к категории „практически непроницаемый“, в наибольшей мере отвечает свойствам оболочки подземного газового коллектора.

Влияние подработки на участке от границы нетронутого массива до рассматриваемой поверхности проявляется только в упругом деформировании, без нарушения их сплошности, горных пород и снижении до некоторой минимальной величины их проницаемости, о чем свидетельствуют результаты испытаний на прочность (рис. 1). Далее от порога уплотнения вглубь подработанного массива его деформирование выходит за пределы упругой области, что сопровождается резким ростом газовой проницаемости, причем темпы ее роста наиболее высоки в сравнении с другими областями деформирования. Отличительной особенностью этого участка является одинаковый рост проницаемости во всех направлениях. Породы в этой части массива еще сохраняют устойчивость (на диаграммах деформирования – допредельная область), но материал этих пород претерпевает необратимые структурные изменения, которые могут продолжаться даже без приложения внешней нагрузки, что свидетельствует о возможном перемещении порога уплотнения в сторону нетронутого массива. Внутреннюю границу этого участка, представленную в виде условной поверхности, в каждой точке которой  $\sigma_{эжв} = R_{эжв}$ , разрушение пород как результат влияния подработки происходит практически мгновенно. Прочность пород участка, ограниченного этой поверхностью сверху, падает, но, при каком-либо перераспределении внешней нагрузки, оставшиеся структурные связи обеспечивают способность этих пород деформироваться упруго. На этом этапе деформирования происходит структуризация горных пород как фильтрующей среды [6], о чем свидетельствуют разные скорости ее роста в направлениях главных напряжений. В целом проницаемость пород коллектора в сравнении с предыдущим рассмотренным участком на порядок выше. Максимальных значений проницаемость достигает на границе вмещающий массив – обрушенные породы, в качестве количественной характеристики которой выступает поверхность, отвечающая условию  $\sigma_{эжв} = R_{ост}$ . Проницаемость ядра коллектора – области обрушенных пород – независима от проницаемости слагающих ее отдельных кусков породы (рис. 1, а), определяется размерами этих кусков и степенью их уплотнения.

Ядро окружено вмещающими породами, проницаемость которых в сравнении с нетронутом массивом, вследствие подработки, существенно, на порядки изменилась. Степень изменения проницаемости на различных участках вмещающих пород различна и зависит не столько от величины главных напряжений, сколько от их соотношения во взаимосвязи со структурными изменениями среды фильтрации. Однако оценка проницаемости в некотором элементарном объеме исследуемого массива не может быть осу-

ществлена только на основании данных о перераспределении напряжений в этом объеме, наличие которых является лишь необходимым условием для такой процедуры. Достаточным условием является геомеханическая характеристика этого объема, связывающая структурные изменения материала до и после перераспределения напряжений. Учет необходимого и достаточного условий обусловлен тем обстоятельством, что зависимости „ $\sigma-k$ “ и „ $\sigma-\varepsilon$ “ как функции неоднозначны (рис. 1). При использовании численных методов факт неоднозначности этих зависимостей означает, что система уравнений относительно перемещений становится вырожденной, в результате чего вычислительный процесс не может быть продолжен [3].

**Основная часть.** Для одновременного учета необходимого и достаточного условий предлагается использовать пошаговую процедуру, суть которой заключается в том, что напряженно-деформированное состояние исследуется на модели, которая нагружается аналогично породному образцу при его лабораторных испытаниях в режиме контролируемых деформаций, причем на конечном шаге величина нагрузки соответствует глубине оработанного пласта  $H$  и составляет  $\gamma H$ . Это дает возможность своевременно установить факт перехода геомеханического состояния отдельно взятого элементарного объема из области упругого деформирования к области неупругого и применить впоследствии для исследования поведения этого объема в неупругой области соответствующий математический аппарат, учитывающий, в том числе, и ту часть полной диаграммы деформирования горной породы, которая описывает поведение разрушенного породного образца с остаточными упругими связями. Таким образом, пошаговая процедура, наряду с возможностями современных ЭВМ, представляет собой численный эксперимент с учетом „истории“ процесса – исследование на каждом последующем шаге выполняется с учетом последствий, обусловленных предыдущими нагружениями.

