

## ОЦЕНКА ГАЗОВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ ПРИ ДОБЫЧЕ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

**А. Н. Шашенко, В. А. Чередник**

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

просп. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепро, 49005, Украина. E-mail: cherednyk.v.a@nmu.one

Удовлетворение растущих мировых потребностей в энергии в новых сценариях энергетических стратегий в корне отличается от тех, что были ранее. Однако, несмотря на относительно низкие темпы роста спроса на ископаемое топливо (особенно на уголь и нефть), прогнозируется, что оно останется доминирующей частью энергетического баланса на глобальном уровне. Данное направление развития мирового энергетического сектора ставит перед промышленностью Украины серьезные задачи, наиболее актуальная из которых – энергоэффективность. Один из способов достижения эффективного использования ресурсов угольных шахт – добыча шахтного метана для дальнейшего использования в качестве источника дополнительной электроэнергии, генерирования тепла и также обеспечения безопасности разработки. Для рассмотрения обозначенного вопроса использованы методы натуральных, лабораторных и аналитических исследований. Натурные исследования заключаются в оценке газоносности газозольного месторождения, лабораторные – в особенности деформирования породных и угольных образцов в режиме заданных деформаций, аналитические – в установлении особенностей напряженно-деформированного состояния в окрестности очистных работ и оценке параметров потоков газа при отработке угольных пластов. Определено, что изменение проницаемости, обусловленное влиянием горных работ, в областях массива, характеризующихся, примерно, одинаковым геомеханическим состоянием, протекает монотонно и непрерывно. Предположено, что если указанные тенденции установлены, то для анализа параметров техногенного месторождения, как среды фильтрации, достаточными являются знания о величинах проницаемости в точках бифуркаций, а также в нетронутом массиве. Доказано, что коэффициент фильтрации находится в линейной зависимости от величины объемной деформации и связанной с нею величиной проницаемости. Данная зависимость позволяет вести прогноз этих величин на стадии лабораторных исследований породных образцов в режиме заданных деформаций. Практическая ценность исследований состоит в определении на стадии лабораторных и аналитических исследований на численных моделях расположения коллекторов газа.

**Ключевые слова:** метан, каменный уголь, пористость, дилатансия, фильтрация, коллекторы, напряжения, деформации.

## ОЦІНКА ГАЗОВОЇ ПРОНИКНОСТІ ПОРОДНОГО МАСИВУ ПІД ЧАС ВИДОБУТКУ МЕТАНУ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

**О. М. Шашенко, В. А. Чередник**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна. E-mail: cherednyk.v.a@nmu.one

Задоволення зростаючих світових потреб в енергії згідно до нових сценаріїв енергетичних стратегій в корені відрізняється від тих, що були раніше. На цей час лідируючі позиції починають займати природний газ, стрімко зростаюча відновлювальна енергетика та інші. Однак, незважаючи на відносно низькі темпи зростання попиту на викопне паливо (особливо на вугілля і нафту), прогнозується, що воно залишиться домінуючою частиною енергетичного балансу на глобальному рівні. Даний напрямок розвитку світового енергетичного сектора ставить перед промисловістю України серйозні завдання, найбільш актуальне з яких - енергоефективність. Один із способів досягнення ефективного використання ресурсів вугільних шахт - видобуток шахтного метану для подальшого використання в якості джерела додаткової електроенергії, генерування тепла і також забезпечення безпеки розробки. Для розгляду означеного питання використано натурні, лабораторні та аналітичні методи досліджень. Натурні дослідження полягають в оцінці газоносності газозольного родовища, лабораторні - особливості деформування породних і вугільних зразків в режимі заданих деформацій, аналітичні - у встановленні особливостей напружено-деформованого стану в зоні очисних робіт і оцінці параметрів потоків газу при відпрацюванні вугільних пластів. Визначено, що зміна проникності, що обумовлено впливом гірничих робіт, в областях масиву, які характеризуються приблизно однаковим геомеханічним станом, протікає монотонно і безперервно. Припущено, що при встановленні зазначених тенденції для аналізу параметрів техногенного родовища, як середовища фільтрації, достатніми є знання про величини проникності в точках бифуркації, а також в незайманому масиві. Доведено, що коефіцієнт фільтрації знаходиться в лінійній залежності від величини об'ємної деформації та пов'язаної з нею величиною проникності. Дана залежність дозволяє вести прогноз цих величин на стадії лабораторних досліджень породних зразків в режимі заданих деформацій. Практична цінність досліджень полягає у визначенні на стадії лабораторних і аналітичних досліджень на чисельних моделях розташування колекторів газу.

**Ключові слова:** метан, кам'яне вугілля, пористість, дилатансія, фільтрація, колектори, напруги, деформація.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Одной из основных проблем современности является состояние среды обитания человека. Большой вклад в ухудшение состояние экосистемы вносит топливная электроэнергетика, которая основывается на сжигании углеводоро-

дов, среди которых основной объем приходится на каменный уголь. Его замена на альтернативные (возобновляемые источники энергии – солнце, ветер, вода) – представляет суть идеи «декарбонизации», отстаиваемой «зеленым» движением.

Однако, полный отказ от топливной энергетики в настоящее время не возможен по причине отсутствия надежных аккумуляторов энергии. По оценке специалистов решение проблемы загрязнения окружающей среды побочными продуктами сжигания углеводородов (углекислый газ, пыль и т.д.) возможно только к 2050 году. Все это время уголь по-прежнему будет основным сырьем для топливных электростанций. Однако, его конкуренция по отношению к природному газу будет определяться величиной себестоимости. Ее снижение в рамках угольной шахты зависит от многих факторов, основным из которых являются уменьшение потребления электроэнергии, совершенствование подземной инфраструктуры и попутная добыча метана, которая позволяет рассматривать отработываемое месторождение, как газозольное. За счет сжигания добытого газа может вырабатываться дополнительная электроэнергия, генерироваться тепло, повышаться безопасность условий разработки.

Эффективное решение задач по добыче шахтного метана определяют знания о коллекторских и ёмкостных свойствах потенциального газового месторождения и, в первую очередь, о проницаемости массива, подлежащего дегазации. К весомым параметрам, характеризующими коллекторские свойства, относят газоносность, сорбционную емкость, внутреннюю удельную поверхность вмещающих пород, слагающих месторождение, их пористость и влагонасыщенность, а также наличие экранирующей поверхности.

Из известных на сегодняшний день результатов исследований можно выделить два направления: установление зависимости коэффициента проницаемости от напряженного состояния пород коллектора и степени раскрытости трещин в них. Несмотря на очевидную взаимозависимость этих факторов оба направления можно рассматривать, как независимые. В специальной литературе имеются лишь разрозненные данные, преимущественно, качественного характера, связывающие напряжения в массиве со степенью раскрытости трещин.

Цель работы состоит в определении на стадии лабораторных и аналитических исследований на численных моделях начальных зависимостей для последующего определения мест расположения коллекторов газа.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Исследования, посвященные изучению коллекторских свойств горных пород угольных шахт, в своем подавляющем большинстве выполнены применительно к задачам обеспечения безопасности работ на добычных участках угольных шахт как в режиме их нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях, преимущественно, внезапных выбросах угля (песчаника) и газа [1–6]. Все без исключения исследования в области движения флюидов в породах-коллекторах основаны на использовании известной формулы Дарси, которая для случая ламинарной фильтрации имеет вид:

$$Q = \left( k \cdot \frac{S}{\mu} \right) grad(P), \mu = \nu \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход,  $k$  – коэффициент газопроницаемости;  $S$  – площадь фильтрационного потока,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  –

абсолютная (динамическая) вязкость, кинематическая вязкость и плотность флюида соответственно,  $grad(P)$  – перепад давления по пути фильтрации.

Выражение (1) основано на решении уравнения Навье-Стокса и получено для отдельной проводящей единицы, например, для цилиндрического капилляр-канала постоянного радиуса. Параметры структуры и напряженного состояния пород коллектора непосредственно в эту формулу не входят. Их суммарное влияние на параметры фильтрации весьма существенно и учитывается через  $k$  – коэффициент газопроницаемости. Остальные параметры, входящие в выражение (1), известны или могут быть установлены инструментально. В работе [7] отмечается, что исследования проницаемости горных пород-сорбентов требует специального подхода, учитывающего неупорядоченность пористого пространства и непостоянство радиусов проводящих каналов по пути движения флюида.

Коэффициент проницаемости определяют путем обследования кернов пород, фильтрующих флюид, лабораторным путем по методикам, разработанным применительно к нефтегазодобыче. Его замеряют в натуральных условиях или определяют расчетным путем [1, 2]. В результате лабораторных испытаний породных образцов устанавливается некоторое текущее значение его проницаемости, по которому впоследствии судят о склонности массива (пласта) к нефти или газоотдаче. Изучение структуры пород-коллекторов и определение проницаемости последних в зависимости от степени раскрытия трещин может быть оправдано в тех случаях, когда процесс добычи флюидов осуществляется в условиях относительно стабильной геомеханической обстановки, что характерно для традиционных технологий, применяемых в нефте- и газодобывающих отраслях. В качестве объектов исследований используются разгруженные от напряжений образцы (керна) горных пород. Удовлетворительная сходимости полученных результатов с реальными параметрами фильтрации наблюдается, если пористость испытываемых образцов незначительно зависит от приложенной нагрузки. В этой связи оценка проницаемости, базирующаяся на расчетах по аналитическим зависимостям, в инженерных расчетах не применяется.