При этом полагаем, что результаты испытаний породных образцов каждой литологической разности на одноосное сжатие в режиме заданных деформаций нам известны и представлены диаграммой, приведенной на рис. 2 (для удобства изложения материала представленная на рис. 2 диаграмма построена в предположении равенства пределов длительной и мгновенной прочности, т.е.  $R_{упр}=R_{сжс}$ ). Таким образом, в модели вся исследуемая область массива отождествлена совокупностью примыкающих друг к другу конечных элементов, напряженное состояние которого, наряду с главными напряжениями, можно характеризовать также эквивалентным. Полагаем также, что для каждого элементарного объема известно функциональное соотношение, описывающее ниспадающую ветвь диаграммы, а размеры модели выбраны таким образом, что процессы, протекающие в реальном массиве и исследуемые на модели, подобны. Это позволяет обоснованно воспользоваться гипотезой эквивалентности напряженных состояний и полагать, что поведение элементарного объема массива при изменении его напряженно-деформированного состояния эквивалентно поведению пород-

ного образца при его испытаниях на одноосное сжатие в режиме заданных деформаций.

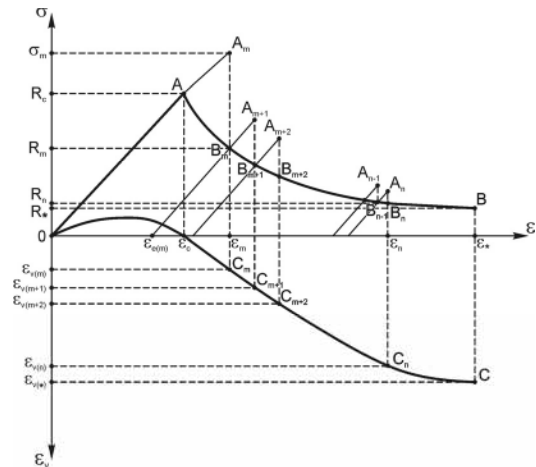


Рис. 2. Диаграмма испытаний образца в режиме заданных деформаций (к процедуре пошагового решения)

Диаграмма состоит из двух частей: линейного участка упругого деформирования  $OA$  и ниспадающей ветви предельных напряженных состояний  $AB$ , а также кривой  $OC$ , описывающей объемные деформации  $\varepsilon_v$ . Если известны результаты испытаний образца на прочность, они также могут быть развернуты в виде кривой (на рис. 2 не показана) вдоль диаграммы в соответствие с методикой [9]. Координаты точки  $O$  соответствуют ненагруженному образцу ( $\sigma=0, \varepsilon=0, \varepsilon_v=0$ ), точки  $A$  – предельному напряжению и деформации упругости ( $\sigma=R_{сжс}, \varepsilon=\varepsilon_{сжс}, \varepsilon_v=0$ ), а точки  $B$  и  $C$  – напряжениям и деформациям окончательного разрушения ( $\sigma=R_{ост}, \varepsilon=\varepsilon_s, \varepsilon_v=\varepsilon_{v*}$ ). Таким образом и в связи с изложенным выше, ординаты точек  $O, A, B$  являются численными значениями  $\sigma_{эжв}$  на поверхностях, соответственно, границы подработанной области с нетронутым массивом, оболочки коллектора и границы области обрушенных пород с вмещающим массивом. Абсциссы этих точек, в свою очередь, являются численной характеристикой геомеханического состояния пород массива на этих поверхностях. Эквивалентность одноосного и объемного напряженных состояний устанавливается подбором соответствующей теории прочности через критериальные соотношения (Баландина, Парчевского-Шашенко, Хоека-Брауна и др) [3].