Увеличение глубины горных работ выявили необходимость учета влияния напряженно-деформированного состояния на фильтрационный объем исследуемых пород. Используемая в этих целях серийная аппаратура позволяет нагружать боковую поверхность обследуемых на газопроницаемость кернов до величин, соответствующих условиям их залегания на определенной глубине. Однако параметры проницаемости, установленные на такой аппаратуре, зачастую весьма отличны от реальных, а сами условия нагружения трактуются как «приближенные к пластовым». Экспериментирование на этой аппаратуре не дает возможность оценить не только изменения, но и тенденции в изменениях проницаемости в условиях меняющейся геомеханической обстановки. В работе [8, 9] приведены данные, свидетельствующие о том, что расхождения в значениях проницаемости, установленных экспериментально и путем натурных измерений в шахтах,

могут отличаться на несколько порядков, в частности, сланцы – до 7, известняки – до 5, песчаники – до 4 и алевролиты – до 2 порядков. Это означает, что изменение напряженно-деформированного состояния газонасыщенного массива вследствие его подработки является главенствующим фактором, определяющим коллекторские характеристики техногенного месторождения.

Наиболее распространенным подходом к решению такого рода задач являются попытки установить некую одномерную функциональную зависимость  $k = f(\sigma)$ , связывающую (количественно или качественно) коэффициент газопроницаемости  $k$  с неким абсолютным напряжением  $\sigma$  в массиве. В частности, при проведении экспериментальных исследований на брикетах выбросоопасных углей полагалось достаточным ограничиться учетом нормальной составляющей напряжений, выразив последнюю соответствующим образом через вес вышележащих пород. Обследуемые образцы нагружались без возможности бокового расширения, причем прилагаемая вертикальная нагрузка была неравномерно распределена по длине образца таким образом, что результирующая эпюра напряжений представлялась в виде двух ветвей: ниспадающей и возрастающей с характерным максимумом в центре зоны опорного давления. По результатам исследований установлено, что проницаемость, начиная от кромки забоя, с удалением вглубь массива непрерывно снижается и достигает минимума в плоскости максимума опорного давления, а далее возрастает до пластовой. На основании этих исследований сформулировано понятие «порога уплотнения» как некоторой условной поверхности, пролегающей в углепородном массиве между выработанным пространством и нетронутым массивом, проницаемость пород в окрестности, которой в результате деформирования принимают наименьшие значения. Для обрабатываемого угольного пласта, например, эта поверхность пересекает пласт в зоне максимума опорного давления, располагается примерно параллельно линии забоя, перемещается в пространстве со скоростью перемещения этой поверхности обнажения и препятствует перетокам метана в выработанное пространство из той части пласта, которая находится за зоной опорного давления. Это позволяет рассматривать порог уплотнения как один из признаков экранирующей поверхности.

В реальных условиях горные породы находятся в объемном разнокомпонентном напряженном состоянии, и использование только одной компоненты напряженного состояния горных пород может привести к ошибочным результатам при определении пространственного расположения техногенной газовой залежи и оценки ее запасов, причем ошибка будет возрастать с увеличением глубины. Однако, использование признаков порога уплотнения как параметра, характеризующего экран участка техногенного месторождения, позволяет с новых позиций подойти к решению вопроса о пространственном расположении в подработанном массиве этих локальных зон наличия метана с учетом неконтролируемых межпластовых перетоков метана, в том числе, на поверхность. Для этого необходимо установить закономерности,

характеризующие проявление признаков порога уплотнения с учетом объемного напряженно-деформированного состояния газонасыщенного массива, и установить количественные зависимости для определения конфигурации и расположения экрана месторождения в пространстве этого массива.

В работе [1, 10] приведены результаты исследований проницаемости образцов горных пород с применением усовершенствованных методик и аппаратуры, позволяющих обследовать предварительно нагруженные до состояния, соответствующему геостатическому давлению в недрах, керны пород-коллекторов [11]. Геостатическое давление моделировали, исходя из гипотезы А. Н. Динника, где вертикальная составляющая приравнивается к гравитационной  $\gamma H$ , а горизонтальные вычисляются через коэффициенты бокового распора. По результатам исследований установлено, что минимальные значения коэффициента газопроницаемости соответствуют образцам при равнокомпонентном объемном сжатии, максимальные – разгруженным образцам, а соотношение компонент поля напряжения столь же существенно влияет на коэффициент газопроницаемости, как и величина самих напряжений. Активизация деформационных процессов в породном массиве может определенным образом структурировать фильтрационную систему - разнокомпонентно напряженную газонасыщенную среду, и коэффициент ее газопроницаемости в направлении градиента газового давления есть функция, аргументом которой является степень разнокомпонентности главных напряжений в плоскости, ортогональной фильтрационному потоку. Такую функцию предложено представлять в следующем виде [1, 10, 12]:

$$k = f(\Psi), \quad (2)$$

где  $\Psi$  – соотношение большего главного напряжения к меньшему в плоскости, ортогональной фильтрационному потоку.