Суть пошаговой процедуры заключается в следующем. Модель исследуемого массива разбивается на конечные элементы, каждый из которых представляет собой некоторый элементарный объем в пределах одной литологической разности. Использование численных методов позволяет, в соответствии с приращением внешнего давления в узлах конечно-элементного разбиения, определить приращение перемещений, а в точках интегрирования Гаусса каждого конечного элемента – соответствующие приращения деформаций и напряжений, что дает общую картину напряженно-деформированного состояния исследуемой области. В этой связи

алгоритм пошаговой процедуры изложим применительно к одному выбранному произвольно объему. На первом шаге расчета напряженно-деформированного состояния гидростатически нагруженного массива, вмещающего полость известной конфигурации, величины вертикальной и боковой нагрузок принимаются равными  $(1/n) \cdot \gamma H$ , где  $n$  – заданное число шагов. Численным методом в упругой постановке получаем решение задачи о напряженно-деформированном состоянии выбранного элементарного объема и по комбинации главных напряжений определяем эквивалентное. Если расчетное значение эквивалентного напряжения совпадает на диаграмме деформирования с одной из точек прямой  $OA$  ( $\sigma_{экв} \leq R_{сж}$ ), можно полагать, что напряженное состояние исследуемого массива не вышло за рамки упругого деформирования, и переходим к следующему шагу расчетов. Далее величина вертикальной и боковой нагрузок принимается, соответственно, равной  $(2/n) \cdot \gamma H$ , и так далее до тех пор, пока расчетная величина  $\sigma_{экв} = \sigma_m$  не превысит предел прочности материала этого объема на одноосное сжатие  $R_{сж}$ . Факт такого превышения означает, что напряженное состояние исследуемого элементарного объема вышло за рамки упругого деформирования, а в структуре материала этого объема произошли необратимые изменения. Если предположить, что возмущения, обусловленные влиянием полости на этот элементарный объем, можно внезапно ликвидировать (в лабораторном эксперименте, например, – снять нагрузку на испытываемый образец), то в этом случае характер структурных изменений таков, что материал этого объема уже никогда не возвратится к исходному состоянию. Результаты таких изменений свидетельствуют о том, что:

1) в исследуемом элементарном объеме проявились признаки дилатансии (увеличение в объеме исключительно за счет увеличения имеющихся и возникновения новых трещин); количественно суммарный прирост трещинно-порового пространства характеризуется объемной деформацией в точке  $S_m$ , определяемой как пересечение нормали, проведенной из точки  $A_m$  к оси абсцисс, с кривой  $\varepsilon_v$  (ветвь  $OC$ );

2) его прочность (как способность сопротивляться различного рода внешним нагрузкам) снизилась, но оставшиеся структурные связи обеспечивают способность этих пород деформироваться упруго;

3) проницаемость элементарного объема получила тенденцию к росту;

4) в исследуемом объеме интенсифицировались процессы десорбции;

5) этот объем является частью потенциального месторождения;

6) использование для последующего анализа поведения диаграммы в том виде, как она представлена на рис. 2, является не совсем корректным, поскольку качественно изменилась структура материала этого объема.

Действительно, если предположить, что этот объем возможно изъять из массива и повторно подвергнуть испытаниям на одноосное сжатие, то будет получена другая, отличная от представленной на рис. 2, диа-

грамма деформирования. Кроме того, полученное в результате решения упругой задачи на шаге  $m$  значение эквивалентного напряжения соответствует точке  $A(\sigma_m, \varepsilon_m)$ , лежащей вне множества точек, составляющих кривую  $OAB$ , что свидетельствует о том, что не выдерживается подобие исследуемых процессов.

Пошаговая процедура, с учетом ретроспективных данных о деформировании этого элементарного объема, до шага  $m+1$  дает возможность следующим образом определить конфигурацию новой диаграммы деформирования, учитывающей изменения в структуре материала этого объема. Величины вертикальной и боковой нагрузок, на основании которых определено значение  $\sigma_m$  на шаге  $m$ , принимались равными  $m \cdot \gamma H/n$ , а координаты  $A(\sigma_m, \varepsilon_m)$  лежат на пересечении продолжения отрезка прямой  $OA$  с нормалью, проведенной из точки  $\sigma_m$  оси ординат. По известному функциональному соотношению, описывающему ниспадающую ветвь диаграммы, определяется точка  $B_m(\varepsilon_m, R_m)$ . Тогда значение  $R_m$  (проекция точки  $B_m$  на ось ординат) является величиной, соответствующей новому предельному упругому состоянию материала элементарного объема с учетом его разрушения при предыдущих нагружениях. Следовательно, кривая, последовательно соединяющая точки  $\varepsilon_{e(m)}$ ,  $B_m$  и  $B$ , является новой диаграммой, отражающей деформирование исследуемого элементарного объема при его последующем нагружении на шаге  $m+1$ . Таким образом, новая диаграмма деформирования определяется путем изъятия из старой, представленной на рис. 2, четырехугольника  $OAB_m \varepsilon_{e(m)}$ , площадь которого равна затратам энергии на деформирование и разрушение материала элементарного объема при его нагружении на первых  $m$  шагах. Вычислительный процесс повторяется до тех пор, пока на последнем шаге  $n$  не будет в процессе математического эксперимента исследован полный цикл изменений геомеханического состояния всех элементарных объемов горного массива, обусловленный влиянием полости, созданной искусственным путем на глубине  $H$ . Таким образом, на последующих шагах от  $m+1$  до  $n$  расчетным путем устанавливается степень изменений в структуре материала исследуемого элементарного объема, которая является определяющей как при оценке изменения проницаемости, так и скорости притока газа, десорбирующегося и перетекающего из этого объема в техногенный коллектор.

В заключительной фазе по расчетным значениям эквивалентных напряжений, определенных для каждого элементарного объема на шаге  $n$ , определяются пространственные координаты коллектора. При этом совокупность элементарных объемов, где  $\sigma_{экв} = R_{ост}$ , представляет собой границу, внутри которой вмещающие породы полностью потеряли связность. Оболочке коллектора соответствует совокупность элементарных объемов, в которых проницаемость массива минимальна, т.е.  $\sigma_{экв} = R_{упр}$ . При этом каждому элементарному объему может быть поставлена в соответствие его газовая проницаемость по методике „развертки“ [9].

Пошаговая процедура апробирована путем решения тестовых задач. В качестве объекта обследования принимался однородный анизотропный массив, вмещающий на глубине  $H$  протяженную полость круговой формы. Выбор такого объекта обусловлен возможностью сопоставления расчетных данных с известным аналитическим решением [3], проверенным, в свою очередь, экспериментально. Сравнение результатов численного решения с аналитическим свидетельствует о их удовлетворительной сходимости. В частности, отклонения по относительному радиусу зоны неупругих деформаций не превышают 7,4%, а по величине смещений на контуре полости – 7,9%. Следует отметить, что особенностью любой пошаговой процедуры является накопление ошибки с увеличением числа шагов (итераций) при расчетах. Недостаточное число шагов обуславливает такую ошибку априори. Оптимальное число шагов, при которых накапливаемая ошибка минимальна и составляет не более 8%, для глубин разработки порядка 0,8–1,0 км, установлено на основании сопоставления расчетных данных с данными натурных замеров и колеблется в пределах 12–15. Для месторождений, расположенных на

более глубоких горизонтах, число шагов рекомендуется уточнить.

Далее на тестовой задаче проведены исследования влияния слоистости массива на конфигурацию экраняющей поверхности, определяемой из условия  $\sigma_{экс} = R_{сж} = R_{упр}$ . Расчеты начинались с решения задачи для однородного массива (т.е. при отсутствии слоистости) и проводились в такой последовательности, чтобы неоднородность структуры массива от задачи к задаче увеличивалась, постепенно приближаясь к реальной структуре углевлмещающей толщи (в данном случае – по пласту  $l_8$  в пределах поля шахты „Белозерская“ ГП „Добропольеуголь“). В процессе расчетов последовательно, путем сопоставления эквивалентного напряженного состояния с реальными прочностными характеристиками массива (таблица) прослеживалось изменение напряженно-деформированного состояния, формы и размеров зоны упругого и неупругого деформирования пород вокруг этой полости, а также величины остаточной прочности материала в ее пределах по мере роста степени неоднородности массива. Глубина заложения выработки принималась равной от 600,0 до 1,0 км, условия на контактах слоев не учитывались.