Установлено также, что область значений функции (2) в системе координат  $k - \Psi$  ограничена снизу - осью абсцисс, сверху - гиперболической зависимостью и является более объективной в сравнении с функцией  $k = f(\sigma)$ . Однако при практическом использовании рассматриваемых результатов необходимо учитывать, что они не отражают весь спектр геомеханических состояний горных пород в подработанных областях горного массива и, в частности, тех, запас прочности которых полностью или частично исчерпан.

Таким образом, можно говорить об оценке изменения газовой проницаемости образцов при их нагружении по схеме Кармана [13] в режиме заданных деформаций [14]:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3, \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  – осевая нагрузка;  $\sigma_2, \sigma_3$  – боковая нагрузка.

По результатам испытаний образцов построены семейства кривых  $k = f(\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2)$ , каждая из которых соответствует фиксированному значению боковой нагрузки  $\sigma_2 = \sigma_3$  (рис. 1). Параллельно для указанных условий нагружения строились полные диаграммы деформирования (рис. 2) образцов в режиме заданных деформаций [14].

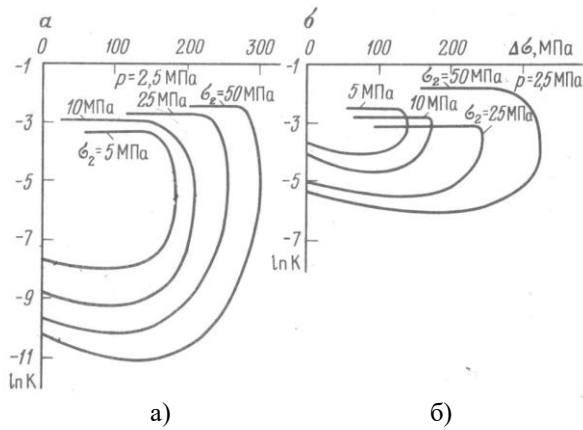


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента проницаемости  $k$  от  $\Delta\sigma$  для выбросоопасного (а) и невыбросоопасного (б) песчаников при четырех уровнях гидростатического давления  $\sigma_2$

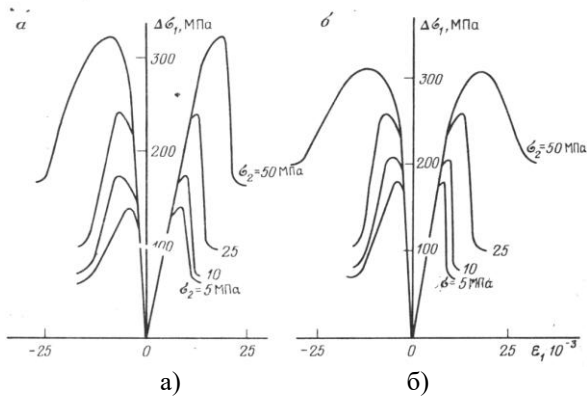


Рисунок 2 – Зависимости  $\Delta\sigma_1$  от продольной  $\varepsilon_1$  и поперечных  $\varepsilon_2$  деформаций выбросоопасного (а) и невыбросоопасного (б) песчаников при разных уровнях гидростатического давления

Такое представление результатов испытаний дает возможность связать проницаемость образца с показателями, характеризующими его геомеханическое состояние как в упругой, так и в запредельной областях деформирования, а именно, с величинами главных напряжений, а также объемной деформацией. В частности, на рис. 2 четко прослеживается линейный участок деформирования, вне пределов которого возникают остаточные деформации, сопровождающиеся разрыхлением материала. Конечные точки кривых соответствуют значениям напряжений, равных остаточной прочности  $R_{ост}$ , когда деформирование материала испытываемой породы в большей степени подчиняется закономерностям, присущим сыпучим средам. Это дает возможность провести аналогию между представленными на рис. 2 диаграммами и деформированием некоторого элементарного объема горной породы, начиная с момента, когда этот объем находится в нетронутом массиве  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , и оканчивая его полным разрушением ( $\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3$ ) вследствие влияния техногенного фактора. Авторами отмечены критические точки на диаграммах деформирования, в которых изменения проницаемости испытываемых образцов приобретает

качественно новый тенденции. К таким точкам отнесены те, которые соответствуют изменениям геомеханического состояния горной породы при переходе через пределы упругости (длительной прочности), мгновенной и остаточной прочности. Однако в интервалах, границами которых последовательно являются смежные пары отмеченных критических точек, тенденции в изменениях проницаемости полностью предсказуемы. Проницаемость как функция  $k=f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  в этих интервалах непрерывна и монотонна.