Таблица

Физико-механические свойства пород, принятые при численных расчетах

Показатель	Уголь	Аргиллит	Алеврит	Песчаник
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	10,0	22,0	30,0	50,0
Предел прочности на одноосное растяжение, МПа	1,0	2,2	3,0	5,0
Предел прочности на сдвиг, МПа	2,0	5,0	7,0	11,0
Модуль Юнга, Е, МПа	$36,0 \cdot 10^3$	$59,0 \cdot 10^3$	$67,5 \cdot 10^3$	$11,5 \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона	0,16	0,23	0,23	0,21
Объемная плотность, МН/м <sup>3</sup>	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$

На рис. 3 представлены результаты вычислений для случаев однородного и слоистого массива, содержащего в кровле мощный слой крепкого песчаника. Различная окраска конечных элементов соответствует различной степени разупрочнения. Анализ результатов показал, что, в огибающей полость однородном массиве, оболочка (внешняя граница) месторождения симметрично охватывает полость и повторяет ее форму (рис. 3, а). Наоборот, в слоистом массиве с различными геометрическими и прочностными параметрами слоев, техногенное месторождение принимает достаточно сложную форму, вытянутую вдоль наименее крепких слоев и, наоборот, сжатую относительно более крепких (рис. 3, б).

Как в том, так и в другом случаях удаление границы от полости определяется исключительно прочностными свойствами вмещающих пород.

В целом, результаты тестовой, а также отдельных практических задач показали широкие возможности пошаговой процедуры при обследовании и оценке состояния подработанных горных массивов как газовых коллекторов техногенного происхождения.

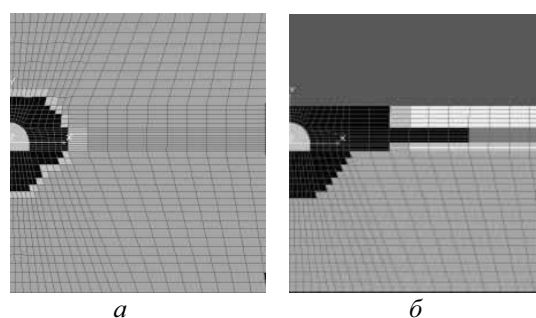


Рис. 3. Конфигурация техногенной газовой залежи вокруг одиночной полости, заложеной в однородном (а) и слоистом (б) массивах

Такие возможности, в первую очередь, обусловлены:

- 1) снятием ограничений, обусловленных конфигурацией полости беспорядочного обрушения;
- 2) количественной характеристикой такого понятия как „оболочка коллектора“, определяемой ранее только качественными (неформализуемыми) категориями;

3) соблюдением подобия процессов, исследуемых на модели и протекающих в реальном массиве.

#### Выводы.

1. Проницаемость пород техногенного коллектора находится в безусловной зависимости от напряженно-деформированного состояния вмещающих пород.

2. Пространственные параметры техногенного газового коллектора могут быть определены путем численного решения задачи о зоне неупругих деформаций в горном массиве, вмещающем полость произвольного очертания. При этом, используя в процессе решения данные испытаний на одноосное сжатие в режиме контролируемых деформаций и положения об эквивалентных напряжениях, пространственным параметрам коллектора может быть поставлено в соответствие поле проницаемости слагающих его пород, что дает возможность оценить степень изменения газовой проницаемости любого элементарного объема массива после его подработки.

2. Пространственное расположение коллектора охарактеризуем четырьмя непересекающимися (вложенными) поверхностями, на которых эквивалентные напряжения последовательно принимают значения  $\sigma_{\text{экс}} = 0$  (нетронутый массив), а также равные пределам, соответственно, длительной, мгновенной и остаточной прочности пород коллектора. В интервалах между поверхностями поведение газовой проницаемости, как функции напряженного состояния, известно и предсказуемо.

3. Подобие процессов, исследуемых на модели и протекающих в реальном массиве, характеризуется соотношением размеров в модели фрагментов подработанного и нетронутого частей массива, где последний выступает аналогом нагружающего устройства кинематического типа, на котором выполнены испытания пород на одноосное сжатие в режиме заданных деформаций.

4. Оболочка (в других работах – покрывка, экранящая поверхность) техногенной залежи, препятствующая оттокам (притокам) через нее метана, приурочена к той части подработанного массива, которая характеризуется минимально значениями проницаемости горных пород, и имеет четкую количественную характеристику  $\sigma_{\text{экс}} = R_{\text{упр}}$ .

6. Степень изменения проницаемости в различных областях подработанного массива различна и зависит от соотношения величин главных напряжений во взаимосвязи со структурными изменениями среды фильтрации. Необходимыми условиями при оценке проницаемости некоторого элементарного исследуемого объема являются данные о перераспределении напряжений в этом объеме, достаточным – геомеханическая характеристика этого объема, связывающая структурные изменения материала до и после перераспределения напряжений. Оба эти условия учитываются пошаговой процедурой, в первую очередь, за счет устранения неоднозначности зависимостей „ $\sigma$ - $k$ “ и „ $\sigma$ - $\varepsilon$ “ и соблюдения подобия исследуемого процесса и реального.

5. В неоднородном слоистом массиве с различными геометрическими и прочностными параметрами слоев

техногенное месторождение принимает достаточно сложную форму, вытянутую вдоль наименее крепких слоев и, наоборот, сжатую вдоль более крепких. Удаление границы газовой залежи от техногенной полости определяется исключительно прочностными параметрами пород вмещающего массива.

#### Список литературы / References

1. Звягильский Е.Л. Добыча метана из угольных месторождений Донбасса / Звягильский Е.Л., Бокий В.В., Касимов О.И. – Донецк: „Ноулидж“, 2011. – 150 с.

Zvyagilskiy, Ye.L., Boki, V.V. and Kasimov, O.I. (2011), *Dobycha metana iz ugoľnykh mestorozhdeniy Donbassa* [Extraction of Methane from Coal Deposits of Donets Basin], Knowledge, Donetsk, Ukraine.

2. Потенциал закрытой шахты – основа решения проблемы post-mining: материалы международной конференции “Форум горняков – 2011” / Г.Г. Пивняк, А.Н. Шашенко, Е.В. Кухарев [и др.] – Днепропетровск: ГБУЗ „НГУ“, 2011. – С. 15–24.

Pivnyak, G.G., Shashenko, A.N. and Kukharev, Ye.V. (2011), “Potential of a closed mine as a basis for post-mining problem solution”, *Proc. of the Int. Conf. Forum of Mining Engineers – 2011*, Dnipropetrovsk, Ukraine, pp. 15–24.

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

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

4. Техногенні скупчення метану в порушеному вуглеродному масиві. Методика прогнозування зон та визначення їх параметрів: СОУ 10.1.05411357.004: 2005. (Чинний від 2006-01-01.) – К.: Мінвуглепром України, 2005.

Anthropogenic accumulation of methane in a disrupted coal rock massif. The process of the areas forecasting and determination of their parameters. (2005), JMA 10.1.05411357.004:2005; Valid from Jan. 1, 2006, Ministry of Coal Industry of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

5. Прогноз метановыделения из подработанных пород в выработки выемочного участка / В.В. Лукинов, А.П. Клец, Б.В. Бокий [и др.] // Уголь Украины. – 2011. – № 1. – С 50–53.

Lukynov, V.V., Klets, A.P. and Boky B.V. (2011), “Prediction of methane emission from undermined rock into working area”, *Ugol Ukrainy*, Vol. 1., pp. 50–53.

6. Шевелев Г.А. Особенности фильтрационных процессов в углеродном массиве / Г.А. Шевелев, В.Г. Перепелица // Уголь Украины. – 2008. – № 6. – С. 37–40.

Shevelev, G.A. and Perepelitsa, V.G., (2008), “Features of filtration processes in coal rock massif”, *Ugol Ukrainy*, Vol. 6., pp. 37–40.