В частности, в интервале  $[0, R_{упр}]$ , соответствующей области упругого деформирования (рис. 1, 2), трехосное сжатие приводит к уменьшению проницаемости, о чем свидетельствует снижение скорости фильтрации флюида через образец. Это полностью согласуется с результатами выполненных ранее независимых исследований, где этот факт объясняется уменьшением объема пор и микротрещин, а для количественной оценки снижения проницаемости по мере роста осевой компоненты предложено использовать уравнение экспоненциального вида. В отличие от результатов, представленных в [10], минимальные значения проницаемости наблюдаются не при равнокомпонентном сжатии, а на пределе упругости, когда  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ .

При переходе через предел упругости скорость фильтрации и, соответственно, проницаемость увеличивается, а основной рост приходится на область, примыкающую к пределу мгновенной прочности. Механизм роста коэффициента проницаемости в области необратимых деформаций в промежутке от предела упругости и до предела прочности поясняется интенсивным ростом числа плоскостей сдвига, а вместе с ними и соответствующего числа трещин, участвующих в процессе фильтрации. Причем эти трещины растут как в количественном отношении, так и по ширине образца [13]. Характер изменения проницаемости при переходе геомеханического состояния горной породы из упругой области деформирования к неупругой подтверждает гипотезу о положении границы (экранирующей поверхности): граница техногенной залежи пролегает в пространстве подработанного массива по поверхности, разделяющей упруго и неупруго деформированные породы. Таким образом, конфигурация и, следовательно, запасы техногенной залежи могут быть определены исключительно на основании геомеханических параметров подработанного массива. При обследовании углепородных «практически непроницаемых» массивов на предмет образования в них техногенных скоплений метана предложенная гипотеза не требует доказательств.

На этапе деформирования за пределом прочности интенсивность роста проницаемости снижается, а за пределом остаточной прочности  $R_{ост}$ , когда несущая способность массива обусловлена силами трения по поверхностям разрушения и связность полностью потеряна, дальнейшее увеличение проницаемости не наблюдается. Таким образом, рассмотренные результаты исследований проницаемости горных пород в условиях трехосного сжатия получены в привязке ко всем этапам деформирова-

ния породных образцов в режиме заданных деформаций, что выгодно отличает эти результаты от рассмотренных выше. Приведенные на рис. 1 кривые в полной мере отражают проницаемость пород, как составляющих техногенное месторождение, так и экранирующих его.

В реальном газонасыщенном углепородном массиве напряженное состояние отдельных составляющих его структурных элементов характеризуется как разнокомпонентное, причем соотношения между компонентами напряжений, в том числе характеризующими боковую нагрузку, изменяются по мере приближения очистного забоя ( $\sigma_2 \neq \sigma_3$ ). Одному и тому же геомеханическому состоянию деформируемой горной породы может соответствовать бесчисленное множество комбинаций главных напряжений, из чего следует, что рассмотренные результаты исследований могут быть интерпретированы на любой элементарный объем горной породы, нагруженный разнокомпонентно, если эти объемы характеризуются одним и тем же геомеханическим состоянием. Это положение обосновано при решении ряда задач задач геомеханики [15, 16]. Однако вопрос о возможности использования установленных в [14] закономерностей для оценки проницаемости разнокомпонентно нагруженных горных пород открытым и является предметом дальнейших исследований.

Обобщая результаты исследований проницаемости горных пород в зависимости от их напряженно-деформированного состояния следует отметить, что любые изменения проницаемости как в точках бифуркаций, так и в интервалах между ними, связывают с трещинами, составляющими в совокупности фильтрационный объем «практически непроницаемого» массива. Однако, количественная оценка напряженного состояния в произвольном элементарном объеме породного массива не несет информации о параметрах трещин или об изменении этих параметров в сравнении, например, с исходным напряженным состоянием. По результатам сопоставления расчетного напряженного состояния с прочностными параметрами горной породы можно говорить об изменениях фильтрационного объема, как о некотором вероятностном событии. Например, экспериментально установлено, что изменение геомеханического состояния горной породы при переходе через первую точку бифуркации – предел упругости (длительной прочности) процесс трещинообразования характеризуется как устойчивый, а при снятии нагрузки трещины закрываются. При переходе через вторую точку развитие трещин приобретает неустойчивый лавинообразный характер и может продолжаться даже при отсутствии внешней нагрузки [13]. Геомеханические состояния горной породы в интервале напряженных состояний от длительной прочности до остаточной сопровождается увеличением объема (дилатансия) образцов горных пород [9]. При этом это увеличение приходится исключительно на фильтрационный объем [7], поскольку дилатансия протекает с незначительными изменениями объема твердого скелета. Таким образом, зависимость коэффициента проницаемости от фильтрационного объема представляется более объективной в сравнении количест-

венной оценкой этого параметр от величин главных напряжений.