7. Геолого-геофизический поход к выявлению техногенных коллекторов на угольных месторождениях электромагнитным методом зондирования становления поля в ближайшей зоне / А.В. Анциферов, Л.А. Иванов,

А.А. Майборода [и др.] // Научный вестник НГУ. – 2007. – № 4. – С. 50–55.

Antsiferov, A.V., Ivanov, L.A. and Mayboroda, A.A. (2007), “Geological and geophysical approaches to exploration of anthropogenic collectors in coal deposits by electromagnetic sensing field formation in the nearest zone”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Vol. 4., pp. 50–55.

8. Проблемы горного дела и экологии горного производства / [ Должиков П.П., Рябичев В.Д., Левчинский Г.С. и др.] – Донецк: „Вебер“, 2007. – 257 с.

Dolzhiikov, P.P., Ryabichev, V.D. and Levchinskaya, G.S. (2007), *Problemy gornogo dela i ekologii gornogo proizvodstva* [Problems of Mining and Ecology of Mining], Weber, Donetsk, Ukraine.

9. Газопроницаемость угленородного массива, вмещающего техногенную полость: материалы V Международной научно-практической конференции / А.Н. Шашенко, Е.В. Кухарев, С.Н. Гапеев [и др.] – Краснодар, 2012. – С. 27–30.

Shashenko, A.N., Kuharev, E.V. and Gapeyev S.N., etc. (2012) “Gas permeability of coal containing massif accommodating an anthropogenic cavity”, *the 5th International Scientific and Practical Conf.*, Krasnodon, Ukraine, pp. 27–30.

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

**Методика.** Просторові параметри техногенного газового покладу визначені методами чисельного моделювання з урахуванням результатів випробувань матеріалу вміщуючих порід на одноосьове стискання.

**Результат.** У неоднорідному шаруватому масиві з різними геометричними та міцнісними параметрами шарів техногенне родовище має складну форму, воно витягнуте вздовж найменш міцних шарів і, навпаки, стиснуте вздовж більш міцних. Оболонка техногенного покладу, що перешкоджає відтоку (притокам) через неї метану, приурочена до тієї частини підробленого масиву, що характеризується мінімальними значеннями проникності гірських порід, і має чітку кількісну характеристику.

**Наукова новизна.** Просторові параметри техногенних газових родовищ однозначно характеризуються геомеханічним станом підробленого масиву. Для визначення цих параметрів запропонована покрокова процедура, суть якої полягає в тому, що напружено-деформований стан вуглепородного масиву досліджується на моделі, яка навантажується аналогічно пород-

ному зразку при його лабораторних випробуваннях у режимі контрольованих деформацій, що дозволяє забезпечити подобу досліджуваного на моделі процесу реальному.

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

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

**Purpose.** Development of tools for anthropogenic gas fields prospecting in undermined rock massifs.

**Methodology.** The spatial parameters of anthropogenic gas deposits have been identified by numerical simulation based on the results of uniaxial compression tests of enclosing rocks material.

**Findings.** We have determined that the anthropogenic deposits located in inhomogeneous layered massifs with different geometric and strength parameters of layers have complex shape, extended along weak layers and compressed along strong ones. The shell of the anthropogenic reservoir which prevents the outflow (inflow) of methane is dedicated to that part of the massif which is characterized by the lowest values of permeability. And it has a clear quantitative description.

**Originality.** Spatial parameters of the anthropogenic gas fields are uniquely characterized by the geomechanical condition of the undermined massif. To determine these parameters we have proposed the step by step procedure during which the stress-strain state of the rock massif is investigated on the model which is loaded similarly to the sample of rock during its controlled deformation tests in laboratory. This allows us to provide matching of the process studied on the model to the real process.

**Practical value.** Evaluation of the exploitation prospects of undermined massifs of operating and abandoned mines as reservoirs of gas; search and justifying of decisions on how to extract the gas from such reservoirs.

**Keywords:** *coal-rock massif, anthropogenic gas field, shell, geomechanical characteristics, equivalent stress, strain diagram, controlled deformations, similarity of processes*

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