По данным [17] в реальных условиях при разуплотненного горного массива увеличивается его эффективная пористость (фильтрационный объем) как за счет трещинообразования, так и за счет перераспределения газовой и водной фаз, а прирост пористости в зоне разуплотнения можно определить через коэффициент объемной деформации:

$$P' = P + (\theta - 1)/\theta, \quad (4)$$

где  $P, P'$  – пористость начальная и в зоне разуплотнения, доли единицы,  $\theta$  – относительная объемная деформация.

В работе [18] отмечается, что результате экспериментальных исследований получены данные, свидетельствующие о наличии близкой к линейной зависимости между коэффициентом фильтрации песчаников пород и величиной объемной деформации, причем характер зависимости сохраняет свой вид для всех испытуемых в лабораторных условиях образцов песчаных пород. Судя по характеру испытаний, такая зависимость применима для пород, находящихся в предельном напряженном состоянии. В работе [8] выполнена качественная сравнительная оценка между коэффициентом проницаемости  $k$  образцов выбросоопасных и невыбросоопасных песчаников и коэффициентом их объемной деформации. Оценка произведена путем наложения кривых  $k = f(C)$  и  $\theta = f(C)$  в системе координат с общей осью абсцисс. Здесь  $C$  – величина обратная  $\Psi$ . Первая кривая получена в результате лабораторных исследований, вторая – расчетным путем (рис. 3).

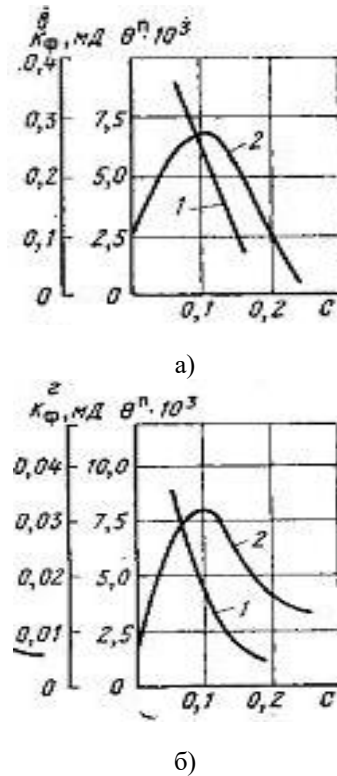


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента фильтрации  $k_f$  (линия 1) и остаточного увеличения объема  $\theta^{\Pi}$  (линия 2) от параметра  $C$ : а) – для выбросоопасного, б) – для невыбросоопасного песчаников

Параллельность кривых 1 и 2 свидетельствует, что коэффициент объемной деформации горной породы и ее проницаемость имеют одинаковые тенденции к изменению на всем интервале деформирования вплоть до достижения предела остаточной прочности  $R_{ост}$ , где оба эти показателя достигают максимума. Следовательно, эти параметры могут быть связаны однозначной зависимостью. При этом необходимо учитывать геомеханическое состояние горной породы, что можно достигнуть, используя результаты испытаний образцов на специальных «жестких» прессах в режиме контролируемых деформаций.

**ВЫВОДЫ.** На основании анализа поведения кривых деформирования образцов в режиме заданных деформаций можно сделать следующее заключение:

- изменение проницаемости, обусловленное влиянием горных работ, в областях массива, характеризующихся примерно одинаковым геомеханическим состоянием, протекает монотонно и непрерывно;
- тенденции этих изменений предсказуемы, они неизменны в интервалах, границами которых являются точки бифуркаций, соответствующие состоянию пород на пределах длительной, мгновенной и остаточной прочности. Таким образом, можно полагать, что, если указанные тенденции установлены, то для анализа параметров техногенного месторождения, как среды фильтрации, достаточными являются знания о величинах проницаемости в точках бифуркаций, а также в нетронутом массиве;
- коэффициент фильтрации находится в линейной зависимости от величины объемной деформации и связанной с нею величиной проницаемости, что позволяет вести прогноз этих величин на стадии лабораторных исследований породных образцов в режиме заданных деформаций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шевелев Г. А., Перепелица В. Г. Фильтрация газа в шахтах. К.: Наукова думка, 2010. 295 с.
2. Гуня Д. П. Показатели фильтрации метана в подработанном углепородном массиве на шахте им. А. Ф. Засядько. *Геотехническая механика*. Днепропетровск. 2008. Вып. 76. С. 143–147.
3. Перепелица В. Г., Ефремов И. А. Особенности проявления сил вязкого трения при движении газовых потоков. *Геотехническая механика*. Днепропетровск. 2010. Вып. 91. С. 85–94.
4. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов. К.: Наукова думка, 2010. 423 с.
5. Алексеев А. Д., Фельдман Э. П., Стариков Г. П. и др. Прогноз времени образования опасных концентраций метана в очистных забоях. *Уголь Украины*. 2010. № 7. С. 29–32.
6. Зборщик М. П. Предотвращение притоков метана в призабойное пространство высоконагруженных лав. *Уголь Украины*. 2012. № 12. С. 11–16.
7. Малышев Ю. Н., Трубецкой К. Н., Айруни А. Т. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. М.: Изд-во Академии горных наук, 2000. 519 с.
8. Majcherczyk T., Szaszenko A., Sdwiikowa E.: Podstawy geomechaniki. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH. Krakow 2006. 293 p.
9. Шашенко А. Н., Майхерчик Т., Сдвижкова Е. А. Геомеханические процессы в породных массивах. Днепропетровск: Национальный горный университет. 2005. 319 с.
10. Перепелица В. Г., Шевелев Г. А., Кулинич В. С. и др. Изменение газовой проницаемости в напряженных горных породах. *Уголь Украины*. 2006. № 3. С. 38–41.
11. Шашенко А. Н. Механика горных пород. Днепропетровск: НГАУ. 2002. 302 с.
12. Булат А. Ф., Звягильский Е. Л., Лукинов В. В. и др. Углепородный массив Донбасса как гетерогенная среда. К.: «Наукова думка». 2008. 411 с.
13. Баклашов И. В. Геомеханика: Учебник для вузов в 2 т. - М.: МГУ. 2004. т.1. 208с.
14. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука. 2001. 343 с.
15. Шашенко А. Н., Сдвижкова Е. А., Гапеев С. Н. Деформируемость и прочность горных пород. Днепропетровск: Национальный горный университет. 2008. 224 с.
16. Шашенко А. Н., Солодянкин А. В., Мартовичкий А. В. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт. Днепропетровск: ТОВ «ЛизуновПресс». 2012. 384 с.
17. Лукинов В. В., Безручко К. А., Приходченко О. В. та ін. Прогноз перспективності ділянок для пошуку скупчень вільного метану (на прикладі шахти «Бутовська»). *Наук вісник НГУ*. 2012. № 2. С. 27–35.
18. Садовенко І. О., Тимошук В. І., Тішков В. В. та ін. Дослідження впливу напружено-деформованого стану вміщуючих гірських порід на їх фільтраційні властивості при підземній газифікації вугільних пластів в умовах Донбасу. *Науковий вісник НГУ*. 2010. № 3. С. 32–33.

### EVALUATION OF THE ROCK MASSES GAS PERMEABILITY DURING METHANE MINING IN COAL MINES

**A. Shashenko, V. Cherednyk**

Dnipro University of Technology

prosp. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: cherednyk.v.a@nmu.one

**Purpose.** Meeting the growing global energy needs in the energy strategies new scenarios is fundamentally different from what they were before. However, despite the relatively low growth rate of demand for fossil fuels (especially coal and oil), it is predicted that it will remain the dominant part of the energy balance at the global level. This direction of the global energy sector development poses serious challenges for the Ukrainian industry, the most relevant of which is energy efficiency. One of the ways to achieve the efficient use of coal mine resources is the coal mine methane extraction. **Methodology.** Methods for solving indicated problems consist of performing in-situ, laboratory, and analytical researches. In-situ researches consist of the gas content assessing of a gas-coal deposit, laboratory ones – deformation of rock and coal samples in the predetermined deformations conditions, and analytical – in establishing the characteristics

of the stress-strain state in the vicinity of the slopped works. In the present work, relying on the well-known in-situ and laboratory studies, analytical calculations are performed. These data allow evaluating the parameters of gas flows while mining the coal seams. **Results.** Based on the analysis of the samples' deformation curves behavior in the mode of specified deformations, we can make a conclusion, that in the mining area influence a change in permeability of the massif characterized by approximately the same geo-mechanical state proceeds monotonously and continuously. The trends of these changes are predictable, as they are constant in the intervals, the boundaries of which are bifurcation points. Bifurcation points are corresponding to the rocks state within the limits of long-term, instantaneous and residual strength. Thus, it can be assumed that, if the indicated trends are established, then knowledge of the permeability values at the bifurcation points, as well as in the untouched massif, is sufficient to analyze the parameters of the technogenic deposit as a filtration environ. **Originality.** The research novelty is proof that the filtration coefficient is linearly dependent on volumetric deformation magnitude and, related to it, permeability magnitude. This dependence allows predicting these values at the laboratory researches stage of rock samples in the condition of specified strains. **Practical value.** The practical value is to determine at the stage of laboratory and analytical researches on numerical models of gas collector's location.

**Key words:** methane, coal, permeability, dilatancy, filtering, collectors, tension, deformation.

## REFERENCES

1. Shevelev, G. A., Perepelitsa, V. G. (2010), *Filtratsiya gaza v shahtah* [Gas filtration in mines], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine, 295 p.
2. Gunya, D. P. (2008), "Pokazateli filtratsii metana v podrobotannom ugleporodnom massive na shahte im. A.F.Zasyadko" [Methane Filtration Indicators in a Forged Carbon Array at AF Zasyadko Mine], *Geotekhnicheskaya mehanika* [Geotechnical mechanics], Dnepropetrovsk, no. 76, pp. 143–147.
3. Perepelitsa, V. G., Efremov, I. A. (2010), "Osobennosti proyavleniya sil vyzkogo treniya pri dvizhenii gazovykh potokov" [Features of the manifestation of viscous friction forces when moving gas flows], *Geotekhnicheskaya mehanika* [Geotechnical mechanics], Dnepropetrovsk, no. 91, pp. 85–94.
4. Alekseev, A. D. (2010) *Fizika uglia i gorniyh protsessov* [Physics of coal and mining], Naukova dumka, Kyiv, 423 p.
5. Alekseev, A. D., Feldman, E. P., Starikov, G. P. (2010), "Prognoz vremeni obrazovaniya opasnykh kontsentratsiy metana v ochestnykh zaboyah" [Forecasting the time of formation of hazardous concentrations of methane in the face], *Ugol Ukrainyi* [Coal of Ukraine], no. 7, pp. 29–32.
6. Zborschik, M. P. (2012), "Predotvraschenie pritokov metana v prizaboynoe prostranstvo vyisokonagruzhennykh lav" [Prevention of methane inflow into the bottomhole of highly loaded lavas], *Ugol Ukrainyi* [Coal of Ukraine], no. 12, pp. 11–16.
7. Malyishev, Yu. N., Trubetskoy, K. N., Ayruni, A. T. (2000), *Fundamentalno prikladnyie metodyi resheniya problemyi metana ugolnykh plastov* [Fundamentally applied methods for solving the problem of coalbed methane], Izd-vo Akademii gorniyh nauk, Moscow, Russia, 519 p.
8. Majcherczyk, T., Szaszenko, A., Sdwikowa, E. (2006), *Podstawy geomechaniki* [Basics of geomechanics], Krakow, Poland, 293 p.
9. Shashenko, A. N., Mayherchik, T., Sdvizhkova, E. A. (2005), *Geomechanicheskie protsessy v porodnykh massivah* [Geomechanical processes in rock masses], Natsionalnyy gornyy universitet, Dnepropetrovsk, Ukraine, 319 p.
10. Hodot, V. V. (1961), *Vnezapnyie vyibrosyi uglia i gaza* [Sudden emissions of coal and gas], Gosgortehizdat, Moscow, Russia, 363 p.
11. Shashenko, A. N. (2002), *Mehanika gorniyh porod* [Mehanika gorniyh porod], NGAU, Dnepropetrovsk, Ukraine, 302 p.
12. Bulat, A. F., Zvyagilskiy, E. L., Lukinov, V. V. (2008), *Ugleporodnyy massiv Donbassa kak heterogennaya sreda* [Carboniferous massif of Donbass as a heterogeneous medium], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine, 411 p.
13. Baklashov, I. V. (2004), *Geomechanika: Uchebnik dlya vuzov v 2 t.* [Geomechanics: Textbook for universities in 2 vol.], MGU, Moscow, Russia, t.1, 208 p.
14. Stavrogin, A. N., Tarasov, B. G. (2001), *Eksperimentalnaya fizika i mehanika gorniyh porod* [Experimental physics and rock mechanics] Nauka, SPb., Russia, 343 p.
15. Shashenko, A. N., Sdvizhkova, E. A., Gapev, S. N. (2008), *Deformiruemost i prochnost gorniyh porod* [Deformability and rock strength], Natsionalnyy gornyy universitet, Dnepropetrovsk, Ukraine, 224 p.
16. Shashenko, A. N., Solodyankin, A. V., Martovitskiy, A. V. (2012), *Upravlenie ustoychivostyu protyazhennykh vyirabotok glubokikh shaht* [Stability management of long deep mine workings], TOV «LizunovPress», Dnepropetrovsk, Ukraine, 384 p.
17. Lukinov, V. V., Bezruchko, K. A., Prihodchenko, O. V. (2012), "Prognoz perspektivnosti dilyanok dlya poshuku skupchen vilnogo metanu (na prikladi shahti «Butovska»)» [Forecast of the prospectus of the plots for search of accumulations of free methane (on the example of the Butovska mine)], *Naukoviy visnik NGU* [NSU Scientific Bulletin], no. 2, pp. 27–35.
18. Sadovenko, I. O., Timoschuk, V. I., Tishkov, V. V. (2010), "Doslidzhennya vplivu napruzheno-deformovanogo stanu vmischuyuschih girskih porod na yih filtratsiyi vlastivosti pri pidzemniy gazifikatsiyi vugilnih plastiv v umovah Donbasu" [Investigation of the effect of stress-deformed state of host rocks on their filtration properties during underground gasification of coal seams in Donbass], *Naukoviy visnik NGU* [NSU Scientific Bulletin], no. 3, pp. 32–33.

Стаття надійшла 27.01.2020.